بسم الله الرحمن الرحيم

وزارة الشؤون البلدية والقروية
Ministry of Municipal & Rural Affairs
الإدارة العامة لتراخيص البناء

وكالة الوزارة للشئون الفنية

الرقم
التاريخ
المرفقات

وزارة الشؤون البلدية والقروية
ادارة الشئون الاداريه
الصادر ٤١٠٠١٢٨٨٠٤ في ١٤٤١-٤-١١هـ
المرفقات/ ٢ لفه cd

قرار وزاري

إن وزير الشؤون البلدية والقروية المكلف

وبناء على الصلاحيات المخولة له نظاماً.

وبناء على المادة (٤٨) من نظام البلديات والقرى الصادر بالمرسوم الملكي رقم (م/٥) وتاريخ ١٣٩٧/٢/٢١هـ بشأن إصدار اللوائح والتعليمات لهذا النظام.

وبعد الإطلاع على ما عرضه علينا سعادة وكيل الوزارة للشؤون الفنية المكلف حول تحديث إصدارات وكالة الوزارة للشؤون الفنية من تحديث جميع الأدلة والإشتراطات لكي تتواكب وتتماشى مع رؤية المملكة ٢٠٣٠م وتكون عنصراً محفزاً لتحقيق أهداف الرؤية في تشجيع الإستثمار وضبط عملية التطوير مما سيكون له تأثير إيجابي على البيئة العمرانية.

(يقرر ما يلي)

أولاً: الموافقة على إصدار الأدلة والإشتراطات بصيغتها المرفقة وهي كما يلي:-

١) اشتراطات أبراج وهوائيات الإتصالات اللاسلكية.
٢) اشتراطات اللوحات الدعائية والإعلانية.
٣) اشتراطات المباني الترفيهية.
٤) اشتراطات المباني الرياضية.
٥) اشتراطات المباني المهنية.
٦) اشتراطات المدارس الأهلية.
٧) اشتراطات المستودعات والورش والمخازن.
٨) اشتراطات المطاعم والمطابخ.
٩) اشتراطات قاعات المناسبات (قصور الأفراح) والإستراحات.
١٠) اشتراطات مباني الصحة والخدمات الإجتماعية الأهلية.
١١) اشتراطات مراكز الخدمة.
١٢) اشتراطات مراكز خدمات النقل والمركبات.
١٣) دليل المواصفات العامة لإنشاء الطرق ومنشآتها.
١٤) دليل التصميم الهندسي للطرق.
١٥) دليل تقييم ومعالجة المباني الآيلة للسقوط.
١٦) دليل المفتش الفني للمباني.

بسم الله الرحمن الرحيم

١٧) دليل إنارة الشوارع والميادين.
١٨) دليل تصميم المصاعد والسلالم الكهربائية.
١٩) دليل تصميم منشآت الطرق.
٢٠) دليل تصميم مواقف السيارات.
٢١) دليل تقييم طبقات رصف الطرق ومنشآتها.
٢٢) دليل عقود تنفيذ الطرق والحدائق.
٢٣) دليل تدقيق تصاميم مشاريع الطرق.
٢٤) الدليل الفني لمراقبة تنفيذ أعمال الطرق واختبارات مواد الرصف.

ثانياً: تلغي هذه الأدلة والإشتراطات جميع ما يتعارض معها من أحكام.

وزير الشؤون البلدية والقروية المكلف

د. ماجد بن عبدالله القصبي

غ م ٧٣

وزارة الشـــؤون
البلدية والقروية
Ministry of Municipal & Rural Affairs

مجموعة إصدارات تصميم الطرق والجسور

دليل تصميم منشآت الطرق

1441 هـ - 2019 م

المحتويات

أجزاء الدليل

المقدمة والنطاق م-1

الجزء الأول: دليل التصميم الهيدروليكي لمنشآت الطرق 1-1

الجزء الثاني: دليل التصميم الإنشائي للجسور والعبارات 1-2

الجزء الثالث: دليل تصميم الأنفاق 1-3

مدة التحديث وحقوق الملكية والمرجعية خ-1

مقدمـــــة

تعتمد جودة الحياة في المجتمعات الحضرية بدرجة كبيرة، على الخدمات التي تقدمها الدولة في مجال البنية التحتية، وتأتي في مقدمتها الطرق الحضرية. وعلى الدوام تعترض الطرق عوائق يلزم أن تعبرها لتحقيق استمرارية السير، وقد تكون هذه العوائق طبيعية مثل الأودية والأنهار والجبال، أو قد تكون طرقًا أخرى متقاطعة معها. ولعبور هذه العوائق ابتدع الإنسان منذ القدم منشآت الطرق التي تسمى في بعض المجتمعات الأعمال الصناعية، وتشمل الجسور لعبور الأودية والطرق المتقاطعة، والأنفاق لعبور الجبال والطرق المتقاطعة، والعبارات للعبور فوق الأودية.

ويعدُّ تصميم هذه المنشآت جزءًا أساسيًا من تصميم الطرق. وقد تكون المنشآت مشمولة ضمن مشاريع الطرق أو تكون قائمة بذاتها، خاصة بالنسبة للمنشآت الكبيرة. وفي الحالتين، فإن تصميم منشآت الطرق يحتاج إلى خلفية علمية وخبرة واسعة لإنتاج تصميم يحقق المتطلبات الوظيفية، ويكون اقتصاديًا ومعمرًا.

لهذا ارتأت وزارة الشؤون البلدية والقروية، ممثلة في وكالتها للشؤون الفنية، إصدار هذا الدليل المجمّع، الذي يضم كل نواحي تصميم المنشآت القائمة على الطرق؛ ليشكل المرجعية الأساسية للتعامل مع هذه المشاريع وتوحيد الممارسات بين الاستشاريين المصممين. وفي الوقت نفسه، يركز هذا الإصدار على الأساسيات، بحيث لا يحجر على خيال المصممين في ابتكار أنماط وتصميمات غير تقليدية.

ويتكون هذا الدليل من ثلاثة أجزاء:

الجزء الأول: دليل التصميم الهيدروليكي لمنشآت الطرق..

ويبدأ هذا الجزء بعرض أساسيات هيدرولوجيا الطرق السريعة واستخدامها لأغراض التصميم، ثم يتعرض للتصميم الهيدروليكي لنوعين من منشآت الطرق:

- العبارات وهي منشآت كثيرة الانتشار على طرق المملكة.
- الجسور القائمة على الأودية والأنهار.

الجزء الثاني: دليل التصميم الإنشائي للجسور والعبارات..

ولا يشمل هذا الجزء مواصفات التصميم الإنشائي، وإنما يعتمد مواصفات التصميم الأمريكية (AASHTO LRFD Bridge Design Specifications) التي اتبعت في تصميم كل الجسور والعبارات في الولايات المتحدة الأمريكية والعديد من دول العالم، ويجري تحديثها بصفة مستمرة لتواكب أحدث الأبحاث الهندسية، وكان آخر تحديث شامل لها في 2017، بينما يعدل هذا الجزء بعض الأحكام لما يناسب بيئة المملكة، مثل أحمال الرياح وأحمال الزلازل وغيرهما. وحيثما تعرض المواصفات الأمريكية بدائل للتصميم يحدد الاختيار المفضل للمملكة. كما أنه يحدد الممارسات المذكورة في المواصفات الأمريكية ولكنها لا تناسب المملكة.

الجزء الثالث: دليل تصميم الأنفاق..

ويتعرض هذا الجزء للاعتبارات الأساسية في تصميم الأنفاق بكل مشتملاتها من أنظمة ميكانيكية وكهربائية، وأنظمة تصريف وأنظمة تحكم وغيرها. وحيث إن تصميم الأنفاق يرتبط ارتباطًا وثيقًا بطريقة تنفيذها، فإن هذا الجزء يتضمن أيضًا متطلبات التنفيذ التي يجب أن تؤخذ في الحسبان في مرحلة التصميم. ونظراً إلى تنوع الاختصاصات المستخدمة في الأنفاق من طرق الحفر، إلى طرق التدعيم والتبطين، إلى شبكات التغذية والتصريف بمختلف أنواعها، إضافةً إلى متطلبات الحماية والسلامة العامة من المخاطر والحوادث الخاصة بالأنفاق؛ لذلك يجب الرجوع إلى المراجع المذكورة من أجل الحصول على كامل التفاصيل.

ويعتمد الدليل بأجزائه الثلاثة على أن مستخدميه لديهم خلفية علمية وخبرة عملية تمكناهم من متابعة ما يتضمنه من إرشادات.

وسوف تقوم وكالة الوزارة للشؤون الفنية بإخضاع هذا الدليل للتحديث المستمر كلما دعت الحاجة، أو ظهرت معطيات أو خبرات أو ممارسات جديدة.

النطاق وحدود التطبيق

1- النطاق وحدود التطبيق

هذا الدليل موجه إلى منسوبي وزارة الشؤون البلدية والقروية وما يتبعها من أمانات وبلديات، وكذلك الاستشاريين المعنيين بتصميم وتدقيق تصاميم منشآت الطرق في المناطق الحضرية، من جسور وأنفاق وعبارات، وتشمل منشآت الطرق أيضًا معابر المشاة العلوية (جسور المشاة) والسفلية (أنفاق المشاة). ويجب الالتزام بالدليل من قبل الوزارة وجميع الأمانات والبلديات المعنية بمجال منشآت الطرق، وأن يمارس منسوبوها وظائفهم ومسؤولياتهم وفقًا لهذا الدليل، كما يجب عليهم التأكد من أن تصاميم منشآت الطرق تحقق المتطلبات الوظيفية، ومتطلبات الأمن والسلامة.

ويختص هذا الدليل بمنشآت الطرق الجديدة التي يتم إنشاؤها، أو التي تخضع لأعمال التطوير مثل زيادة العرض.

1-1 استثناءات النطاق

ينطبق هذا الدليل على المنشآت القائمة على الطرق الحضرية، الواقعة تحت إشراف ومسؤولية وزارة الشؤون البلدية والقروية، وغير مخصص للمنشآت القائمة على الطرق الواقعة خارج النطاق العمراني، والواقعة تحت إشراف ومسؤولية وزارة النقل، وكذلك الخاصة بالهيئات مثل الهيئة الملكية وهيئة تطوير الرياض وغيرهما.

ويختص هذا الدليل بتصميم المنشآت الجديدة ولا يختص بتقييم وصيانة المنشآت القائمة التي يختص بها إصدار آخر.

ويعرض هذا الدليل الأعمال الميكانيكية والكهربائية لأنفاق الطرق، ولا يتعرض للأعمال الميكانيكية والكهربائية لأنفاق المشاة، ولا يشمل الإصدار أنظمة الإضاءة على الجسور والطرق والشوارع والميادين العامة، ومواصفات المواد الخاصة بإنارة الأنفاق. ويتم الرجوع في هذا الصدد إلى إصدار "المواصفات الفنية لإنارة الشوارع والميادين"، الصادر عن وزارة الشؤون البلدية والقروية.

الجزء الأول

دليل التصميم الهيدروليكي لمنشآت الطرق

المحتويات

القسم الأول: هيدرولوجيا الطرق السريعة 1-1

1-1 المقدمة 1-1

2-1 التعريفات 1-1

3-1 الدورة الهيدرولوجية 1-4

4-1 دراسة هيدرولوجيا تقاطع الطرق السريعة مع المجاري المائية 1-5

1-4-1 عناصر من الدورة الهيدرولوجية وثيقة الصلة بمعابر السيول 1-5

2-4-1 نظرة عامة للدراسات الهيدرولوجية لمعابر السيول 1-6

3-4-1 التحويلات وبناء السدود 1-9

4-4-1 الكوارث الطبيعية 1-9

5-1 المطر وعمليات التدفق 1-10

1-5-1 الهطول 1-10

2-5-1 الفواقد الهيدرولوجية 1-12

3-5-1 خصائص الجريان السطحي 1-14

4-5-1 تأثير خصاص الحوض على التدفق 1-18

6-1 البيانات الهيدرولوجية 1-25

1-6-1 الخرائط الطوبوغرافية 1-25

2-6-1 الصور الفوتوغرافية 1-25

3-6-1 استعمالات الأراضي 1-26

4-6-1 استعمالات المياه 1-26

5-6-1 بيانات المطر 1-26

6-6-1 بيانات محطات القياس 1-26

7-6-1 علامات الماء المرتفع 1-27

7-1 التحليل الهيدرولوجي 1-27

1-7-1 مساحة التصريف 1-27

2-7-1 معاملات الحوض التجميعي للماء 1-27

3-7-1 تحليل الأمطار 1-38

4-7-1 زمن التركيز 1-43

5-7-1 تقدير الفيضان 1-49

القسم الثاني: تصميم العبارات 72-1
1-1 عام 72-1
2-1 مقارنة بين العبارات والجسور ومصارف العاصفة 72-1
3-1 نظرة عامة على العبارات 75-1
1-3-1 الأشكال 76-1
2-3-1 المواد 78-1
3-3-1 المداخل 79-1
4-3-1 وظيفة العبارة 82-1
4-1 هيدروليكيا العبارات 83-1
1-4-1 حالات التدفق 83-1
2-4-1 أنواع ضوابط التدفق 87-1
3-4-1 عمود الماء عند المدخل 90-1
4-4-1 سرعة المخرج 90-1
5-4-1 منحنيات الأداء 91-1
1-2 الهيدرولوجيا 93-1
1-1-2 عام 93-1
2-1-2 تدفق الذروة التصميمي 94-1
2-2 بيانات الموقع 95-1
1-2-2 موقع العبارة 95-1
2-2-2 بيانات المجرى الطبيعي 96-1
3-2-2 بيانات الطريق 102-1
4-2-2 عمود الماء المقبول أو المسموح به (Allowable Headwater) 104-1
1-3 التدفق في العبارات 109-1
1-1-3 عام 109-1
2-1-3 أنواع الضوابط 110-1
3-1-3 نظام المدخل 110-1
4-1-3 نظام المخرج 119-1
ملحق (1): النوموغرافات أو الآباكات اللازمة لعمليات التصميم الهيدروليكي للعبارات 123-1

القسم الثالث: تصميم الجسور 150-1
1-1 مفاهيم عامة 151-1
1-1-1 ارتفاع المياه أمام الجسر (Bridge Heading-up) 152-1
2-1-1 وضع الجريان المنتظم (Uniform Flow) 157-1
3-1-1 التقاطع العمودي المتماثل (Normal Crossing) 157-1
4-1-1 التقاطع العمودي غير المتماثل (Eccentric Crossing) 158-1
5-1-1 التقاطع المنحرف (Skewed Crossing) 159-1
6-1-1 عرض التقلص (Constriction width) 159-1
1-2 الحسبانات الهيدروليكية لتصميم الجسور (Design Considerations) 160-1
1-1-2 التدفق التصميمي والتدفق الاختباري 160-1
2-1-2 اعتبارات خاصة بالموقع 161-1
3-1-2 متطلبات الرفع المساحي للجسور 164-1
4-1-2 النمذجة الهيدروديناميكية للجسور 167-1
1-3 التصميم الهيدروليكي للجسور 168-1
1-1-3 الحسابات التقريبية لارتفاع المياه أمام الجسور 168-1
2-1-3 حساب النحر للجسور 181-1
1-4 الاحتياطات المطلوب توافرها للتخفيف من النحر الموضعي ولاسيّما للجسور القائمة 196-1
1-5 مقاومة انسداد المجرى المائي تحت الجسر بسبب العوالق 215-1

مراجع الجزء الأول 220-1

قَائِمَةُ الأَشْكَالِ

القسم الأول: هيدرولوجيا الطرق السريعة
الشكل 1-1: عناصر مخطط تغير الفيضان مع الزمن (هيدروغراف) 16-1
الشكل 1-2: العلاقة بين التدفق والمنسوب 17-1
الشكل 1-3: تأثيرات خصائص الحوض على تغير التدفق مع الزمن 23-1
الشكل 1-4: تأثيرات خصائص الحوض على تغير التدفق مع الزمن 42-1
الشكل 1-5: المسار الحرج وصور جريان المياه على سطح حوض الصرف 44-1
الشكل 1-6: المسار المناطق الهيدرولوجية في المملكة العربية السعودية 71-1

القسم الثاني: تصميم العبارات
الشكل 1-1: مقارنة بين الجسر والعبارة في نفس الموقع 75-1
الشكل 2-1: أشكال العبارات الشائعة الاستخدام 78-1
الشكل 3-1: الأشكال الاعتيادية للعبارات مفتوحة القاع 79-1
الشكل 4-1: أربع إعدادات اعتيادية للمدخل 81-1
الشكل 5-1: تقلص الماء عند المدخل 82-1

الشكل 1-6: رسم تخطيطي للمداخل مسلوبة ـ الجوانب ومسلوبة ـ الانحدار 1-83
الشكل 1-7: أصناف (أنظمة) التدفق فوق سد صغير 1-87
الشكل 1-8: مقطع لتدفق نظام المدخل نموذجي 1-88
الشكل 1-9: حالات تدفق نظام المخرج النموذجية 1-90
الشكل 1-10: منحنى الأداء الهيدروليكي للعبارة 1-93
الشكل 2-1: طرق تعيين موقع العبارة 1-97
الشكل 2-2: تحديد أماكن المقاطع العرضية 1-99
الشكل 2-3: المقطع العرضي للطريق وطول العبارة 1-104
الشكل 2-4: المقطع الجانبي للطريق ـ مقطع الوادي 1-105
الشكل 3-1: أنواع نظام المدخل 1-112
الشكل 3-2: إعدادات المدخل النموذجية 1-114
الشكل 3-3: الحواف المشطوفة 1-115
الشكل 3-4: منحنيات نظام المدخل 1-117
الشكل 3-5: عبارة بمدخل منخفض وأرضية أساس للمقاربة وحوائط جانبية 1-119
الشكل 3-6: عبارة بمدخل منخفض وحوض تجميع 1-119
الشكل 3-7: أنواع نظام المخرج 1-121
الشكل 4-1: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الأنبوبية الخرسانية حسب نظام المدخل 1-126
الشكل 4-2: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الأنبوبية المعدنية المموجة حسب نظام المدخل 1-128
الشكل 4-3: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الأنبوبية الدائرية حسب نظام المدخل بحلقة مشطوفة . 1-130
الشكل 4-4: العمق الحرج للأنابيب الدائرية 1-131
الشكل 4-5: فرق الضغط لعبارات أنبوبية خرسانية تحت التدفق الكامل 1-132
الشكل 4-6: فرق الضغط لعبارات أنبوبية معدنية مموجة نموذجية تحت التدفق الكامل 1-134
الشكل 4-7: فرق الضغط لعبارات أنبوبية مصنوعة من صفائح بنيوية معدنية مموجة تحت التدفق الكامل1-136
الشكل 4-8: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية حسب نظام المدخل 1-138
الشكل 4-9: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة حسب نظام المدخل ... 1-139
الشكل 4-10: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة حسب نظام المدخل .. 1-141
الشكل 4-11: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة ذات الخلية الواحدة
حسب نظام المدخل ـ بحائط أمامي منحرف ومدخل بحواف مشطوفة أو مشذّبة 1-142
الشكل 4-12: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة حسب نظام المدخل ـ
بحوائط جانبية مفلجة ومداخل قائمة أو منحرفة وتشذيب 19مم عند قمة فتحة المدخل 1-144
الشكل 4-13: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة حسب نظام المدخل ـ
بحوائط جانبية مفلجة مُزّاحة وحافة مشطوفة عند قمة فتحة المدخل 1-146
الشكل 4-14: العمق الحرج لمقاطع المستطيلة 1-147
الشكل 4-15: فرق الضغط لعبارات صندوقية خرسانية تحت التدفق الكامل 1-149
الشكل 4-16: نظام المدخل ـ عمق عمود الماء للمجاري (العبارات) الدائرية أو البيضاوية المصنوعة
من صفائح بنيوية معدنية مموجة 1-150
الشكل 4-17: نظام المدخل ـ عمق عمود الماء للعبارات القوسية العالية أو المنخفضة القمة
والمصنوعة من صفائح بنيوية معدنية مموجة 1-151
الشكل 4-18: مخطط بياني للعمق الحرج للابعدي لعبارات بيضاوية محورها الأطول أفقي ومصنوعة
من صفائح بنيوية معدنية مموجة 1-153
الشكل 4-19: مخطط بياني للعمق الحرج للابعدي لعبارات قوسية عالية أو منخفضة القمة ومصنوعة
من صفائح بنيوية معدنية مموجة 1-154
الشكل 4-20: نظام المدخل (الحلق المُنَظّم) ـ للمداخل ذات الجوانب المستدقة أو المسلوبة تدريجيًّا
نحو أنبوب العبارة (للمقاطع الدائرية فقط) 1-156
الشكل 4-21: نظام المدخل (الواجهة المُنَظّمة) ـ للمداخل ذات الجوانب المستدقة أو المسلوبة تدريجيًّا
نحو أنبوب العبارة (للمقاطع غير المستطيلة فقط) 1-157
الشكل 4-22: نظام المدخل (الحلق المُنَظّم) لعبارات صندوقية بمداخل مستدقة أو مسلوبة 1-159
الشكل 4-23: نظام المدخل (الواجهة المُنَظّمة) لعبارات صندوقية بمداخل مستدقة أو مسلوبة الجوانب ... 1-161
الشكل 4-24: نظام المدخل (الواجهة المُنَظّمة) لعبارات صندوقية بمداخل مستدقة أو مسلوبة الانحدار ... 1-162
الشكل 4-25: معاملات التدفق للفيض فوق الطريق 1-162

القسم الثالث: تصميم الجسور

الشكل 1-1: شكل يوضح مجرى السيل وتقاطعه مع موقع الجسر 1-164
الشكل 1-2: المسقط الأفقي والرأسي للجسر 1-166
الشكل 1-3: خطوط الجريان عند الجسور فوق الأودية 1-167
الشكل 1-4: أنواع الجريان عند الجسور وارتفاع منسوب المياه أمام الجسر عن خلفه (Heading-up) .. 1-170
الشكل 1-5: قطاع المجرى المائي عند قطاع رقم (1) أمام الجسر 1-172
الشكل 1-6:شكل عام يوضح التقاطع العمودي غير المتماثل على مجرى السيل (Eccentric Crossing). 1-172
الشكل 1-7: شكل عام يوضح التقاطع المنحرف لمجرى السيل (Skewed Crossing) 1-173
الشكل 1-8: قطاع المجرى المائي عند قطاع رقم (2) أسفل الجسر 1-174
الشكل 2-1: شكل الجريان في حدود السيل أسفل الجسر 1-176
الشكل 2-2: الرفع المساحي المطلوب في حالة الجسور العمودية 1-180
الشكل 2-3: الرفع المساحي المطلوب في حالة الجسور المنحرفة 1-180
الشكل 2-4: الرفع المساحي المطلوب في حالة الجسور على أودية منحنية أو متعرجة
(Meandering or Curved Wadis). 1-181
الشكل 3-1: شكل عام يوضح قطاع رقم (1) وقطاعاته الفرعية أمام الجسر 1-184
الشكل 3-2: تحديد قيمة معامل الطاقة الحركية للقطاع الثاني أسفل الجسر 1-188
الشكل 3-3: حساب معامل ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر 1-191
الشكل 3-4: تحديد معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة وجود الدعامات الوسطية 1-193

الشكل 3-5: تحديد معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة التقاطع العمودي غير المتماثل 1-194
الشكل 3-6: تحديد معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة التقاطع المنحرف 1-196
الشكل 3-7: المتغيّرات الأساسية لنحر التقلص لمعادلة Laursen..... 1-199
الشكل 3-8: شكل عام للدوامات حول الدعامات الوسطية. 1-200
الشكل 3-9: الأشكال العامة للدعامات الوسطية..... 1-202
الشكل 3-10: شكل عام لنحر القاع بسبب المياه الرائقة (غير المحملة بالرسوبيات)..... 1-204
الشكل 3-11: الشكل العام للنحر حول أكتاف الجسر..... 1-207
الشكل 3-12: زاوية ميل أكتاف الجسر مع اتجاه الجريان 1-208
الشكل 3-13: الأنواع المختلفة لأكتاف الجسور. 1-209
الشكل 3-14: تعريف طول الكتف المُسقط والفعال. 1-211
الشكل 4-1: الشكل العام لوضع طبقة الحماية حول الدعامات الوسطية للجسر..... 1-213
الشكل 4-2: شكل عام لحماية الدعامات الوسطية للجسور من النحر..... 1-213
الشكل 4-3: الترتيبات الوقائية لحماية الدعامات الوسطية للجسور من النحر..... 1-214
الشكل 4-4: الخصائص المختلفة لنحر أكتاف الجسور. 1-216
الشكل 4-5: الترتيب الوقائي لحماية أكتاف الجسور من النحر. 1-216
الشكل 4-6: شكل توضيحي لبيانات المثال رقم (1)..... 1-218
الشكل 5-1: الطرق التقليدية للتعبير عن العوالق العائمة عند الدعامات الوسطية للجسور. 1-232
الشكل 5-2: الطرق التقليدية للتعبير عن العوالق العائمة عند الدعامات الوسطية للجسور. 1-233
الشكل 5-3: منشآت توجيه العوالق..... 1-234

قَائمَةُ الجَدَاوِلِ

القسم الأول: هيدرولوجيا الطرق السريعة

الجدول 1-1: مقياس الخرائط. 1-25
الجدول 1-2: قيم معامل الخشونة (N)..... 1-30
الجدول 1-3: قيم معامل الخشونة (N)..... 1-32
الجدول 1-4: نسب أعماق هطول الفترات دون اليومية إلى هطول 24 ساعة..... 1-41
الجدول 1-5: معامل مانتج للجريان الشرائحي. 1-46
الجدول 1-6: طرق تقدير الفيضان..... 1-49
الجدول 1-7: فترة التكرار التصميمية. 1-50
الجدول 1-8: معامل تصحيح الطريقة المنطقية وعلاقته بالفترة التكرارية. 1-51
الجدول 1-9: معامل الجريان وعلاقته بطبيعة وخصائص سطح حوض الصرف للمناطق الحضرية. 1-52
الجدول 1-10: معاملات الجريان (C) النمطية للمناطق الريفية..... 1-53
الجدول 1-11: رقم منحنى الجريان للمناطق الحضرية (URBAN AREAS)..... 1-60
الجدول 1-12: رقم منحنى الجريان للمناطق المزروعة..... 1-62
الجدول 1-13: رقم منحنى الجريان لمناطق المراعي والغابات..... 1-64
الجدول 1-14: رقم منحنى الجريان للمناطق الجافة وشبه الجافة. 1-65
الجدول 1-15: قيم الثوابت المختلفة بالمعادلة (-2) لعاصفة (SCS TYPE II)..... 1-66
الجدول 1-16: معامل التصحيح للجريان السطحي (F) نتيجة وجود برك التجميع والمستنقعات..... 1-66
الجدول 1-17: معادلات الانحدار لمقادير الفيضان. 1-70

القسم الثاني: تصميم العبارات

الجدول 1-1: العوامل المؤثرة في تصميم العبارات..... 1-90
الجدول 2-1: فترة المعاودة لتصميم العبارة حسب صنف الطريق..... 1-95
الجدول 2-2: القيمة (N) لمانينغ لقنوات المجاري الطبيعية الصغيرة. عرض السطح في مرحلة الفيضان أقل من 30 مترًا. 1-100
الجدول 2-3: خلاصة البيانات المطلوبة لتصميم العبارات..... 1-108

القسم الثالث: تصميم الجسور

الجدول 2-1: السرعات القصوى المسموح بها عند موقع إنشاء الجسور. 1-176
الجدول 2-2: الخلوص الواجب توافره بين سطح الماء في الأمام وأدنى نقطة من الجسر (Freeboard)..... 1-178
الجدول 3-1: بيانات القطاعات الفرعية للقطاع رقم (1) أمام الجسر. 1-185
الجدول 3-2: متوسط قطر الحبيبات لأنواع التربة المختلفة. 1-197
الجدول 3-3: معامل التصحيح ( ) لأشكال مقدمات الدعامات الوسطية..... 1-202
الجدول 3-4: معامل التصحيح ( ) لانحراف زاوية دخول التدفق مع محور الدعامة الوسطى..... 1-204
الجدول 3-5: قيم معامل التصحيح ( )..... 1-205
الجدول 4-1: معاملات الاتزان المختلفة لأنواع الأكتاف المختلفة. 1-215
الجدول 4-2: بيانات القطاعات الفرعية للقطاع رقم (1) بالمثال رقم (1). 1-220

القسم الأول
هيدرولوجيا الطرق السريعة

2-1 المقدمـــة

يُعرّفُ علم الهيدرولوجيا بصفة عامة بأنه العلم الذي يبحث في الخصائص الطبيعية، ونشأة وحركة المياه في الجو، وعلى سطح الأرض، وفي القشرة الخارجية للأرض. وينصب اهتمام مصمم الطرق في الدراسات الهيدرولوجية على المياه التي تجري على سطح الأرض، وبشكل خاص ذلك الجزء الذي يعبر شرايين النقل في النهاية (تقاطعات الطرق مع المجاري المائية)، كما أنه يولى اهتمامًا ثانويًا بتوفير تصريف داخلي للطرق، والجزر الفاصلة، وتقاطعات الطرق.

ولقد قام علماء المياه بدراسة جريان الماء على الأرض لعدة عقود، واقتُرحت بعض النظريات المعقدة لوصف العملية. وللأسف فإن أغلب هذه المحاولات كانت ناجحة جزئيًا فقط، ليس بسبب تعقد العملية ومساهمة العديد من العوامل المتفاعلة فحسب، ولكن أيضًا بسبب الطبيعة العشوائية للمطر، وتأثير ذوبان الثلوج، والمصادر الأخرى للمياه. ولقد تناول علماء المياه بالدراسة معظم العناصر والمعاملات التي تؤثر في الجريان السطحي الماء، ولكن الوصف العملي الكامل لتأثير العديد من هذه العناصر والمعاملات يوجد في شكل صيغ تجريبية فقط، ويتطلب تحليلها النوعي بيانات حقلية عديدة، ومعاملات محددة بشكل تجريبي، وخبرة واسعة وحكمًا صائبًا. وعلى كل حال فإنه بتطبيق المبادئ والطرق الحديثة لعلم الهيدرولوجيا يمكن الحصول على حلول مقبولة عمليًا تُكوِّن الأسس التصميمة لمنشآت تصريف المياه في الطرق.

3-1 التعريفات

الاستقطاعات (Abstractions)

الأجزاء من المطر الكلي التي لا تساهم مباشرة في جريان المياه، ومنها المياه المعترضة بالنباتات، ماء المطر المخزن في المنخفضات، والماء الذي يدخل حوض تصريف الأمطار ويبقى ما بعد مدة العاصفة.

تربة رسوبية (Alluvial)

مادة ترابية أو صخرية تترسب عن طريق المياه الجارية.

التدفق السنوي الأقصى (Annual Maximum Discharge)

تدفق الذروة اللحظي الأقصى للمياه في خلال السنة.

تدفق الطفح (Bankful Discharge Rate)

التدفق عندما يملأ السيل مجراه بالكامل، ولا تفيض المياه إلا على ضفة المجرى فقط.

الجريان الأساسي (Base Flow)

تدفق المجرى المائي الناتج عن استنزاف مخزون المياه الجوفية.

السرعة الموجية (Celerity)

سرعة انتشار موجة الفيضان.

الحويَّة (Convolution)

عملية حسابية تستخدم لتحويل فائض المطر إلى جريان سطحي عن طريق هيدروغراف الوحدة كنموذج تحويل.

رقم المنحنى(Curve Number, CN)

المعامل الذي يمثل مجموع تأثيرات خصائص التربة والغطاء النباتي والظروف الهيدرولوجية والرطوبة السابقة للتربة على الجريان.

السرعة الحرجة (Critical Velocity)

السرعة التي ينتقل عندها الجريان في المجرى المائي من الجريان تحت الحرج إلى الجريان فوق الحرج أو العكس، وتتميز بعدد فراود مساوٍ للواحد الصحيح.

عمق الجريان السطحي (Depth of Runoff)

العمق المتوسط للمياه الجارية على كامل مسطح حوض تصريف الأمطار. ويتم حسابه بقسمة الحجم الكلي للجريان السطحي على المساحة الكلية لحوض تصريف الأمطار.

الفيضان التصميمي (Design Flood)

هيدروغراف افتراضي ناتج عن تحديد فائض المطر مع هيدروغراف الوحدة وغالبًا ما يرتبط الفيضان التصميمي بفترة عودة تكون في العادة هي فترة تكرار العاصفة التصميمية.

العاصفة التصميمية (Design Storm)

عاصفة افتراضية تستخدم في التصميم. وتمثل الحد التصميمي لشدة العاصفة الذي يتحمله منشأ التصريف.

الجريان السطحي المباشر (Direct Runoff)

الجريان الكلي للهيدروغراف مطروحًا منه الجريان الأساسي.

كثافة الشبكة المائية (Drainage Density)

معامل يعكس مدى كثافة مجاري المياه في حوض تصريف الأمطار، ويقاس كنسبة مجموع أطوال مجاري المياه في الحوض إلى المساحة الكلية للحوض.

احتمال التجاوز (Exceedance Probability)

احتمال مساواة أو تجاوز مقدار محدد للمتغير العشوائي (كمثال: التدفق السنوي الأقصى) في أي فترة زمنية معينة، في العادة سنة واحدة.

عدد فراود (Froude Number)

النسبة بين قوى القصور الذاتي في المياه الجارية إلى قوى الجاذبية، ويعبر عنه عادة بنسبة سرعة الجريان إلى جذر حاصل ضرب عجلة الجاذبية وبعد خطي ممثل (عادة عمق). ويستخدم عدد فراود في دراسة حركة المياه.

خط الانحدار الهيدروليكي (Hydraulic Grade Line)

الخط الذي يمثل مجموع ارتفاع الوضع (Elevation Head) وارتفاع الضغط (Pressure Head).

هيدروغراف (Hydrograph)

رسم يمثل التوزيع الزمني لتدفق المياه عند مقطع معين لمجرى مائي.

الدورة الهيدرولوجية (Hydrologic Cycle)

تمثيل للعمليات الفيزيائية التي تتحكم في توزيع وحركة المياه.

مخطط توزيع الأمطار (Hyetograph)

مخطط لبيان تغير شدة الأمطار مع الزمن.

طريقة الفيضان الدليل (Index Flood Method)

طريقة لتقدير تدفق الذروة عند موقع ما لاحتمال تجاوز محدد بحاصل ضرب تدفق الذروة المقدر عن طريق معادلات الانحدار لمنطقة ما في نسبة تمثل فيضان الدليل عند هذا الموقع المحدد.

هيدروغراف الوحدة (Unit Hydrograph)

الاستجابة الهيدرولوجية للحوض التجميعي للماء لوحدة عمق فائض المطر في فترة زمنية معينة.

هيدروغراف الوحدة اللحظي (Instantaneous Unit Hydrograph)

الاستجابة الهيدرولوجية للحوض التجميعي للماء لوحدة عمق فائض المطر في فترة زمنية متناهية الصغر.

شدة المطر (Rainfall Intensity)

معدل الهطول المطري لوحدة الزمن (مثال: ملليمتر/ساعة) عند لحظة معينة.

منحنيات الشدة-الدوام-التكرار (Intensity-Duration-Frequency (IDF) curves)

منحنيات تبين العلاقة بين شدة المطر وفترة الهطول وتكرار الحدوث أو التجاوز.

خط تساوي عمق المطر (Isohyet)

خط مرسوم على خريطة يمر بالنقاط ذات عمق المطر المتساوي لنفس المدة الزمنية.

فائض المطر (Rainfall Excess)

الجزء من المطر الذي يتسبب في الجريان المباشر، ويساوي عمق المطر الكلي ناقص الاستقطاعات والفواقد الأخرى.

وقت التركيز (Time of Concentration)

المدة المطلوبة، عادة بالدقائق، لأن يبلغ التدفق في نقطة معطاة على مخرج حوض تجميع مائي حدّه الأقصى. ويمثل الوقت اللازم لوصول الماء من أبعد نقطة في الحوض إلى النقطة المطلوبة.

4-1 الدورة الهيدرولوجية

يعدُّ الماء الذي يوجد في كل مكان على الأرض، أحد أكثر المواد الأساسية والمألوفة الحدوث. الماء هو المادة الوحيدة على الأرض التي توجد طبيعيًا في الأشكال الأساسية الثلاثة من المادة (صلبة، سائلة، وغازية). تتفاوت كمية الماء من مكان لآخر ومن وقت، لآخر. وعلى الرغم من أنه في أي لحظة معطاة، توجد الأغلبية الواسعة للمياه في محيطات العالم، هناك تبادل مستمر للماء من المحيطات إلى الجو إلى الأرض ثم العودة إلى المحيطات. هذا التبادل يدعى الدورة المائية أو الدورة الهيدرولوجية.

إن الدورة الهيدرولوجية هي وصف تحول الماء من طور إلى آخر وحركته من موضع إلى آخر. في هذا السياق، فإنها تمثل الدورة الوصفية الكاملة للماء على وقرب سطح الأرض. بدءًا بالرطوبة الجوية، يمكن للدورة الهيدرولوجية أن توصف كالتالي: عندما يكون الجو دافئًا، فإن الهواء الرطب يرتفع إلى المستوى الذي يحدث فيه التكثيف ثم الهطول على شكل مطر - برد - صقيع - أو تكوينات ثلجية تسقط بعد ذلك على حوض تصريف الأمطار. بعض الماء يتبخر عند سقوطه والباقي إما يصل إلى الأرض أو يُعترض بالبنايات أو الأشجار. وتصل المياه المتبقية إلى سطح الأرض أو إلى الأنهار والبحيرات والبرك والمحيطات.

يتبخر الماء الذي يصل إلى سطح الأرض أو يتسرب إلى منطقة الجذور (المنطقة التي تصل إليها جذور النباتات والأشجار)، أو يتدفق على السطح إلى البرك والمنخفضات في الأرض أو إلى الأخاديد والجداول. إن تأثير التسرب هو زيادة رطوبة التربة. وقدرة الحقل هي الرطوبة المحمولة بالتربة بعد كل التصريف العميق بالجاذبية. إذا كان محتوى الرطوبة نتيجة تسرب الماء أقل من قدرة الحقل للتربة، يعود الماء إلى الجو عن طريق التبخر من التربة وبالنتح من النباتات والأشجار، أما إذا كان محتوى الرطوبة أكبر من قدرة الحقل، يتخلل الماء الزائد نزولًا إلى الأسفل ليصبح مياهًا جوفية. إن جزء الهطول الذي يصل إلى البرك والمنخفضات يمكن أن يتبخر أو يتسرب، أما إذا ملأ المنخفضات فيبدأ الماء الفائض بالتدفق على سطح الأرض حتى يصل أخيرًا إلى طرق التصريف الطبيعية. ويدعى الماء المخزون داخل المنخفضات اختزان المنخفضات ولا يساهم في التدفق السطحي أو الجريان.

قبل أن يحدث التدفق السطحي والجريان في أنظمة التصريف الطبيعية أو الصناعية، يجب أن يصل مجرى التدفق إلى سعة خزنه. هذا الشكل من الخزن، ويسمى خزن الحجز، هو مؤقت لأن أغلب هذا الماء يواصل التصريف بعد أن يتوقف المطر. الهطول الذي يتسرب نازلًا يبقى في الدورة المائية أو الهيدرولوجية كارتشاح إلى المجاري المائية أو البحيرات، أو يعود إلى منطقة الجذور عن طريق الخاصية الشعرية، أو أنه يُضخ من الآبار ويتم تصريفه إما من خلال أنظمة الري، أو البالوعات، أو طرق تصريف أخرى. الماء الذي يصل المجاري المائية والأنهار قد يحتجز في خزانات المياه والبحيرات أو أنه يصل إلى المحيطات في النهاية. يتبخر الماء بشكل مستمر على طول هذا المسار عائدًا إلى الجو، وبهذا تتكرر الدورة المائية الهيدرولوجية.

5-1 دراسة هيدرولوجيا تقاطع الطرق السريعة مع المجاري المائية

مشاكل التصريف في هندسة الطرق ذات تنوع كبير، وتتضمن تصميم الأرصفة، الجسور، العبارات المائية، والسيفونات ومنشآت أخرى لتقاطعات القنوات التي تتفاوت من مجارٍ صغيرة إلى أنهار كبيرة. ويجب أن تكون هناك تصميمات مستقرة للقنوات المفتوحة وأنظمة تجميع ونقل وحجز مياه الأمطار لكلتا المنطقتين الحضرية والريفية. وغالبًا ما يكون ضروريًا تقييم تأثيرات الاستعمال المستقبلي للأراضي، والمنشآت المقترحة للتزويد بالمياه والسيطرة على الفيضانات، والتغييرات المتوقعة الأخرى على تصميم معبر الطريق. من الناحية الأخرى، تقع على المصمم أيضًا مسؤولية تقييم احتمالات الفيضان بشكل كافٍ والتأثيرات البيئية الممكنة لكل من الطريق ومعابر السيل المخطط لهما على الحوض التجميعي للأمطار.

1-5-1 عناصر من الدورة الهيدرولوجية وثيقة الصلة بمعابر السيول

في تصميم الطرق السريعة يكون الاهتمام الأساسي بجزء الجريان السطحي للدورة الهيدرولوجية. واعتمادًا على الظروف المحلية، فإن بعض العناصر الأخرى قد تكون مهمة. وعلى أي حال، فإن التبخر والنتح يمكن إهمالهما عمومًا. وعلى ذلك فإن الأجزاء الأربعة الأكثر أهمية من الدورة الهيدرولوجية بالنسبة لمصمم الطرق هي: الهطول، التسرب، الخزن، والجريان السطحي.

يعدُّ الهطول مهمًّا جدًّا لتطوير مخطط التوزيع الزمني للجريان (الهيدروغراف، Hydrograph) وخصوصًا في طرق هيدروغراف الوحدة الاصطناعي، وكذلك بعض صيغ تدفق الذروة، حيث إن تدفق الفيضان يُحدد جزئيًا من فائض المطر وهو الهطول الكلي مطروحًا منه مجموع التسرب والخزن.

كما هو موضح أعلاه، فإن التسرب هو ذلك الجزء من هطول المطر الذي يتخلل سطح الأرض ليصبح مياهًا جوفية أو يستعمل من قبل النباتات والأشجار ليعود إلى الجو عن طريق النتح. وبعض التسرب قد يجد طريقه عائدًا إلى نظام الروافد كمياهٍ سطحية تنتقل ببطء قرب سطح الأرض أو تسيل كمياه جوفية، لكن هذه الكمية صغيرة عمومًا.

الخزن هو الماء المتجمع على سطح الأرض في البرك ومناطق أخرى غير منتظمة (خزن المنخفضات)، وكذلك الماء المخزون بكميات أكبر بكثير في أغلب الأحيان في المنشآت الصناعية (خزن الحجز). الجريان السطحي هو الماء الذي يتدفق على سطح الأرض إلى نظام روافد الأحواض المائية وفي النهاية إلى مجرى الماء الأساسي.

وتتمثل مهمة المصمم في أن يحدد الكمية والتوزيع الزمني المناظر للجريان السطحي عند معبر سيل الطريق

السريع، آخذًا في الحسبان كل العوامل الوثيقة الصلة من الدورة الهيدرولوجية. في أكثر الحالات يكون من الضروري عمل تقريبًات لهذه العوامل. وفي بعض الحالات يمكن تحديد قيم الخزن والتسرب بدرجة ثقة عالية، بينما في حالات أخرى قد يزداد عدم اليقين، وقد لا تعطى أهمية لإحدى هذه الفواقد في التحليل النهائي. والدراسة الشاملة لأي حالة معطاة ضرورية للسماح بالفرضيات، وغالبًا ما تسمح الخبرة المكتسبة أو النصيحة المؤهلة بإيجاد حلول لحالات فريدة أكثر تعقيدًا، قد تظهر في تصميم معبر سيول معين.

2-4-1 نظرة عامة على الدراسات الهيدرولوجية لمعابر السيول

في العديد من التحليلات الهيدرولوجية تكون العناصر الأساسية الثلاثة هي:

- القياس، التسجيل، التجميع، ونشر البيانات.
- تفسير وتحليل البيانات.
- التطبيق في التصميم أو مشكلات عملية أخرى.

ولا يختلف إجراء الدراسة الهيدرولوجية لتقاطع مجرى سيل مع طريق عن ذلك. ويجب إنجاز كل من هذه المهام، على الأقل جزئيًا، قبل أن يتم تصميم المنشأ الهيدروليكي الفعلي. أما العناصر الأساسية التي تهم المصمم فتعتمد على:

- الأهمية وتكلفة التركيب أو المخاطرة المقبولة لانهيار المنشأ.
- كمية البيانات المتوفرة للتحليل.
- المعلومات الإضافية والبيانات الملائمة.
- الدقة المطلوبة.
- قيود الوقت والموارد الأخرى.

هذه العوامل تقرر في المعتاد مستوى التحليلات اللازمة والمبررة لأي حالة تصميم معينة. وكما يؤكد المصممون الممارسون، فهم قد يواجهون مشاكل البيانات غير الكافية وكذلك محدودية الموارد (الوقت، القوى العاملة، والأموال). ومن غير العملي في التصميم الروتيني أن تستعمل طرق تحليلية تتطلب وقتًا طويلًا وقوى عاملة أو بيانات ليست متوفرة بسهولة أو يصعب الحصول عليها.

يجب الاحتفاظ بالطرق والتقنيات ذات المتطلبات الأكثر للمشاريع الخاصة، حيث ينتج تجميع البيانات الإضافية والدقة من الفوائد ما يعادل التكلفة الإضافية. وتتضمن أمثلة التقنيات التي تتطلب فترات طويلة من الوقت وكميات كبيرة من البيانات، نماذج المحاكاة الحاسوبية على مستوى الأحواض ونماذج الجريان السطحي لمياه الأمطار.

هناك، على أي حال عدد من الطرق الأسهل، ولكنها بالمثل سليمة ومثبتة للتحليل الهيدرولوجي لبعض مشكلات التصميم الاعتيادية. هذه الطرق تمُكّن من تحديد تدفق الذروة وشكل الهيدروغراف دون الاستهلاك المفرط للوقت، وتستعمل البيانات المتوفرة، أو في حالة غياب البيانات فإنه يتم اصطناع طرق لاستنتاج المعاملات التصميمية. وبشيء من الاهتمام - وغالبًا ببعض البيانات الإضافية المحدودة فقط - فإن هذه الإجراءات نفسها يمكن أن تستعمل لإجراء الدراسات الهيدرولوجية لأكثر المشاريع تعقيدًا أو تكلفة.

إن اختيار طريقة تحليلية هو قرار يجب اتخاذه لكل مشكلة تظهر. ولكي يكون هذا القرار مدروسًا، فعلى المصمم

أن يعلم ما مستوى التحليلات المبرر، ما البيانات المتوفرة أو التي يجب جمعها، وما طرق التحليل المتوفرة بالإضافة إلى مواضع قوتها النسبية وضعفها من ناحية التكلفة والدقة.

يتطلب التحليل الهيدرولوجي لمعبر سيل الطريق تحديد أي من تدفق الذروة أو الهيدروغراف للفيضان. إن تدفق الذروة (أحيانًا يسمى التصريف اللحظي الأقصى) لذو أهمية كبيرة؛ لأن أكثر معابر سيل الطرق تصمم عادة لتمرير كمية معينة من الماء بمستوى مقبول من الخطر. هذه الطاقة الاستيعابية تحدد عادة من خلال معدل تدفق الذروة أثناء مرور الفيضان، والذي يسمى تصريف الذروة أو تدفق الذروة. ويكون مرتبطًا بهذا التدفق شدة فيضان معينة، وتحدد بناءً على التردد المتوقع للحدوث (فيضان ١٠ سنوات، فيضان ٥٠ سنة، ... إلخ).

عمومًا، فإن مهمة مصمم الطرق السريعة تتمثل في تحديد تدفق الذروة لمجال من ترددات الفيضان في موقع ما في حوض التصريف. ومن ثم تصمم العبارات والجسور أو أي منشآت أخرى بأبعاد مناسبة لعبور تدفق الذروة التصميمي في حدود القيود الأخرى المفروضة على التصميم. وإذا كان بالإمكان، فإنه يتم تقدير تصريف الذروة الذي يتسبب في بدء غمر الطريق السريع، ويستعمل هذا التصريف لتقييم الخطر المقترن بمعبر السيل.

إن إعداد الهيدروغراف لهو أمر مهم عندما يطلب وصفًا مفصلًا للتغير الزمني لمعدلات التصريف. على نحو مماثل، التمدن والتخزين والتغيرات الأخرى تؤثر في تدفق الفيضان من عدة أوجه. فمدة الانتقال، وقت التركيز، مدة التدفق، تدفق الذروة، وحجم التصريف قد تتغير بكميات هائلة. إن هيدروغراف الفيضان هو الطريقة الأساسية لتقييم وتقدير هذه التغيرات. أضف إلى ذلك أنه عندما تتجمع التدفقات وتوجه إلى نقطة أخرى على طول مجرى السيل، فإن الهيدروغراف يكون ضروريًا.

لا يمثل تدفق الذروة ولا الهيدروغراف أي صعوبات حسابية حقيقية، شريطة أن تتوفر البيانات لتحديدها. والمشكلة التي قد تواجه مصمم الطريق هي أن بيانات التدفق غير كافية، أو في أغلب الأحيان لا توجد بيانات في موقع معبر السيل الذي يجب أن يصمم. على الرغم من أن البيانات التي تصف الطوبوغرافيا والخصائص الفيزيائية للحوض سهلة المنال، فإنه نادرًا ما يكون هناك وقت كافٍ لجمع بيانات التدفق الضرورية لتقييم تدفق الذروة والهيدروغراف. في هذه الحالة، يجب على المصمم أن يلجأ إلى الطرق الاصطناعية لتحديد معاملات التصميم. هذه الطرق تتطلب تقديرًا وفهمًا أكبر بكثير لكي يتم تقييم تطبيقها وموثوقيتها.

أخيرًا، يجب أن يكون المصمم يقظًا على الدوام للظروف المتغيرة أو التغيرات المحتملة في الحوض التجميعي للماء. وهذا مهم بشكل خاص عند مراجعة بيانات تدفق السيل المسجلة لحوض مائي شهد تطورًا حضريًا وتحديدًا لقنوات الصرف وتحويلات في المسار وتحسينات أخرى للتصريف. وعلى نحو مماثل فإن بناء خزانات المياه، منشآت تنظيم التدفق، برك شرب الماشية، ووسائل التخزين الأخرى في الحوض قد تنعكس على بيانات تدفق السيل. يجب أن يتم تحليل العوامل الأخرى مثل التغير في صفر المقياس، تغيير مكان المقياس، أو وجود فيضانات مختلطة (سببها المطر وذوبان الثلوج أو مطر وأعاصير) بعناية لتفادي أي تفسير خاطئ أو استنتاجات غير صحيحة.

2-5-1 التحويلات وبناء السدود

يحتاج مصمم الطرق السريعة إلى أن يكون مدركًا لإنشاء أو التخطيط لإنشاء تحويلات أو سدود على الحوض التجميعي للماء؛ لأن هذه الأعمال ستؤثر بشكل كبير في كمية وخصائص التدفقات التي تصل إلى معبر السيل. وعلى المصمم أن يتأكد من اطلاعه على المشاريع المقترحة تحت الدراسة من قبل وكالات الموارد المائية المختلفة النشطة في منطقته من البلاد. ويجب أن تستطلع آراء الوكالات المحلية مثل مرافق الطاقة، هيئات الري، وشركات إمداد المياه كلما تم تصميم منشأ من منشآت تصريف الطرق الكبرى. ويمكن استعمال طرق تتبع السيل داخل الخزانات والقنوات لتقييم تأثيرات هذه المشاريع في تصريف الطريق.

3-5-1 الكوارث الطبيعية

تعدُّ الطرق السريعة منشآت دائمة. وعلى الرغم أنه من الناحية الاقتصادية قلّما يكون عمليًّا تصميم منشآت تصريف الطرق لاستيعاب التدفقات النادرة جدًّا دون عوائق، فإن حدوث مثل هذه الأمور يجب ألا يتم إهماله. ولقد تبنت العديد من إدارات الطرق سياسات تتطلب أن تصمم منشآت تصريف السيول لفترة تكرار معينة، ولكنها تختبر لفترة تكرار أعلى (في أغلب الأحيان 100 سنة، أو الفيضان الغامر، أو أعلى فيضان مسجل. وكلما زاد العمر التصميمي للمنشأ، زاد احتمال تعرضه إلى تدفق أعظم من التدفق التصميمي. هذا الخطر يمكن أن يحدد استنادًا إلى قوانين الاحتمالات.

تدقيق التأثيرات لحدث نادر هو من طرق تركيز انتباه المصمم على هذه السمة من التصميم. على أي حال، يجب تقييم عوامل أخرى غير التدفق مثل حدوث الزلازل وتحطم السدود وأحداث أخرى غير محتملة لكنها ممكنة الحدوث. يحتاج المصمم إلى تقدير قابلية التأثر لموقع ما فيما يتعلق بتأثيرات هذه الأحداث ويفكر في مخارج ثانوية للتدفق. من الصعب جدًّا تخصيص فترة تكرار لمثل هذه الكوارث الطبيعية، لكنه من الضروري تقييم تأثيراتها. بعد أن تحدث أي كارثة طبيعية، يمكن أن تجرى دارسات مفصلة عن التأثيرات وتجهز تقارير بحيث يمكن أن تعمل كدليل للمصمم.

5-1 المطر وعمليات التدفق

1-5-1 الهطول

الهطول هو الماء الذي يسقط من الجو إما في شكل سائل أو صلب، وينتج من تكثيف الرطوبة في الجو بسبب تبريد كتلة الهواء. إن السبب الأكثر شيوعًا من التبريد هو الرفع الديناميكي أو الرفع الكظوم (Adiabatic) للهواء. وذلك يعني أن قدرًا من الهواء المحتوي على الرطوبة يجبر على الارتفاع ومن ثم التبريد الناتج والتكثيف المحتمل للقطيرات الصغيرة جدًّا في الغيمة. إذا تجمعت هذه القطيرات وأصبحت بحجم كافٍ للتغلب على مقاومة الهواء، ينتج الهطول في شكل ما.

1-1-5-1 أشكال الهطول

يحدث الهطول في أشكال متعددة. المطر هو هطول في الحالة السائلة عندما يصل إلى الأرض. الثلج هو ماء متجمد في حالة بلورية، بينما البرد ماء متجمد في حالة مصمتة. المطر الثلجي هو ثلج مذاب أي تمازج للمطر والثلج. بالطبع، لا يمكن أن يصبح الهطول الذي يقع على الأرض في الحالة المتجمدة جزءًا من عملية التدفق حتى يحدث الذوبان.

2-1-5-1 نواع الهطول (حسب المنشأ)

يمكن أن يصنف الهطول بأصل حركة الرفع الذي يسبب الهطول. كل نوع يتميز بنظم مطر مكانية وزمانية مختلفة. إن الأنواع الرئيسة الثلاثة من العواصف تصنف كعواصف حملية، عواصف جبلية، وعواصف إعصارية. غالبًا ما يضاف نوع رابع من العواصف وهو الإعصار أو الإعصار المداري، على الرغم من أنه حالة خاصة من العاصفة الإعصارية.

3-1-5-1 خصائص أحداث المطر

إن خصائص الهطول التي تهم تصريف الطرق هي شدة المطر، المدة، توزيع وقت المطر، شكل العاصفة، الحجم، الحركة والتردد. تعرّف الشدة بأنها المعدل الزمني لعمق الهطول وتعطى عادة بوحدات المليمتر في الساعة. تقاس جميع الهطولات بالعمق الرأسي للماء (أو مكافئ ماء في حالة الثلج) الذي يجمع على سطح مستوٍ إذا بقي كل المطر حيث يسقط. وابتكرت تشكيلة من مقاييس المطر لقياس مقدار الهطول. تستعمل كل محطات الأرصاد الجوية الرتبة الأولى من المقاييس التي تنتج سجلات مستمرة تقريبًا من المطر المتراكم مع الزمن. هذه البيانات تمثل نموذجيًّا إما في شكل مجدول أو كمنحنيات سقوط ككمية تراكمية.

إن موقع العاصفة المتمركزة في حوض التصريف يؤثر أيضًا في التوزيع الزمني للتدفق السطحي. ووجود عاصفة قرب مخرج الحوض التجميعي للماء سيؤدي إلى أن يحدث تدفق الذروة بسرعة كبيرة ومرور سريع من الفيضان. إذا حدثت العاصفة نفسها في جزء بعيد من الحوض، فإن التدفق في المخرج بسبب العاصفة سيكون أطول وتدفق الذروة أخفض بسبب الخزن في الحوض. حركة العاصفة لها تأثير مماثل في توزيع التدفق، خصوصًا إذا كان الحوض طويلًا وضيقًا.

التردد أيضًا خاصية مهمة لأنه يؤسس هيكل الإسناد حول كم هو احتمال حدوث هطول بخصائص معطاة. من ناحية تصميم الطرق السريعة، يوجد قلق أساسي حول تردد حدوث التدفق السطحي، وبشكل خاص، تردد تدفق الذروة. بينما يُحذَّر المصمم من افتراض أن عاصفة بتردد معين تنتج دائمًا فيضانًا بالترددنفسه.

ولا يمكن توصيف الهطول بسهولة على الرغم من أن هناك العديد من المحاولات لذلك. مصادر البيانات والإشارات متوفرة بحيث إنها تزود بمعلومات عامة عن خصائص الهطول في مواقع جغرافية محددة. من المهم، فهم الطبيعة المتغيرة وغير المنتظمة للهطول. فعلى مصمم الطرق الاطلاع على الأنواع المختلفة للعواصف وخصائص الهطول العائدة أصلًا إلى مناطق اهتمامه. ويجب أيضًا أن يفهم التغيرات الموسمية السائدة في العديد من المناطق، إضافة إلى أنه من المفيد جدًّا دراسة التقارير التي أُعدت عن العواصف والفيضانات التاريخية في منطقة ما. مثل هذه التقارير يمكن أن توفر معلومات عن العواصف السابقة والعواقب التي ربما وجدت على منشآت التصريف.

2-5-1 الفواقد الهيدرولوجية

المسمى الإجمالي المعطى للعمليات المختلفة التي تعمل على استهلاك الماء من الهطول الساقط قبل أن يترك الحوض التجميعي للماء كتدفق هو «الفواقد». هذه العمليات تشمل البخر، النتح، التسرب، خزن المنخفضات، وخزن الحجز. إن الفواقد الأكثر أهمية في تحديد التدفق السطحي نتيجة لهطول معين هي النتح، التسرب، خزن المنخفضات، وخزن الحجز.

1-2-5-1 البخر

البخر هو العملية التي يتحول فيها الماء من المسطحات المائية والأرض إلى بخار الماء ويعود إلى الجو. يحدث ذلك بشكل مستمر حيثما كان الهواء غير مشبع ودرجات الحرارة عالية بما فيه الكفاية. ويلعب البخر دورًا أساسيًّا في تحديد التوازن طويل المدى للماء في الحوض التجميعي للماء. على أي حال، يكون البخر عادة غير ذي قيمة في الأحواض الصغيرة لعاصفة وحيدة، ويمكن أن يسقط من الحسبان عند حساب التدفق الناتج من حدث مطري معين.

2-2-5-1 النتح

النتح هو فقد الماء من الحوض التجميعي للماء بواسطة العمليات الحيوية المقترنة بنمو النباتات، إذ تسحب النباتات الخضراء الماء من الأرض عن طريق الجذور وتنتح بخار الماء إلى الهواء من خلال أوراقها. كما هو الحال مع البخر، هذا الاستخلاص مهم فقط عندما تستغرق العاصفة فترة زمنية طويلة، وله تأثير أقل ما يمكن في التدفق الناجم من حدوث عاصفة وحيدة للحوض التجميعي للماء.

3-2-5-1 الاعتراض

الاعتراض هو فقد الماء الذي يبلل ويلتصق بأشياء فوق سطح الأرض مثل البنايات، الأشجار، والنباتات. هذا الماء يُفقد بعد ذلك من السطح من خلال البخر. الاعتراض يمكن أن يصل إلى ارتفاع 2.0 ملليمتر أثناء حدث مطري وحيد، لكنه عادة يكون في حدود 0.5 ملليمتر. عادة لا تكون كمية الماء المفقودة خلال الاعتراض مهمة لعاصفة معزولة، لكن عندما تضاف إلى بعضها خلال فترة زمنية طويلة فقد تكون مهمة.

4-2-5-1 التسرب

التسرب هو تدفق الماء إلى داخل الأرض بالتخلل خلال سطح الأرض. إن عملية التسرب هي عملية معقدة وتعتمد على العديد من العوامل مثل نوع التربة، الغطاء النباتي، ظروف الرطوبة السابقة أو المدة المنصرمة منذ حدث الهطول الأخير، شدة المطر، ودرجة الحرارة. التسرب عادة هو الفاقد الأكثر أهمية والوحيد في تقدير استجابة الحوض التجميعي لحدث مطري معين. على الرغم من أهميته، ليس هناك نموذج تم تطويره يكون مقبولًا على نطاق واسع لتوقع معدلات التسرب أو حجوم التسرب الكلية بدقة لحوض تجميع مائي معين.

5-2-5-1 خزن المنخفضات

خزن المنخفضات هو التعبير الذي يطلق على الماء المفقود؛ لأنه يصبح محصورًا في منخفضات صغيرة عديدة والتي هي خاصية لأي سطح طبيعي. عندما يتجمع الماء بشكل مؤقت في نقطة منخفضة دون إمكانية للهروب كجريان سطحي، هذا التجميع يشار إليه بخزن المنخفضات. كمية الماء المفقودة بسبب خزن المنخفضات يتفاوت كثيرًا طبقًا لاستخدامات الأراضي. السطح الممهد سوف لا يحجز نفس القدر من الماء كحقل تم تحديده مؤخرًا. وتعتمد الأهمية النسبية لخزن المنخفضات في تشكيل التدفق من عاصفة ما على شدة الهطول في العاصفة. وتتراوح القيم النموذجية لخزن المنخفض من ١ إلى 8 ملليمترات، وقد تصل بعض القيم إلى ١٥ ملليمترًا لكل حدث. وكما هو الحال مع البخر والرشح، فإن خزن المنخفضات عمومًا لا يحسب مباشرة في تصميم الطرق.

6-2-5-1 خزن الاحتجاز

خزن الاحتجاز هو الماء المخزن بشكل مؤقت في عمق الماء الضروري لحدوث جريان سطحي. حجم الماء المتحرك على الأرض يشكل خزن الاحتجاز. وتعتمد كمية الماء المختزنة على عدد من العوامل مثل استعمال الأرض، الغطاء النباتي، الانحدار، شدة المطر. وتتراوح القيم النموذجية لاختزان الاحتجاز من 2 إلى ١٠ ملليمترات، لكن قيمًا تصل إلى 50 ملليمترًا تم رصدها.

3-5-1 خصائص الجريان السطحي

الماء الذي لم يستقطع من الهطول يترك الحوض التجميعي للماء كجريان سطحي. بينما يحدث الجريان السطحي على عدة مراحل، التدفق الذي يصير إلى القنوات هو الحسبان الرئيس في تصميم معابر السيول للطرق السريعة، حيث إنه يؤثر في أبعاد منشأ التصريف. إن معدل التدفق أو التصريف في لحظة ما، بمصطلح الحجم لكل وحدة زمن، يدعى التصرف ويقاس عادة بالأمتار المكعبة في الثانية (م3/ث). وهذه هي بعض خصائص التصرف المهمة بالنسبة لتصميم منشآت التصريف: (١) تدفق الذروة أو معدل تصرف الذروة؛ (٢) تغير التدفق مع الوقت (الهيدروغراف)؛ (3) العلاقة بين التدفق ومنسوب المياه؛ (4) الحجم الكلي للتدفق؛ (5) التردد الذي يحتمل به أن تساوي أو تتجاوز التدفقات مقادير محددة (احتمال التجاوز).

1-3-5-1 تدفق الذروة

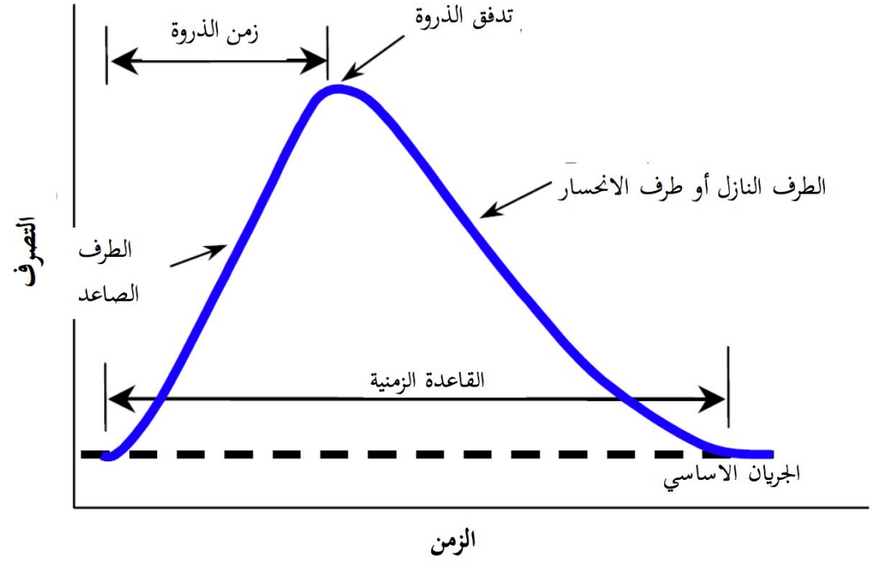
تدفق الذروة، وغالبًا ما يسمى تصرف الذروة، هو المعدل الأقصى لتدفق يجتاز نقطة ما أثناء أو بعد حدث مطري. يهتم مصممو الطرق بتدفق الذروة للعواصف في منطقة ما؛ لأنه هو التدفق الذي يجب أن تصمم عليه أبعاد منشآت التصريف. بالطبع، يتفاوت تدفق الذروة لكل عاصفة مختلفة، وهو يصبح مسؤولية المصمم لحساب أبعاد المنشأ المناظرة للعاصفة التي تمثل خطرًا مقبولًا في وضع معين. يمكن أن تتأثر معدلات تدفق الذروة بالعديد من العوامل في حوض تجميع المياه، متضمنة الهطول المطري، حجم الحوض، وخواص الحوض الطبيعية ـ الجغرافية.

2-3-5-1 التغير مع الزمن (الهيدروغراف)

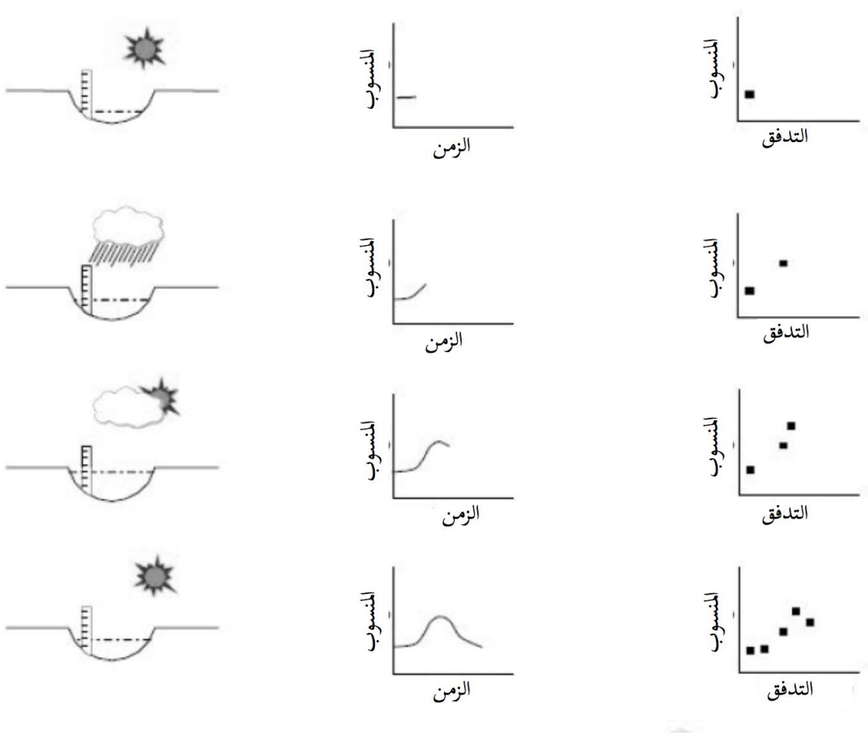
يتفاوت معدل التدفق في مجرىً ما من وقت لآخر، خصوصًا أثناء العواصف المطرية واستجابة لها. فعندما يسقط المطر وتتحرك المياه خلال الحوض التجميعي للماء، فإن مستويات المياه في المجاري المائية ترتفع، وقد يستمر ذلك (تبعًا لموقع العاصفة وخصائص الحوض التجميعي للماء) بعد أن يتوقف الهطول. إن استجابة مجرىً متأثر بعاصفة معينة خلال الزمن يتمثل في هيدروغراف الفيضان، وهذه الاستجابة يمكن أن تمثل بتغير التدفق في المجرى المائي مع الزمن. إن السمات الأساسية لهيدروغراف نموذجي مبينة في الشكل 1-1 وتتضمن الأطراف الصاعدة والنازلة، تدفق الذروة، الزمن اللازم لبلوغ الذروة، الجريان الأساسي، والقاعدة الزمنية للهيدروغراف. هناك عدة نماذج من الهيدروغراف، مثل التدفق لوحدة المساحة وهيدروغرافات منسوب المياه، لكن كلها تبين التغير النمطي نفسه مع الزمن.

3-3-5-1 علاقات المنسوب مع التدفق

إن منسوب الماء في نهر ما يقاس بارتفاع سطح الماء فوق مستوى اعتباري معين. المستوى يمكن أن يكون سطح البحر، لكن يمكن أيضًا أن يؤخذ أدنى بقليل من نقطة تدفق الصفر في المجرى المائي. إن منسوب الماء في نهر ما عند نقطة معينة يرتبط مباشرة بالتدفق الذي هو كمية الماء المارة عند النقطة نفسها في وحدة الزمن، الشكل 1-1. عندما يزداد التدفق، فإن المنسوب يرتفع، وعندما ينقص التدفق فإن المنسوب ينخفض. وبصفة عامة فإن التدفق عند نقطة معينة يرتبط مع المنسوب بعلاقات تستنتج معاملاتها باستخدام مجموعة تقنيات وآلات قياس للحصول على قياسات حقلية لها، وكذلك للمعاملات الأخرى المرتبطة بها.



الشكل 1-1: عناصر مخطط تغير الفيضان مع الزمن (هيدروغراف).



الشكل 1-2: العلاقة بين التدفق والمنسوب

1-5-4 الحجم الكلي

إن الحجم الكلي للتدفق من فيضان معين له أهمية أساسية في تصميم وسائل الخزن وأعمال السيطرة على الفيضانات. وفي العادة، فإن حجم الفيضان ليس ذا اعتبار في تصميم منشآت تصريف الطرق. على أي حال، يستعمل حجم الفيضان في التحليلات المختلفة لعناصر التصميم الأخرى. يحدد حجم الفيضان بسهولة كبيرة بحساب المساحة تحت هيدروغراف الفيضان، الشكل 1-1، ويقاس عمومًا بوحدات الأمتار المكعبة. ويحسب العمق المكافئ للمطر الصافي على حوض مائي بتقسيم حجم الفيضان على مساحة الحوض المائي.

1-5-5 التردد

إن تردد التجاوز هو عدد المرات النسبي التي يتوقع فيها حدوث فيضان معين في المعدل خلال فترة زمنية طويلة. ويعبر عنه عادة كعدد نسبي أو نسبة مئوية. طبقًا للتعريف، التردد هو مفهوم احتمالي، وهو احتمال حدوث فيضان بمقدار معين أو أكبر منه في فترة زمنية محددة، وهي عادة سنة واحدة. تردد التجاوز هو معامل تصميمي مهم من حيث إنه يحدد مستوى الخطر المقبول أثناء فترة محددة لتصميم منشأ تصريف الطرق.

1-5-6 فترة العودة

فترة العودة هو تعبير يستعمل عمومًا في الدراسات الهيدرولوجية. وهي متوسط الوقت بين مرات حدوث عواصف أو فيضانات تتخطى قدرًا معينًا. إن احتمال التجاوز P وفترة العودة T مرتبطان بالعلاقة:

$$T=1/P \quad (1-1)$$

على سبيل المثال، فإن فيضانًا باحتمال تجاوز 0.01 في أي سنة واحدة له فترة عودة = 1/0.01 = 100 سنه، ويشار إليه بفيضان 100 سنة.

إن استعمال تعبير فترة العودة لا ينصح به أحيانًا لأن بعض الناس يفسرونه بمعني أن هناك T سنة بالضبط بين مرات حدوث هذا الفيضان. ولكن في الحقيقة فإن فيضانين اثنين من فئة 100 سنة يمكن أن يحدثا في سنتين متعاقبتين أو قد يحدثان بفاصل 2·0 سنة، إذ إن فترة العودة هي فقط العدد المتوسط الطويل المدى للسنوات بين مرات الحدوث.

1-5-4 تأثير خصاص الحوض على التدفق

تحدد التغيرات المكانية والزمانية للمطر والتغيرات المتزامنة لعمليات الاستقطاع المختلفة، خصائص التدفق الناتج عن عاصفة معينة، وهذه ليست العوامل الوحيدة ذات العلاقة على أي حال. وعندما تستوفى الاستقطاعات لمنطقة صغيرة من الحوض التجميعي للماء، فإن الماء يبدأ بالجريان على سطح الأرض، وفي نهاية المطاف إلى قناة تصريف طبيعية مثل أخدود أو مجرى وادٍ، وعند هذا الحد، فإن هيدروليكية قنوات التصريف الطبيعية يكون لها تأثير كبير في خصائص التدفق الكلي من الحوض التجميعي للماء.

وهناك عوامل عدة تحدد الخصائص الهيدروليكية لنظام التصريف الطبيعي، منها: مساحة حوض التصريف، الانحدار، الخشونة الهيدروليكية، الخزن الطبيعي وخزن القنوات، كثافة شبكة التصريف، طول القناة، ظروف الرطوبة السابقة، التمدن، وعدة عوامل أخرى. وتأثير كل واحد من هذه العوامل على الخصائص المهمة للتدفق يكون صعب التحديد في أغلب الأحيان. تناقش الفقرات التالية بعض العوامل التي تؤثر في السمات الهيدروليكية لنظام تصريف معين.

1-4-5-1 مساحة حوض التصريف

إن مساحة حوض التصريف هي أكثر السمات أهمية للحوض التجميعي للماء والتي تؤثر في معدل التدفق. كلما زادت مساحة الحوض زاد التدفق، الشكل (1-3-أ). وبغض النظر عن الطريقة المستخدمة لتقدير تدفقات الفيضان، فإن تدفق الذروة يرتبط مباشرة بمساحة حوض التصريف.

2-4-5-1 الانحدار

تميل الانحدارات الحادة إلى التسبب في استجابة سريعة من فائض المطر المحلي ومن ثم تدفق ذروة أعلى، الشكل (1-3-ب). يخرج التدفق بسرعة من الحوض التجميعي للماء؛ لذا فإن الهيدروغراف يكون قصيرًا مع ذروة عالية. إن علاقة المنسوب مع التدفق تعتمد بصورة كبيرة على الخصائص الموضعية للمقطع العرضي من قناة التصريف، وإذا كان الانحدار حادًا بما فيه الكفاية، فقد يسود تدفق فوق الحرج. ويتأثر الحجم الكلي للتدفق أيضًا بالانحدار، فإذا كان الانحدار منبسطًا جدًا فالمطر لن يخرج بسرعة، وبذلك يتوفر لعملية التسرب وقت أطول للتأثير سلبًا في كمية فائض المطر، وبذلك تزداد الاستقطاعات؛ ما يؤدي إلى تخفيض الحجم الكلي للمطر الذي يظهر مباشرة كتدفق.

الانحدار مهم جدًا في معرفة سرعة نقل قناة التصريف للماء، ومن ثم يؤثر في حساسية الحوض التجميعي تجاه أحداث هطول ذات فترات زمنية مختلفة. تنقل الأحواض ذات الانحدارات الحادة المطر القادم بسرعة، وإذا كان المطر حمليًا (متميزة بالشدة العالية والمدة القصيرة نسبيًا)، فإن الحوض التجميعي للماء سيستجيب بسرعة عالية بتدفق ذروة يحدث بعد بداية الهطول بفترة قصيرة. إذا حدثت العواصف الحملية بتردد معين، فإن التدفق الناتج يمكن أن يتوقع حدوثه بتردد مماثل. من ناحية أخرى، فإن استجابة الحوض التجميعي للماء ذي الانحدار المنبسط للعاصفة نفسها لن تكون بالسرعة ذاتها، واعتمادًا على عدد من العوامل الأخرى، فقد يكون تردد التدفق الناتج مغايرًا لتردد العاصفة.

3-4-5-1 الخشونة الهيدروليكية

الخشونة الهيدروليكية هي خليط من الخصائص الفيزيائية التي تؤثر في عمق وسرعة الماء الجاري عبر السطح، سواء بشكل طبيعي أو من خلال قناة. وتؤثر الخشونة الهيدروليكية في كل من الاستجابة الزمنية لقناة التصريف وخصائص اختزان القناة. الخشونة الهيدروليكية أيضًا لها تأثير واضح في خصائص التدفق الناتج من عاصفة معينة. ويتناسب عادة معدل تدفق الذروة عكسيًا مع الخشونة الهيدروليكية (أي كلما كانت الخشونة أقل، كان تدفق الذروة أعلى والعكس صحيح). تؤثر الخشونة في هيدروغراف التدفق بطريقة معاكسة للانحدار، فكلما كانت الخشونة أقل، كان الهيدروغراف أعلى ذروة وأقل زمنًا لعاصفة معينة، الشكل (1-3-ج).

وتعتمد علاقة المنسوب والتدفق عند مقطع ما من قناة تصريف أيضًا على الخشونة (بافتراض ظروف تدفق طبيعية وغياب التحكم الاصطناعي)، فالخشونة الأعلى تؤدي إلى منسوب أعلى لتدفق معين. إن الحجم الكلي للتدفق مستقل عمليًا عن الخشونة الهيدروليكية. ولكن توجد علاقة غير مباشرة في أن الخشونة الأعلى تبطئ استجابة الحوض

التجميعي للماء وتسمح لبعض عمليات الفواقد بوقت أطول للتأثير في حجم التدفق. والخشونة لها تأثير أيضًا في تردد التدفقات لبعض المقادير، وذلك بالتأثير في وقت استجابة الحوض التجميعي لأحداث هطول بترددات محددة.

4-4-5-1 الاختزان

من المعتاد أن يكون للحوض التجميعي للماء اختزان طبيعي أو صناعي مؤثر كثيرًا في الاستجابة لحدث هطولي معين. والخصائص المعتادة التي تساهم في الخزن ضمن الحوض التجميعي للماء هي البحيرات، المستنقعات، ضفاف الأنهار كثيفة النباتات، وجود عوائق طبيعية أو صناعية في قناة التصرف تسبب ماءً راكدًا في القناة، والخزن في السهول الفيضية للأنهار العريضة الكبيرة. يمكن أن يكون للخزن تأثير كبير في تخفيض معدل تدفق الذروة، على الرغم من أن هذا التخفيض ليس عامًا بالضرورة. فقد كانت هناك بعض الحالات يعيد فيها الخزن الاصطناعي توزيع التدفقات بشكل جذري مؤديًا إلى تدفقات ذروة أعلى من تلك التي كانت تحدث لو لم يكن الخزن موجودًا. كما هو مبين في الشكل (1-3-د)، يبسط الخزن عمومًا الهيدروغراف على وقت أطول، مؤخرًا الوقت إلى الذروة، ومغيرًا شكل الهيدروغراف الناتج من عاصفة معينة.

علاقة المنسوب والتدفق أيضًا يمكن أن تتأثر بالخزن ضمن الحوض التجميعي للماء. إذا كان قسم قناة التصريف أعلى موضع الخزن وضمن منطقة الركود، فإن المنسوب المناظر لتدفق معين سيكون أعلى منه فيما إذا كان الخزن غير موجود. وإذا كان القسم أسفل موضع الخزن، فإن علاقة المنسوب والتدفق قد تتأثر وقد لا تتأثر، وهذا يعتمد على وجود منشآت تحكم بالقناة.

ولا يتأثر الحجم الكلي للتدفق مباشرة بوجود الخزن، إذ إن الخزن يعيد توزيع الحجم على الوقت، لكنه لا يغير الحجم مباشرة. ولكن بإعادة التوزيع الزمني للتدفق، فإن الخزن قد يسمح لعمليات استقطاع أخرى بإنقاص حجم الجريان (كما هو الحال مع الانحدار والخشونة).

5-4-5-1 كثافة التصريف

يمكن أن تعرف كثافة التصريف بأنها النسبة بين عدد قنوات التصريف الواضحة التحديد ومساحة التصريف الكلية في حوض تجميع مائي معين. كثافة التصريف تفترض عادة مساوية للطول الكلي للمجاري المائية المتدفقة بشكل مستمر مقسومًا على مساحة التصريف. وتحدد كثافة التصريف عن طريق طوبوغرافيا وجغرافية الحوض المائي.

كثافة التصريف لها تأثير كبير في كلتا الاستجابتين المكانية والزمانية للحوض المائي لحدث هطولي معين. إذا كان الحوض التجميعي للماء مغطى بصورة كثيفة بنمط من قنوات التصريف المتصلة، وكان وقت الجريان السطحي قصيرًا نسبيًا، فإن الحوض التجميعي للماء سيستجيب بسرعة أكثر مما إذا صرف بقنوات تصريف غير كثيفة وكان وقت الجريان السطحي طويلًا نسبيًا. إن السرعة المتوسطة للتدفق هي أصغر عادة للتدفق البري منه لتدفق قناة طبيعية واضحة الحدود. كثافات التصريف العالية تكون مرتبطة بالاستجابة المتزايدة للحوض التجميعي للماء، ما يؤدي إلى تدفقات ذروة أعلى وهيدروغرافات أقصر لحدث هطولي معين، الشكل (1-3-هـ).

كثافة التصريف لها تأثير أقل ما يمكن في علاقة المنسوب والتدفق لقسم من قناة التصريف. وعلى أي حال فلها تأثير في الحجم الكلي للتدفق، حيث إن بعض عمليات الاستقطاع تتعلق مباشرة بفترة وجود الفائض المطري كتدفق بري؛ لذا فكلما قلت كثافة التصريف، قل حجم التدفق من حدث هطولي معين.

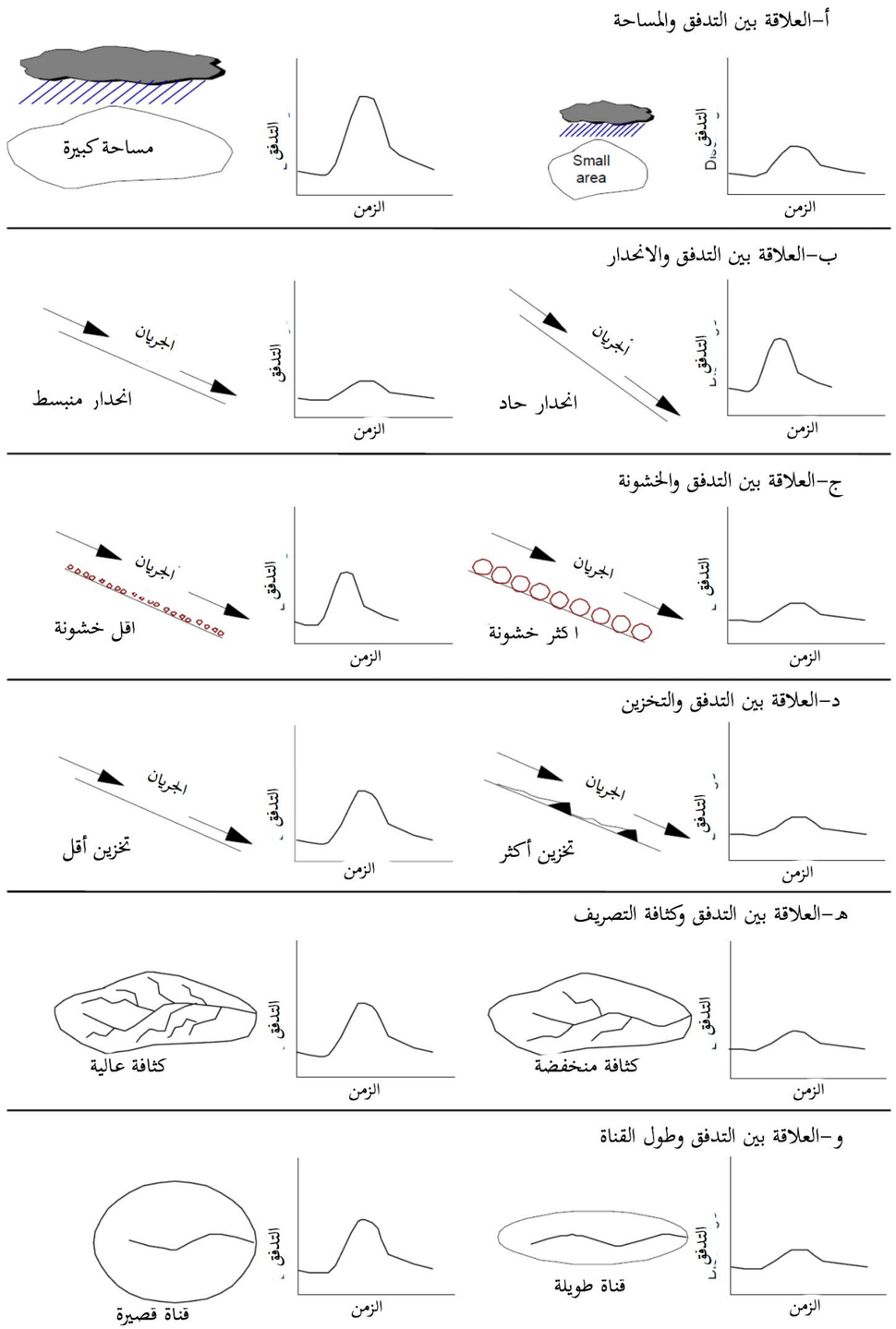
إن التغيرات في كثافة التصريف، مثل تحسينات القناة في أحواض التصريف المتمدنة يمكن أن تؤثر في تردد التدفقات بمقادير معينة. بالتأثير الكبير في استجابة حوض تجميعي مائي معين لأي هطول كمدخل، فإن كثافة التصريف تحدد جزئيًا تردد الاستجابة. كلما كانت كثافة التصريف أعلى، كانت استجابة التدفق الناتج وثيقة الصلة بالحدث الهطولي المناظر بدرجة أكبر.

6-4-5-1 طول القناة

إن طـول القنـاة هـو خاصيـة مهمـة للحـوض التجميعـي للـماء. كلـما كانـت القنـاة طويلـة، كان الوقـت الـذي يسـتغرقه المـاء لـكي ينتقـل مـن أعـالي الحـوض التجميعـي للـماء إلى المخـرج أطـول. ولذلـك، إذا كانـت كل العوامـل الأخـرى ثابتـة، فـإن اسـتجابة الحـوض التجميعـي للـماء مـع طـول أطـول للقنـاة عـادة تكـون أبطـأ لمدخـل هطـول معـين منـه لقنـاة أقـصر. وعندما يتحـرك الهيدروغـراف عـلى طـول القنـاة، فإنـه يضعـف ويتمـدد بمـرور الوقـت بسـبب تأثـيرات خـزن القنـاة والخشـونة الهيدروليكيـة. وكـما هـو مبـين في الشـكل (1-3-و) فالقنـوات الأطـول تـؤدي إلى تدفقـات ذروة أقـل وهيدروغرافـات ذات زمـن أطـول.

ويتأثـر تـردد التدفقـات المعينـة أيضًـا بطـول القنـاة. وكـما كان الحـال لكثافـة التصريـف، فـإن طـول القنـاة هـو عامـل مهـم في تقريـر وقـت اسـتجابة الحـوض التجميعـي للـماء لحـوادث هطـول بـتردد معـين. عـلى أي حـال، طـول القنـاة قـد لا يبقـى ثابتًـا للتدفقـات المختلفـة. في حالـة السـهول الفيضيـة العريضـة، حيـث القنـاة الرئيسـة متعرجـة بشـكل ملحـوظ، فليـس مـن المسـتبعد لتدفقـات الفيضـان الكبـيرة أن تفيـض عـلى الضفـاف وتتدفـق بشـكل أسـاسي في خـط مسـتقيم، مـن ثـم يقـل طـول القنـاة الفعـال.

إن علاقـة المنسـوب والتدفـق وكذلـك الحجـم الـكلي للتدفـق مسـتقل عمليًـا عـن طـول القنـاة، ولكـن الحجـم سـيعاد توزيعـه الزمنـي بشـكل مماثـل لحالـة الخـزن ولكـن أقـل وضوحًـا.



الشكل 1-3: تأثيرات خصائص الحوض على تغير التدفق مع الزمن

7-4-5-1 ظروف الرطوبة السابقة

كما ذكر سابقًا، فإن ظروف الرطوبة السابقة، التي هي ظروف رطوبة تربة الحوض التجميعي للماء في بداية العاصفة، تؤثر في حجم التدفق المولد من عاصفة معينة. حجم التدفق له علاقة مباشرة بمستوى الرطوبة السابقة. المحتوى الأقل لرطوبة التربة في بداية الهطول تعني تدفقًا أقل، وفي المقابل المحتوى الأكبر لرطوبة التربة يعني تدفقًا أعلى لعاصفة معينة.

8-4-5-1 التمدن

عندما يجتاز حوض تجميعي للمياه منطقة عمرانية، فإن تدفق الذروة يزداد عادة والهيدروغراف يصبح أقصر ويرتفع بسرعة أكبر. يحدث هذ في الغالب بسبب الكفاءة الهيدروليكية المحسنة للمنطقة العمرانية. وفي حالته الطبيعية، فإن الحوض التجميعي للماء سيكون قد طور نظامًا طبيعيًا من وسائل الصرف الذي يشمل الأخاديد، الجداول، البرك، والمستنقعات، إلخ، والكل في حالة توازن مع النباتات الموجودة طبيعيًا وخصائص الحوض التجميعي للماء الطبيعية. عندما تتطور منطقة ما، تحصل تغييرات نموذجية للحوض التجميعي للماء تتضمن: 1. إزالة المناطق النباتية الموجودة ويستبدل بها رصف كتيم أو بنايات؛ 2. تحسين مسالك المياه الطبيعية بتحديد القنوات، 3. تدعيم نظام التصريف الطبيعي بشبكات صرف الأمطار والقنوات المفتوحة. هذه التغييرات تميل إلى إنقاص كل من خزن المنخفضات، نسب التسرب، وزمن الجريان؛ ونتيجة لذلك تزداد تدفقات الذروة، ويقل الامتداد الزمني للهيدروغراف، ويرتفع الطرف الصاعد له بسرعة أكبر.

9-4-5-1 العوامل الأخرى

يمكن أن تكون هناك عوامل أخرى ضمن الحوض التجميعي للماء تقرر خصائص التدفق، ويتضمن ذلك امتداد ونوع النباتات، وجود تعديلات للقنوات، ومنشآت السيطرة على الفيضان. هذه العوامل تعدّل التدفق إما بتعزيز أو إبطال بعض خصائص الحوض المبينة أعلاه. من المهم إدراك أن كل العوامل التي نوقشت توجد معًا في الوقت نفسه ضمن حوض تجميعي مائي معين، وتأثيراتها المركبة من الصعوبة بمكان أن تنمذج أو تحدد.

6-1 البيانات الهيدرولوجية

1-6-1 الخرائط الطوبوغرافية

الخرائط ضرورية لأنها تبين كيف يتقاطع مسار الطريق السريع المقترح مع الأحواض المائية كل على حدة. ومعاملات أحواض الماء الأخرى مثل مساحة التصريف، تصنيفات التربة، والنباتات يجب أن يشار إليها أيضًا على الخرائط الطوبوغرافية. الجدول التالي رقم (1-1) يشير إلى مقياس الخريطة الذي يجب استعماله لكل مشروع.

الجدول رقم 1-0: مقياس الخرائط

أنواع الأحواض	المساحة	المقياس	خطوط المنسوب
ريفية متموجة وتضاريس منبسطة	أقل من 2500 هكتار	25000:1	كل 5 م*
ريفية جبلية	أقل من 2500 هكتار	25000:1	كل 10 م
ريفية متموجة وتضاريس منبسطة	أكثر من 2500 هكتار	50000:1	كل 10 م*
ريفية جبلية	أكثر من 2500 هكتار	50000:1	كل 20 م
تصميم بالوعات صرف المطر الحضرية	كل المساحات	2000:1	كل 0.5 م

*** الخارطة في المنطقة المجاورة لمشروع الطريق السريع يجب أن تظهر خطوط منسوب (كنتور) كل 1م.**

2-6-1 الصور الفوتوغرافية

تؤخذ الصور الفوتوغرافية (غير الجوية) أعلى وأسفل التقاطع على المجرى المائي لكل المعابر التي يتجاوز تدفقها التصميمي ٢٠ م3/ثانية. وكلما أمكن، فإن الصور الجوية للحوض التجميعي للماء أعلى التقاطع يجب أن تكون متضمنة أيضًا في التقرير الهيدرولوجي. هذه الصور يجب أن تكون بجودة كافية لتمكين المهندس من تقدير خصائص خشونة القناة الطبيعية وامتداد الغطاء النباتي، واستعمال الأرض. والصور، قديمة أو حديثة، التي تدعم أي بيانات هيدرولوجية، يجب أن تتضمن في التقرير. هذه الصور يمكن أن توضع في النص أو يشار إليها في النص وتجمع في نهاية التقرير.

3-6-1 استعمالات الأراضي

باستعمال الخرائط الطوبوغرافية والصور الفوتوغرافية المبينة أعلاه، يكون المهندس قادرًا على إبداء رأيه حول طبيعة استعمالات الأراضي في الحوض التجميعي للماء المتأثر. وعلى نحو مماثل، حول طبيعة النباتات وخصائص التربة للأحواض. يجب أن يشار إلى الأنواع المحددة من استعمالات الأراضي، أنواع النباتات، وتصنيفات التربة كنسب مئوية من مساحة الحوض. ويجب كذلك الإشارة إلى مدى التغيرات المتوقعة في أي من هذه الساحات.

4-6-1 استعمالات المياه

على المهندس التعليق حول استعمالات المياه ضمن أحواض التصريف المتأثرة. وإذا وجدت خزانات ضمن الحوض، فإجراءات تشغيل لهذه الخزنات يجب أن تعطى، ويشمل ذلك الأحجام وتواريخ التدفقات المتوقعة. ويجب أن يحتوي هذا القسم من التقرير أيضًا التعليقات على الاستعمالات المحلية أو تحويلات الوديان. كما يجب التعليق على التغيرات المتوقعة في استعمالات المياه أيضًا.

5-6-1 بيانات المطر

يجب أن يتم تضمين بيانات المطر ضمن منطقة الدراسة في التقرير. ويتعين أن تشمل البيانات وصفًا موجزًا، طول السجل، الدقة، والمصدر. ويمكن الحصول على البيانات عن طريق وزارة البيئة والمياه والزراعة أو الهيئة العامة للأرصاد وحماية البيئة.

6-6-1 بيانات محطات القياس

عندما يقطع الطريق السريع المقترح واديًا فعلى المهندس أن يدرج أي معلومات لمحطة قياس متوفرة تخص ذلك الحوض المائي. إذا لم تكن هذه البيانات متوفرة، فعليه أن يدرج بيانات محطة القياس من حوض مائيٍ مجاور. ويجب تضمين وصف قصير لبيانات محطة القياس إذا كانت هذه المعلومات متوفرة. يجب أن يتضمن هذا الوصف طول السجل، دقة البيانات، المصدر، وتواريخ الأحداث. تضع وزارة الزراعة والمياه محطات قياس في وديان كثيرة، وربما يكون لديها معلومات تتعلق بتدفقات فيضانات سابقة.

7-6-1 علامات الماء المرتفع

في أغلب الأحيان يمكن أن تستعمل علامات الماء المرتفع لتخمين تدفقات الذروة ضمن حوض ما. وحيثما أمكن فإن على المهندس أن يجهز تاريخًا موجزًا للفيضان. ويتضمن هذا البيان تواريخ حدوث الفيضان وعلامات الماء المرتفع. على المهندس أن يعلق أيضًا على طبيعة الفيضان ويدرج أي عوامل يمكن أن يكون لها تأثير في مستوى الماء. هذه العوامل قد تتضمن الماء المرتفع من الوديان الأخرى، إطلاقات من خزنات المياه، تأثيرات زمنية، أو عوامل التحكم الأخرى في القناة.

7-1 التحليل الهيدرولوجي

1-7-1 مساحة التصريف

هذه المعلومات تحدد عادة من الخرائط الطوبوغرافية المتوفرة. إن الفحص الحقلي لمساحة التصريف محبذ جدًّا، حيث إن الخرائط الطوبوغرافية في الكثير من الأوقات لا تكون محدثة. على الرغم من أن خرائط مناسيب بفواصل ٥ م أو ١٠ م قد تظهر العديد من المناطق كمساهمة في تدفق الحوض، فإنه قد يظهر الفحص الحقلي خصائص طبيعية أو صناعية، مثل المصاطب والسدات الزراعية، التي تعترض طريق التدفق من منطقة التصريف. وهذه قد تتضمن ردميات الطرق السريعة أو السكك الحديدية حيث إنها، مع العبارات المائية أو الجسور الملحقة، قد تعمل كمنشآت حجز للمياه. عندما تكون حدود المناطق المساهمة في التصريف قد تحددت، فيجب أن تخطط على خريطة قاعدة وتحسب المساحات. يتم هذا عمومًا باستعمال مقياس المساحة (البلانيميتر).

2-7-1 معاملات الحوض التجميعي للماء

يجب تحديد خصائص حوض التصريف في الحقل أو من الخرائط المتوفرة. إن قائمة المعاملات أدناه تعتمد على المعلومات المطلوبة بالنماذج المختلفة المستعملة في التحليل الهيدروليكي. بعض المعاملات ستدخل مباشرة إلى معادلة محددة، والأخرى قد تستعمل في مقارنة الحوض المائي بأحواض أخرى لاستعمالها في تحويل البيانات.

1-2-7-1 طول الحوض

عادة يمكن أن تكون هذه المعلومات مقاسة من مخطط طوبوغرافي متوفر. هذا المعامل مهم في أن طول قناة الوادي له تأثير مباشر في مدة الرحلة من أعالي منطقة التصريف إلى نقطة التصميم. مدة الرحلة الأقصر عادة تؤدي إلى تدفق أعلى. تميل مدة الرحلة الأطول إلى تخفيض التدفق في نقطة التصميم. هذا المعامل يساعد أيضًا على تعريف الشكل العام لحوض التصريف، الأحواض الطويلة الضيقة ستنتج تدفقات أخفض عمومًا من أحواض التصريف الأقصر والأكثر اكتنازًا. يؤثر تحسين الأرض في مدة الرحلة أيضًا. فإذا حدث التحسين، يجب الفحص الحقلي للحوض لتقدير التغيرات في طول الحوض أو مسافة الرحلة. هذا صحيح خصوصًا للأحواض الصغيرة. القنوات الصناعية التي ربما قد قاومت مجرىً متعرجًا لوادٍ تقلل الطول، بينما نمط الشوارع قد يتسبب في إطالة مسار التدفق لكي يكون أطول من المجرى المستقيم الطبيعي. هذه النشاطات أيضًا يجب تقصيها وتسجيلها.

2-2-7-1 انحدار الحوض

تقدر انحدارات الأحواض عادة من المخططات على خرائط طوبوغرافية أو تحدد بواسطة المسح الحقلي. هذا المعامل مهم في تلك الأحواض الحادة الانحدار التي تميل إلى التسبب في استجابة أسرع، بينما الأحواض المنبسطة تقلل من زمن الاستجابة. زمن الاستجابة الطويل سيميل إلى تقليل معدل التدفق بينما يميل وقت الاستجابة القصير إلى زيادة معدل التدفق.

3-2-7-1 نسبة الكتامة

هذا المعامل مهم في أنه يبين المنطقة التي سيحدث تحتها تسرب وتبخر/نتح طبيعيان من تلك التي لا يحدث فيها ذلك. يجب أن يتم فحص حقلي لحوض التصريف لتقدير نسبة الجزء غير المنفذ للماء إلى مساحة التصريف الكلية. الطريقة الأكثر موثوقية لحساب نسبة الكتامة هي أن تقاس المناطق الكتيمة من صور جوية. يمكن تقسيم مساحة حضرية عادة إلى مناطق نموذجية، لكل منها خصائص مماثلة فيما يتعلق بنسبة الكتامة المئوية. ومن ثم يمكن اختيار مساحة صغيرة من كل منطقة نموذجية وتقاس نسبة المنطقة الكتيمة، مثل السقوف، الممرات، أماكن الوقوف، والشوارع. وقد تستخدم النماذج المبنية على أساس المناطق الرافدة الصغيرة المدخلات مباشرة من هذه المناطق النموذجية.

4-2-7-1 التسرب

يمكن أن يقدر هذا المعامل بالقيام باختبارات تسرب الحقل أو استعمال نسب التسرب النموذجية لتربة معينة. يعكس التسرب قدرة التربة على امتصاص الرطوبة. هذا المعامل يعبر عنه بالسنتيمترات لكل ساعة. يمكن التعبير عن نسبة التسرب أيضًا بمعادلة اضمحلال نسب التسرب التي تكون عالية في البداية وتتناقص مع استمرار العاصفة وتشبع التربة.

5-2-7-1 اختزان الحجز في المنخفضات

تعكس هذه المعاملات تلك الفواقد التي تسببها المنخفضات الطبيعية أو الصناعية التي تنقص التدفق. من الضروري عادة تخمين هذه الأعماق إما عن طريق ملاحظة أحداث التدفق السابقة أو بعمل قياسات حقلية مفصلة. خزن الحجز في المنخفضات يتألف من تلك المناطق التي لا تصرف بغير التسرب أو بإطلاق بطيء. من ضمنها برك الطين، انخفاضات الشوارع غير المجهزة بالتصريف، الانخفاضات التي سببتها مناطق الامتلاء غير الممهدة، بالوعات العاصفة المسدودة، انخفاضات في المناطق العشبية والمناطق الأخرى المغمورة بسبب التصريف الضعيف حتى أثناء العواصف الخفيفة.

6-2-7-1 معاملات خشونة حوض التصريف

هذا المعامل يعرف كمتوسط معامل الخشونة لمنطقة تصريف معينة. قد تكون معاملات الخشونة هذه على شكل معامل مانينغ التجريبي (n). إن أهمية هذا المعامل هو أنه مع العديد من المعاملات الأخرى التي نوقشت سابقًا، يؤثر في وقت استجابة الحوض الذي يساهم في التدفق عن طريق الجريان السطحي. تؤدي معاملات الخشونة الأدنى إلى وقت استجابة أقصر وتدفقات عالية. تزيد معاملات الخشونة العالية وقت استجابة الحوض وتؤدي إلى تدفقات أقل. ولقد وجد أن معاملات خشونة الجريان السطحي في المناطق الكتيمة أقل بكثير من تلك التي للمناطق النفوذة. وقد تتراوح معاملات الخشونة هذه من قيم منخفضة هي 0.013 لأماكن الوقوف إلى 0.3 للمناطق العشبية، المراعي، إلخ. ويوضح الجدول رقم (1-2) معاملات الخشونة الموصى بها لمناطق الجريان السطحي المختلفة.

الجدول رقم (2-0): قيم معامل الخشونة (n).

نوع السطح	معاملات الخشونة (n) للجريان السطحي
الأسفلت	0.012
التبليط الإسمنتي	0.014
مواد طبيعية متراصّة	0.025
رمل مفكك	0.027
عشب خفيف	0.020
شجيرات كثيفة وبقايا غابات	0.400

7-2-7-1 انحدار القناة

يحدد عادة هذا المعامل من التخطيط الطوبوغرافي المتوفر. وكحالة انحدار الحوض، فهذا المعامل، مع خشونة القناة ومقطع القناة العرضي، له تأثير كبير في وقت الاستجابة. تميل القنوات الحادة إلى أن يكون لها أوقات استجابة قصيرة جدًّا. يوصى بالفحص الحقلي لتقدير ما إذا كان متوسط انحدار الخريطة يمثل انحدار القناة. وفي المعتاد تتضمن القنوات الصناعية، وغالبًا القنوات الطبيعية، مساقط مياه تؤدي إلى أن يكون انحدار القناة الفعال أكثر تسطحًا.

تعتمد نماذج التدفق في المعتاد على معادلة مانينغ (Manning) لتحديد استيعاب التدفق دون اعتبار لعدد فراود. يجب توخي الحذر في تطبيق هذه الفرضية في القنوات الطبيعية حادة الانحدار. ويعتقد عمومًا، على الرغم من أنه ليس مقبولاً دائمًا، بأن تلك القنوات الطبيعية نادرًا ما تتدفق بسرعة أعلى من السرعة الحرجة. على الأرجح تتدفق تلك القنوات على صورة سلسلة قفزات هيدروليكية بسرعة تدفق وسطية مساوية للسرعة الحرجة. فمثلاً سرعة التدفق الطبيعية في قناة لها عرض سفلي ١,٢م، ميول جانبية 1:2، معامل خشونة ٠,٠٤٥، وانحدار 8 بالمئة تساوي 2,9 م /ث في حين أن السرعة الحرجة للتدفق نفسه هي فقط 2,1 م /ث، أي نحو 27 في المئة أقل. ومن الواضح أن مدة الرحلة ستكون مختلفة كثيرًا للحالتين.

عندما يتعلق الأمر بانحدارات حادة للقناة، فإن عدد فراود للتدفق يجب أن يدقق قبل الاستمرار باستعمال نماذج النقل. إذا ظهر بأن حسابات التدفق الطبيعية تؤدي إلى سرعات فوق الحرجة، فإن معامل خشونة للقناة يجب أن يزداد حتى تنتج السرعة الحرجة. إن عدد فراود معرف بأنه:

$$F_R = \frac{V}{\sqrt{gd}} \quad (2\text{-}1)$$

حيث:

V = السرعة المتوسطة للتدفق (م/ث).

g = تسارع الجاذبية (م/ث^2).

d = العمق الهيدروليكي الذي يعرف بأنه مساحة المقطع العرضي للماء العمودي على اتجاه التدفق في القناة مقسومة على عرض السطح الحر.

ويكون التدفق من النوع فوق الحرج عندما يكون عدد فراود FR أكبر من الواحد الصحيح.

8-2-7-1 المقطع العرضي للأنبوب أو القناة

في حالة القنوات المفتوحة، فإن مقطع القناة العرضي يمكن أن يكون له تأثير كبير في تدفقات الفيضان واختزان القناة. إن القنوات ذات سهول فيضان ـ على جانبي النهر ـ عريضة جدًّا، هي من الأهمية بمكان في تقليل التدفقات إلى حد كبير. على كل حال، فإن نماذج التدفق عادة لا تتضمن تأثيرات اختزان القناة. ومن ثم، فإن عمل الفحص الحقلي للقناة مهم جدًّا لتقرير فيما إذا كان يجب أن يؤخذ خزن القناة في الحسبان.

9-2-7-1 خشونة الأنبوب أو القناة

خشونة الأنبوب أو القناة عادة لها تأثير صغير في تدفق الفيضان المتوقع إلا إذا كانت هذه الخشونة عالية جدًّا. هذا الوضع قد يوجد في القنوات المغطاة بالأشجار والشجيرات أو في عبارات لها تأثير تضييقي في ارتفاعات الماء السطحية. خشونة القناة والأنبوب لها على كل حال بعض التأثير في زمن استجابة الحوض، ويجب أن يؤخذ بالحسبان في أي تحليل هيدرولوجي. كما أنه يمكن عمل تخمينات معقولة لخشونة القناة بالفحص البصري للقناة أو الأنبوب الذي يجري دراسته والمقارنة مع عامل الخشونة الموضح في الجدول رقم (1-3).

الجدول رقم (3-0): قيم معامل الخشونة (n).

نوع القناة وتوصيفها	قيمة معامل مانينج		
	الصغرى	الطبيعية	العظمى
(أولًا) الجريان في أنبوب مغلق مملوء جزئيًا			
(1) جدار الأنبوب معدني: Metal			
أ نحاس أصفر أملس Brass, smooth	0.009	0.010	0.013
ب. صلب (فولاذ): Steel			
1. مثبتة بلحام Welded	0.010	0.012	0.014
2. مثبتة ببرشام Riveted and spiral	0.013	0.016	0.017
ج. حديد زهر: Cast iron			
1. مطلي Coated	0.010	0.013	0.014
2.غير مطلي Uncoated	0.011	0.014	0.016
د. حديد مطاوع: Wrought iron			
1. أسود Black	0.012	0.014	0.015
2. مطلي بالزنكGalvanized	0.013	0.016	0.017
هـ. معدن متجعد (مموج): Corrugated metal			
1. صرف مغطى Subdrain	0.017	0.019	0.021
2. صرف سيول Storm Drain	0.021	0.024	0.030
(2) جدار الأنبوب غير معدني: Nonmetal			
أ. زجاج بليكسيLucite	0.008	0.009	0.010

نوع القناة وتوصيفها	قيمة معامل مانينج		
	الصغرى	الطبيعية	العظمى
ب. زجاج Glass	0.009	0.010	0.013
ج. أسمنت: Cement			
1. سطح ناعم Neat surface	0.010	0.011	0.013
2. مملطMortar	0.011	0.013	0.015
د. خرسانة أسمنتية: Concrete			
1. عبارة ذات مسار مستقيمCulvert, straight no debris	0.010	0.011	0.013
2. عبارة ذات مسار منحنٍ Culver, bends, connections	0.011	0.013	0.014
3. خرسانة تامة التشطيبFinished	0.011	0.012	0.014
4. أنبوب صرف بغرف تفتيش، مستقيم Sewer with manholes	0.013	0.015	0.017
5. غير مشطبة، شدات صلب Unfinished, steel form	0.012	0.013	0.014
6. غير مشطبة، شدات خشبية ناعمة Smooth wood form	0.012	0.014	0.016
7. غير مشطبة، شدات خشبية خشنة Rough wood form	0.015	0.017	0.020
(ثانيًا) الجريان في قناة مكشوفة: Lined or builtup Channels			
(1) جدار القناة معدني:Metal			
أ. صلب ذو سطح ناعم: Smooth steel surface			
1. غير مطلي Unpainted	0.011	0.012	0.014
2. مطليPainted	0.012	0.013	0.017
ب. مجعد Corrugated	0.021	0.025	0.030
(2) جدار القناة غير معدني: Nonmetal			
أ. أسمنتي: Cement			
1. سطح ناعم Neat surface	0.010	0.011	0.013
2. سطح مملط Mortar	0.011	0.013	0.015
ب. خرساني Concrete	0.011	0.015	0.027
ج. قاع من الحصى وجوانب من Gravel bottom with sides of :			

نوع القناة وتوصيفها	قيمة معامل مانينج		
	الصغرى	الطبيعية	العظمى
1. قالب (صبة) خرسانيFormed concrete	0.017	0.020	0.025
2. حجر مثبت بالملاط Random stone in mortar	0.022	0.038	0.040
3. كسر حجارة Dry rubble or riprap	0.023	0.039	0.036
د. مبني: Brick			
1. أملس السطحGlazed	0.011	0.013	0.015
2. مغطى بالأسمنت In cement mortar	0.012	0.015	0.018
هـ. أسفلت: Asphalt			
1. ناعمSmooth	0.013	0.013	-
2. خشنRough	0.016	0.016	-
و. مبطن بالعشب Vegetal lining	0.030	-	0.500
(ثالثًا) قناة محفورة أو مجرفة: Excavated or Dredged			
ترابية مستقيمة ومتجانسة:Earth, straight and uniform			
نظيفة، حديثة العهد Clean, recently completed	0.016	0.018	0.020
نظيفة، بعد تأثير العوامل الجوية Clean after weathering	0.018	0.022	0.025
حصى، قطاع منتظم ونظيف Gravel, uniform, clean	0.022	0.025	0.030
مع عشب قصير وقليلShort grass, few weeds	0.022	0.027	0.033
ترابية منعطفة وراكدة: Earth, winding and sluggish			
دون نباتات No vegetation	0.023	0.025	0.030
عشب قليل Grass, some weeds	0.025	0.030	0.033
عشب كثيف أو نباتات مائية Dense weeds , aquatic plants	0.030	0.035	0.040
قاع ترابي وجوانب دبش Earth bottom, rubble sides	0.028	0.030	0.035
هـ- قاع صخري مغطى بالأعشاب Stoney bottom, weedy banks	0.025	0.035	0.040
قاع حصى نظيف الجوانب Cobble bottom, clean sides	0.030	0.040	0.060
تجريف أو حفر بالحفارة: Dragline-excavated dredged			

نوع القناة وتوصيفها	قيمة معامل مانينج		
	الصغرى	الطبيعية	العظمى
دون نباتات No vegetation	0.025	0.028	0.033
أشجار ونباتات خفيفة على الضفافLight brush on banks	0.035	0.050	0.060
مشقوقة في الصخر:Rock cuts			
ناعمة ومنتظمةSmooth and uniform	0.025	0.035	0.040
خشنة وغير منتظمةJagged and irregular	0.035	0.040	0.050
قناة غير مصانة بها عشب وأغصان غير مقطوعة:Unmaintained			
عشب كثيف بارتفاع سطح الماءDense weeds, high as depth	0.050	0.080	0.120
القاع نظيف والأغصان في الجوانب Clean bottom, brush sides	0.040	0.050	0.080
كما بالسابق عند الارتفاع الأقصى للماء Same, highest stage	0.045	0.070	0.110
أغصان كثيفة، أقصى ارتفاع للماء Dense brush, high stage	0.080	0.100	0.140
(رابعًا) جداول طبيعية (أودية وشعاب وما شابه) Natural Streams			
(1) جدول صغير عرض سطح الماء أقل من 30م: Minor streams			
أ. جداول منبسطة: Streams on plain			
1. نظيفة مستقيمة، أعلى منسوب للمياه، لا علو ولا انخفاض في القاعClean, straight, full stage, no rifts or deep pools	0.025	0.030	0.035
2. كما بالسابق وبها كمية من الحجارة والأعشاب Same as above, more stones and weeds	0.030	0.035	0.040
3. نظيفة، منعطفة، بها بعض الحفر والأكوام Clean, winding, some pools and shoals	0.033	0.040	0.045
4. كما بالسابق مع بعض الحجارة والأعشاب Same as above, but some weeds and stones	0.035	0.045	0.050
5. كما بالسابق، مناسيب مياه قليلة، ميول وقطاعات غير فعالة Same as above, lower stages, more ineffective sections	0.040	0.048	0.055
6. كما في 4 ولكن بحجارة أكثر Same as 4, more stones	0.045	0.050	0.060

نوع القناة وتوصيفها	قيمة معامل مانينج		
	الصغرى	الطبيعية	العظمى
7. أجزاء راكدة عشبية،حفر عميقة Sluggish, weedy, deep pools	0.050	0.070	0.080
8. أجزاء عشبية جدًّا وحفر عميقة، بها أشجار أسفلها نباتات Very weedy, deep pools, timber and underbrush	0.075	0.100	0.010
ب. جداول جبلية، قنوات دون نباتات، القاع عادة منحدر، أشجار وأغصان على طول القاع مغمورة: Mountain Streams			
1. القاع حصى وصخور قليلة Gravels, cobbles, few boulders	0.030	0.040	0.050
2. القاع حصى وصخور كبيرة Cobbles with large boulders	0.040	0.050	0.070
(2) مسطحات فيضية:Flood plains			
أ. مراعي من دون أغصان:Pasture, no brush			
1. عشب قصير Short grass	0.025	0.030	0.035
2. عشب طويلHigh grass	0.030	0.035	0.050
ب- مناطق مزروعة: Cultivated areas			
1. من دون محصول No crop	0.020	0.030	0.040
2. محاصيل ناضجة على صفوف Mature row crops	0.025	0.035	0.045
3. محاصيل حقلية ناضجة Mature Field crops	0.030	0.040	0.050
ج. أغصان: Brush			
1. مقطوعة ومبعثرة وعشب كثيف Scattered, heavy weeds	0.035	0.050	0.070
2. قليلة وأشجار في الشتاء Light brush and trees, in winter	0.035	0.050	0.060
3. قليلة وأشجار في الصيفLight brush and trees in summer	0.040	0.060	0.080
4. متوسطة إلى كثيفة في الشتاء Medium to dense in winter	0.045	0.070	0.110
5. متوسطة إلى كثيفة في الصيفMedium to dense in summer	0.070	0.100	0.160
د. أشجار:Trees			
1. صفصاف كثيف، صيفية مستقيمة Dense willows	0.110	0.150	0.200
2. أرض خالية، جذوع أشجار Cleared, tree stumps no sprouts	0.030	0.040	0.050

نوع القناة وتوصيفها	قيمة معامل مانينج		
	الصغرى	الطبيعية	العظمى
(3) المجاري الرئيسة (عرض سطح الماء أكبر من 30م): Major Streams			
أ- مقطع منتظم دون صخور أو أغصان Regular section, no boulders	0.025	.....	0.060
ب- مقطع غير منتظم وخشن Irregular and rough	0.035	.....	0.100

3-7-1 تحليل الأمطار

تعد الظروف المناخية من أهم العوامل التي يجب دراستها وتحليلها بعناية ودقة بالغة عند الإعداد لمشاريع تصريف مياه السيول والأمطار ودرء أخطارها، حيث إنها تلعب دورًا مهمًّا في تحديد كميات مياه الأمطار وتوزيع تساقطها على زمن هطول العاصفة. ومن أهم هذه البيانات أعماق العواصف الممطرة موزعة على ساعات زمن الهطول وفي الجهات والجوانب المختلفة لمنطقة الدراسة. ويهدف هذا الجزء إلى تحديد أقصى عمق مطر يومي يمكن أن يتساقط على منطقة الدراسة من واقع التحليل الإحصائي للبيانات المرصودة سلفًا بمحطات الرصد المختلفة، وأيضًا تحديد منحنيات الهطول (IDF-Curves)، والتي يتم تقدير كميات ومعدلات تدفق مياه السيول بناءً عليها.

1-3-7-1 تحليل الهطول اليومي

يتم عمل التحليل الإحصائي باستخدام بيانات أقصى هطول يومي. ويتم ذلك بعمل قائمة بالعمق الأقصى للمطر اليومي (مم) لكل سنة من سنوات السجل. وقد جرى العمل قديمًا على افتراض أن توزيع غامبل (Gumbel) هو الأنسب لهذا النوع من البيانات القصوى، ولكن الدراسات الحديثة أوضحت أن بعض التوزيعات الأخرى مثل توزيع القيم القصوى العام (Generalized Extreme Value) وتوزيع غاما (Gamma) والتوزيع اللوغاريتمي الطبيعي (Lognormal) وغيرها قد تكون أكثر ملاءمة في كثير من الحالات. وعلى هذا فيجب استخدام أي من البرامج المتاحة لعمل التحليل الإحصائي واختيار توزيع إحصائي مناسب لتلك البيانات وتحديد معاملاته. ويمكن فحص مدى ملاءمة توزيع معين للبيانات بمقارنة موضع البيانات على منحنى التوزيع المحسوب. ويتم ذلك بترتيب البيانات من الأدنى إلى الأعلى ويخصص لكل منها موضع على الرسم البياني يحسب من العلاقة التالية:

$$F = \frac{i}{N+1} \quad (3\text{-}1)$$

حيث:

F = موضع الرسم، ويمثل احتمال حدوث القيمة المقاسة أو أقل منها (احتمال عدم التجاوز).

N = العدد الكلي لبيانات المطر.

i = قيمة الرتبة لبيانات المطر المرتبة من الأدنى للأعلى.

ثم ترسم قيم بيانات المطر بالنسبة لمواضعها على منحني التوزيع النظري المحسوب نفسه ويتم تقييم مدى ملاءمة التوزيع المحسوب بصريًّا. كما يوفر العديد من برامج التحليل الإحصائي اختبارات إحصائية قياسية للمفاضلة بين التوزيعات المختلفة، بالإضافة إلى الفحص البصري. ومن الملاحظ أنه في كثير من الأحيان قد يناسب البيانات أكثر من توزيع واحد، وفي هذه الحالة يعتمد المصمم على خبرته أو المعلومات الإقليمية المتاحة لاختيار التوزيع الأكثر ملاءمة.

ونتيجة لهذا النوع من التحليل الإحصائي يمكن تحديد أعماق المطر اليومي لفترات العودة المختلفة ذات الصلة بالتصميم، وهي في العادة 5، 10، ٢٥، ٥٠، أو100 سنة. ويتم هذا أولًا بحساب احتمال عدم التجاوز F لكل حدث باستخدام الصيغة التالية:

$$F = 1 - 1/T \quad (4\text{-}1)$$

حيث T هي فترة العودة لكل حدث. ثم يتم التعويض في المعادلة النظرية للتوزيع المختار، ومن ثم يتم الحصول على عمق المطر لفترات العودة المعينة.

ومن الأهمية بمكان أن يتم تصحيح القيم المحسوبة لتعطي الهطول الأقصى الحادث في 24 ساعة عوضًا عن الهطول اليومي، وهو ما يعرف بتصحيح فترات الأرصاد الثابتة (حيث يبدأ رصد المطر في ساعة معينة من اليوم بغض النظر عن وقت بداية العاصفة المطرية؛ ما يؤدي أحيانًا إلى تقسيم عمق الهطول الأقصى على يومين). وطبقًا لتوصيات المنظمة العالمية للأرصاد الجوية (WMO) يكون التصحيح بضرب القيم الناتجة عن التحليل الإحصائي في معامل قدره 1.13 للتحويل إلى هطول 24 ساعة المناظر.

2-3-7-1 تحليل هطول الفترات القصيرة

إن قيمة شدة المطر تعتمد جوهريًّا على ثلاثة أشياء وهي: كمية المطر الحادث، والوقت الذي يستغرقه هذا المطر، وفترة التكرار المرتبطة بكل فئة تصميم. هذه العوامل الثلاثة تجتمع في منحنيات الشدة -الدوام -التردد (IDF Curve). هذه المنحنيات يمكن إيجادها من بيانات المطر المحلية باستعمال الطريقة المستخدمة لتحليل لبيانات اليومية نفسها، ولكن بعد استخلاص القيم القصوى السنوية للفترات دون اليومية التالية: ١٠، ٢٠، ٣٠ دقيقة؛ ١، ٢، ٣، ٦، و١٢ ساعة. وتحسب أعماق المطر المناظرة لفترات العودة المختلفة كما أوضحنا سابقًا لكل فترة دوام، ثم تحوّل أعماق المطر إلى شدة (مم/ساعة) بالقسمة على فترة دوام المطر المناظرة.

باستعمال هذا النوع من الأسلوب الإحصائي في تحديد منحني الشدة – الدوام -التردد (IDF)، يستطيع المصمم أن يرى الحاجة للكميات الكيرة من بيانات المطر. إن المزيد من المعلومات المستعملة في التحليل يعني دقة أفضل في تقدير التدفق. ولسوء الحظ، فإن المهندس لا يجد دائمًا المعلومات، حيث يريدها أن تكون لحل هذه المشكلة، حددت وزارة البيئة والمياه والزراعة مناطق ذات ظروف هيدرولوجية مماثلة، والقصد من ذلك هو أن تعدَّ بيانات المطر ضمن منطقة ما متجانسة ومستقلة وتنطبق بشكل موحَّد على كافة أنحاء المنطقة. ويبين الشكل (4-1) حدود تلك المناطق.

وفي بعض الحالات، وخاصة في حالة عدم توفر البيانات في منطقة الدراسة، أو توفر عدد غير كاف من البيانات لإجراء التحليل الإحصائي، أو عدم تناسق نتائج التحليل الإحصائي لفترات الدوام المختلفة، فإنه يمكن تقدير أعماق الهطول لفترات الدوام المختلفة كنسبة من هطول 24 ساعة. وفي هذا الصدد جرت العادة على استخدام النسب الخاصة بتوزيع النوع الثاني لهيئة (SCS) الأمريكية والمسمى (SCS Type II) في المناطق القاحلة، وهو مبني في الأساس على ما يسمي بنسب، بل (Bell's Ratios). ويعطي الجدول رقم (4-1) النسب الخاصة بهذا التوزيع.

الجدول رقم (4-1): نسب أعماق هطول الفترات دون اليومية إلى هطول 24 ساعة

الفترة (دقيقة)	10	20	30	60	120	180	360	720	1440
نسبة العمق	0.200	0.279	0.343	0.435	0.565	0.626	0.750	0.877	1

3-3-7-1 التوزيع الزمني للعاصفة

يلعب التوزيع الزمني لشدة الهطول دورًا رئيسًا في تحديد التصرف الأقصى لمنطقة ما، حيث إنه بصفة عامة يزداد التصرف الأقصى بزيادة شدة الهطول في زمن معين ويقل مع انخفاض شدة الهطول؛ لذا فإن اختيار التوزيع الزمني للهطول في العاصفة التصميمية هو من الأهمية بمكان. ومن الطرق المستخدمة لتخليق عاصفة تصميمية بناءً على تحليل التواتر للفترات الهطول القصيرة الموضح سابقًا، طريقة الكتل المتناوبة. وتتلخص هذه الطريقة في توزيع كميات الأمطار المحسوبة من تحليل التواتر للزمن الترددي التصميمي (10 سنوات مثلًا أو 100 سنة)، بحيث تكون أقصى شدة في منتصف اليوم (عند 12 ساعة) وتوزع كمية الهطول بعد ذلك تباديًا عن يمين ويسار (أي قبل وبعد) الكتلة المركزية. وجرت العادة في حالة عدم توفر البيانات، كما أسلفنا، على استخدام النوع الثاني من توزيع هيئة (SCS) الأمريكية والمسمى (SCS Type II)، حيث إنه الأكبر شدة لفترات الهطول القصيرة مقارنة بالأنواع الأخرى المطروحة من هيئة (SCS)، ما قد يجعله أكثر مناسبة لخصائص العواصف في المناطق القاحلة، ولكن لا يتم اللجوء لهذا التوزيع إلا إذا تعذر إيجاد التوزيع الفعلي في المنطقة.

الشكل 1-4: تأثيرات خصائص الحوض في تغير التدفق مع الزمن

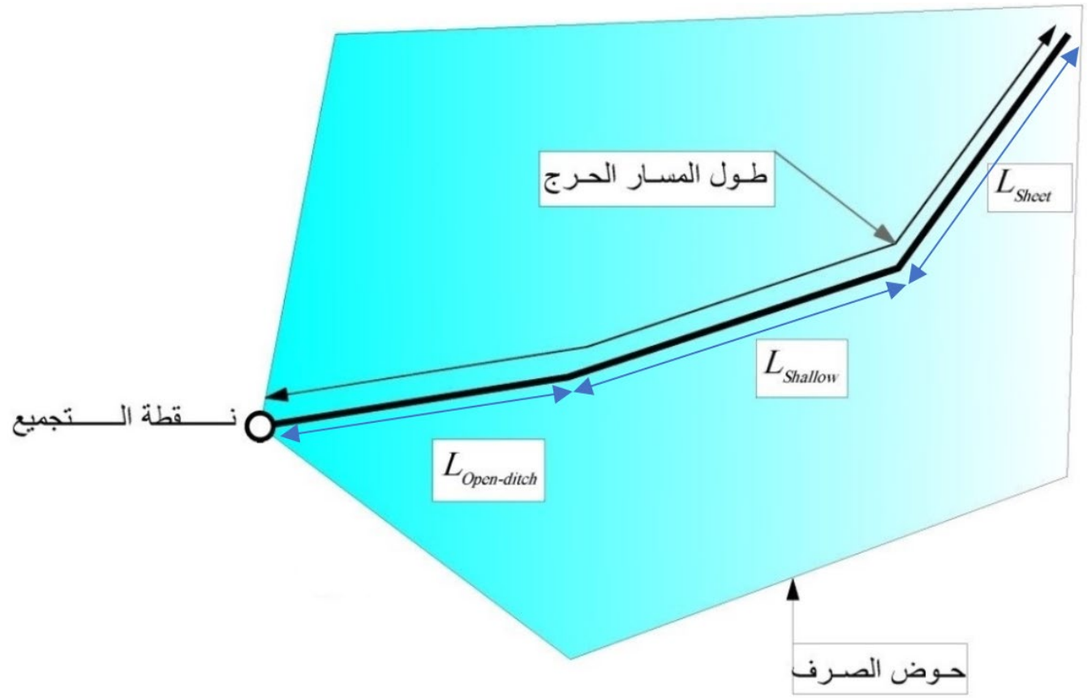
4-7-1 زمن التركيز

يعرف زمن تركيز الحوض (Time of Concentration) بأنه "الزمن اللازم لأن تتجمع مياه الأمطار المتساقطة على سطح الحوض حتى تصل إلى النقطة التي يتم التصميم عندها". ويختلف زمن وصول مياه السيول إلى نقاط التجميع من نقطة إلى أخرى على سطح حوض الصرف، فكلما كانت النقطة قريبة كان وصولها أسرع، وكلما كان انحدار مسار المياه شديدًا كان وصولها أسرع، وهكذا. وهناك العديد من العوامل التي تؤثر في زمن التركيز ووصول مياه السيول إلى نقاط التجميع، يمكن تلخيصها فيما يلي:

1. طبيعة سطح الحوض من حيث الخشونة والنعومة، فكلما كان السطح ناعمًا كان الزمن أقل.
2. انحدار سطح الحوض.
3. برك التخزين وسعتها.
4. الغطاء النباتي وكثافته.
5. شكل الحوض ومساحته.

ويجب اختبار كافة المسارات التي يمكن أن تسلكها مياه السيول من الجوانب المختلفة لحوض الصرف حتى تصل إلى نقاط التجميع، وذلك بغرض تحديد المسار الحرج للمياه، والذي يمكن تعريفه بأنه المسار الذي تستغرق فيه مياه السيول أطول زمن ممكن حتى تصل إلى نقطة تجميع معينة.

ويأخذ جريان مياه السيول على أسطح أحواض الصرف صورًا عدة حتى يصل إلى نقاط التجميع، ويمكن إيضاح صور جريان المياه على أسطح أحواض الصرف كما هو مبين في الشكل 5-1. ونورد فيما يلي الطرق المختلفة لحساب زمن التركيز.



الشكل 1-5: المسار الحرج وصور جريان المياه على سطح حوض الصرف

1-4-7-1 المناطق غير الحضرية (لا توجد أسطح أسفلتية أو خرسانية)

معادلة كيربيتش (Kirpich's Equation) هي أشهر المعادلات وأسهلها في التطبيق، ويمكن صياغتها على النحو التالي:

$$T_C = 0.06628 \left(\frac{60 \times L^{0.77}}{S_B^{0.385}}\right) \quad (5\text{-}1)$$

حيث:

= زمن التركيز (دقيقة).

= طول المسار الحرج للمياه (كيلومتر)

= انحدار سطح الحوض (م/م)

هذا وقد استنتج كيربيتش معادلته السابقة باستخدام معلومات من سبعة أحواض تصريف في ولاية تنيسي بالولايات المتحدة الأمريكية، تتميز بكونها ذات قنوات تصريف واضحة وميول كبيرة من 3 إلى 10%. ويشيع استخدام هذه المعادلة في المناطق القاحلة، حيث تندر النباتات في أحواض التصريف الخلوية. ويجدر الإشارة إلى أنه إذا ما كان حوض التصريف به زراعات أو نباتات، فمن الممكن تعديل المعادلة بمضاعفة زمن التركيز الناتج. ومن المفضّل في حالة استخدام معادلة كيربيتش تقسيم أطول مسار إلى 3 أقسام على الأقل عند نقاط تغير ميل الوادي واستخدام معادلة كيربيتش لكل قسم على حدة، ثم تجميع حاصل كل معادلة لحساب زمن التركيز الكلي.

2-4-7-1 المناطق الحضرية

في هذه الحالة يتم تقسيم الجريان على حسب نوعه، ومن ثم تجميع أزمنة أنواع الجريان المختلفة للحصول على زمن التركيز الكلي.

أ٠ الجريان الشرائحي (Sheet Flow)

هو صورة من صور جريان المياه على سطح الأرض يكون عمق المياه فيه صغيرًا جدًّا (عدة سنتيمترات وربما ملليمترات) مقارنة بعرض الجريان (عدة أمتار وربما عشرات الأمتار)، وعادة ما يكون هذا الجريان من نوع فوق الحرج؛ لذا تكون سرعة المياه فيه كبيرة إلى حد ما، وتسير المياه بهذا الشكل الشرائحي مسافة تتوقف على طبيعة خشونة سطح الحوض وعلى مدى مشاركة جهات الحوض المجاورة في زيادة كمية التدفق بحد أقصى نحو 90م.

وهناك العديد من المعادلات التطبيقية التي يمكن استخدامها لحساب الزمن اللازم للجريان الشرائحي فوق أسطح أحواض الصرف، وقد تختلف هذه المعادلات في مدى الدقة وسهولة التطبيق، ونورد هنا طريقة الموجة الكينماتيكية الموضحة في المعادلة 1-6.

$$T_{C_{sheet}} = \frac{6.92}{i^{0.4}} \left(\frac{n \times L}{\sqrt{S_B}} \right)^{0.6} \quad (1\text{-}6)$$

حيث

- T_{sh} = زمن الجريان الشرائحي (دقائق)
- n = معامل الخشونة كما هو موضح في الجدول رقم (5-1) أدناه
- L = طول الجريان الشرائحي بالأمتار
- i = شدة المطر (مم/ساعة) المقابلة لزمن التركيز الكلي للحوض
- S_B = ميل الأرض (م/م)

الجدول رقم (5-0): معامل مانينج للجريان الشرائحي.

توصيف السطح	معامل مانينج
أسفلت ناعم Smooth asphalt	0.011
خرسانة ناعمة Smooth concrete	0.012
تبطين خرساني عادي Ordinary concrete lining	0.013
طوب مع مونة أسمنتية Brick with cement mortar	0.014
ركام الأسمنت Cement rubble surface	0.024
أرض غير مزروعة بين الدورات الزراعية (لا مخلفات) Fallow (no residue)	0.05
التربة المزروعة Cultivated Soil	
ارتفاع المخلفات أقل من 20% 20% ≥ Residue cover	0.06
ارتفاع المخلفات أكبر من 20% 20% < Residue cover	0.17
المراعي (طبيعية) Range (natural)	0.13
الأعشاب Grass	
مروج العشب القصير Short grass prairie	0.15
الأعشاب الكثيفة Dense grasses	0.24
أعشاب برمودا Bermuda grass	0.41

ومن المعادلة يتضح أن حساب زمن التركيز يتطلب معرفة شدة المطر، بينما يتم اختيار شدة المطر على حسب قيمة زمن التركيز. ولهذا فحساب زمن التركيز بهذه المعادلة يتم عن طريق المحاولات (iterations) بفرض قيمة ما لشدة المطر ثم حساب زمن التركيز، فإعادة تقدير شدة المطر بناءً على زمن التركيز المحسوب وإدخالها مرة أخرى في المعادلة السابقة وهكذا حتى تستقر القيم المحسوبة.

ب٠ الجريان الضحل (Shallow Concentrated Flow)

إن مياه السيول وهي تجري على سطح الحوض متخذة شكل الجريان الشرائحي تبدأ بعد مسافة ما في التركيز والتجميع من الجهات المختلفة للحوض، ويزداد التدفق ويزيد عمق الجريان ولكن يظل عرض الشريحة التي تجري عليها المياه من الحوض أكبر بكثير من العمق (عرض الشريحة عشرة أضعاف العمق على الأقل)، ويوصف هذا الشكل من الجريان بأنه الجريان الضحل (Shallow Wide Stream) أو (Shallow Concentrated Flow)، ويمكن حساب زمن الجريان باستخدام معادلة مانينج لحساب سرعة المياه على النحو التالي:

$$V_{shallow} = \frac{0.246}{n} S_B^{0.5} \quad \text{(للأسطح غير المرصوفة)} \quad (7\text{-}1)$$

$$V_{shallow} = \frac{0.155}{n} S_B^{0.5} \quad \text{(للأسطح المرصوفة)} \quad (8\text{-}1)$$

حيث SB هو ميل السطح، و n هو معامل مانينج لخشونة السطح. وباستخدام المعادلات السابقة يتم حساب زمن وصول مياه السيول حال جريانها بهذا الشكل من أشكال الجريان باستخدام المعادلة التالية:

$$T_{C_{shallow}} = \frac{L_{shallow}}{60\, V_{shallow}} \quad (9\text{-}1)$$

حيث:

- $T_{C_{shallow}}$ = زمن جريان المياه حال كونها تجري فوق سطح الحوض بشكل ضحل (دقيقة).
- $L_{shallow}$ = طول المسار الحرج للمياه حال كونها تجري فوق سطح الحوض بشكل ضحل (متر).
- $V_{shallow}$ = سرعة المياه خلال المسار الضحل (متر/ ثانية).

ج٠ الجريان في الأخاديد (Open Ditch Flow)

في حالة أحواض الصرف شاسعة المساحة ونتيجة غزارة المياه المتدفقة من جوانب الحوض المختلفة يمينًا ويسارًا يزيد عمق المياه ويتركز جريانها عبر مسار محدد المعالم والأبعاد في مجرى يطلق عليه الأخدود، ويتحول شكل الجريان تدريجيًا من جريان ضحل إلى صورة الجريان في القنوات المكشوفة، وعادةً ما يتم تحديد طول المسار الحرج الذي تأخذ مياه السيول فيه صورة الجريان بالقنوات المكشوفة من واقع المصورات الجوية أو الزيارات الحقلية، وفي كلٍ يتم الحصول على الأبعاد الخاصة بقطاع هذا الأخدود، ثم يتم حساب زمن جريان المياه فيه باستخدام المعادلة التالية:

$$T_{C_{open-ditch}} = \frac{L_{open-ditch}}{60\, V_{open-ditch}} \quad (10\text{-}1)$$

حيث:

- $T_{C_{open-ditch}}$ = زمن جريان المياه فوق سطح الحوض بشكل قناة مكشوفة (دقيقة).
- $L\ open\text{-}ditch$ = طول المسار الحرج للمياه حال كونها تجري بشكل قناة مكشوفة (متر).
- $Vopen\text{-}ditch$ = سرعة المياه خلال القناة المكشوفة (متر/ثانية) وتحسب باستعمال معادلة مانينغ حسب الأبعاد الفعلية لقطاع:

$$V = \frac{1}{n}\, R^{2/3}\, S^{1/2} \quad (11\text{-}1)$$

حيث:

V = السرعة المتوسطة (م/ث).

n = معامل مانينج للخشونة.

R = نصف القطر الهيدروليكي (م).

S = الانحدار (م/م).

وبذلك يمكن حساب زمن تركيز مياه السيول التجميعي كالتالي:

$$T_{C_B}^{N} = T_{C_{sheet}} + T_{C_{shallow}} + T_{C_{open-ditch}} \quad (12\text{-}1)$$

5-7-1 تقدير الفيضان

يمكن استخدام عدة طرق لتقدير معدل تدفق الذروة من مناطق التصريف. الطريقة الأولى، المعادلة النسبية (Rational Method)، تستعمل بيانات المطر الموجودة واستعمالات الأراضي في تقدير التدفق. واستعمالها يجب أن يكون مقتصرًا على مناطق التصريف الصغيرة.

الطريقة الثانية هي طريقة رقم المنحني (SCS Curve Number). الطريقة الثالثة هي طريقة التحليل الإحصائي لبيانات محطات قياس التدفق، وتؤسس هذه الطريقة تقديرات التدفق على التوزيع الإحصائي للفيضانات السابقة.

وتستعمل طرق التقدير غير المباشرة لأحواض الماء غير المقاسة، حيث لا توجد قياسات للتدفق أو توجد بكميات محدودة جدًّا. تقديرات التدفق التي تستخدم هذه الطرق غير المباشرة تستند على الترابط بين قيم تدفق الذروة ومعاملات الحوض التجميعي للماء القابلة للقياس. الطريقة الأخيرة، معادلات الانحدار، هي صيغ طورت للاستعمال في المملكة العربية السعودية، حيث إما بيانات المطر أو بيانات التدفق غير متوفرة.

يجب استعمال الجدول التالي رقم (1-6) في اختيار طريقة تقدير فيضان معينة

الجدول رقم (1-6): طرق تقدير الفيضان

الطريقة	وصف الحوض
المعادلة النسبية	مناطق أصغر من 80 هكتارًا. تتوفر بيانات الأمطار ومعاملات الحوض.
رقم المنحني	مناطق أكبر من 80 هكتارًا. تتوفر بيانات الأمطار ومعاملات الحوض.
التحليل الإحصائي	تتوفر بيانات محطة قياس التدفق في الموقع.
التقديرات غير المباشرة	تتوفر بيانات محطة قياس التدفق من أحواض الماء المجاورة.
معادلات الانحدار	تتوفر بيانات متوسط عمق المطر السنوي ومساحة ومتوسط ارتفاع الحوض.

سواء تم اختيار إحدى هذه الطرق أو أي طريقة أخرى لتقدير تدفق الحوض التجميعي للماء، فعلى المهندس أن يضمّن تقرير التصميم النهائي نسخة من عينة الحسابات. يجب أن تكون فترات التكرار المستخدمة في الحسابات الهيدرولوجية كما يلي في الجدول رقم (1-7):

الجدول رقم (7-0): فترة التكرار التصميمية

فئة التصميم	فترة تكرار
طريق سريع (أوتوستراد)	100 سنة (1 في المئة)
الطرق الشريانية	50 سنة (٢ في المئة)
الطرق التجميعية	50 سنة (٢ في المئة)
الطرق المحلية	٢٥ سنة (٤ في المئة)
بالوعة صرف أمطار	5 سنوات (20 في المئة)

1-5-7-1 المعادلة النسبية

تنص هذه الصيغة على أن نسبة التدفق تتناسب طرديًّا مع معدل الهطول إذا استمر المطر طويلًا بما فيه الكفاية للسماح لكامل المساحة بالمساهمة. تأخذ المعادلة الشكل التالي:

$$Q = C_f \left(\frac{C \times I \times A}{360}\right) \quad (1\text{-}13)$$

حيث:

Q = التدفق (م3/ث) لفترة عودة مساوية لفترة عودة شدة المطر (I).

C = معامل الجريان ويعبر عن جزء المطر الذي يفترض أن يصبح تدفقًا مباشرًا.

I = شدة المطر (مم/ساعة) للفترة المناظرة لزمن التركيز للحوض ولها فترة تكرار مناسبة لظروف المشروع.

A = مساحة حوض التصريف بالهكتار.

Cf = معامل تصحيح يعتمد على مقدار الفترة التكرارية للتصميم، كما هو مبين في الجدول رقم (1-8).

الجدول رقم (8-0): معامل تصحيح الطريقة المنطقية وعلاقته بالفترة التكرارية

الفترة التكرارية (سنة)	معامل التصحيح C_f
أقل من 25	1.00
25	1.10
50	1.20
100	1.25

وهذه الطريقة لها عدة تقييدات مهمة:

إنها تعطي فقط تدفق الذروة، وليس تغير التدفق مع الزمن، أي الهيدروغراف.

تفترض أن التدفق يرتبط بالمطر بشكل خطّي.

تفترض أن فائض المطر لفترة عودة معطاة ستنتج التدفق لفترة العودة نفسها.

إن القيم النمطية لمعاملات الجريان المستخدمة في كل من المناطق الحضرية أو الريفية مدرجة في الجدولين رقم (1-9) و (1-10).

الجدول رقم (9-0): معامل الجريان وعلاقته بطبيعة وخصائص سطح حوض الصرف للمناطق الحضرية

نوع الغطاء النباتي والظروف الهيدرولوجية لسطح حوض الصرف	معامل الجريان (C)
أ- مناطق تجارية Commercial and business	
• وسط البلد Downtown area	0.95-0.70
• مناطق مجاورة Neighborhood area	0.70-0.50
ب- مناطق سكنية Residential	
• إسكان أسرة واحدة (فيلا) Single family area	0.50-0.30
• عمارات سكنية منفصلة Multi-units detached	0.60-0.40
• عمارات سكنية ملتصقة Multi-units attached	0.75-0.60
• ضواح صغيرة suburban	0.40-0.25
• شقق سكنية متجاورة Apartment dwelling area	0.70-0.50
ت- مناطق صناعية Industrial	
• مناطق صناعات خفيفة Light area	0.80-0.50
• مناطق صناعات ثقيلة Heavy area	0.90-0.60
ث- الحدائق والمقابر Parks & Cemeteries	0.25-0.10
هـ- الملاعب Playgrounds	0.40-0.20
ح- الشوارع Streets	
• أسفلتية Asphalt	0.95-0.70
• خرسانية Concrete	0.95-0.80
خ- طرق خاصة وطرق مشاة Drives, Walks	0.85-0.75
د- أسقف Roofs	0.95-0.75

نوع الغطاء النباتي والظروف الهيدرولوجية لسطح حوض الصرف	معامل الجريان (C)
ذ- المناطق الزلطية Gravel area	0.50
ر- أراضٍ خضراء Lawns	
• تربة رملية ضعيفة الانحدار (أقل من 2٪) Sandy soil, flat	0.10-0.05
• تربة رملية متوسطة الانحدار (من2٪ إلى 7٪) Sandy soil, average	0.15-0.10
• تربة رملية شديدة الانحدار (أكبر من 7٪) Sandy soil, steep	0.20-0.15
• تربة طينية ضعيفة الانحدار (أقل من 2٪) Clay soil, flat	0.17-0.13
• تربة طينية متوسط الانحدار (من 2٪-7٪) Clay soil, average	0.22-0.18
• تربة طينية شديدة الانحدار (أكبر من 7٪) Clay soil, steep	0.35-0.25
ز- مناطق غير مطورة Unimproved areas	
• تربة رملية ضعيفة الانحدار (من صفر٪ إلى 3٪) Sandy soil, flat	0.20-0.15
• تربة رملية متوسطة الانحدار (من 3٪ إلى 5٪) Sandy soil, average	0.25-0.20
• تربة طينية ضعيفة الانحدار (من صفر٪ إلى 3٪) Clay soil, flat	0.25-0.18
• تربة طينية متوسطة الانحدار (من 3٪ إلى 5٪) Clay soil, average	0.30-0.25

الجدول رقم (10-0): معاملات الجريان (C) النمطية للمناطق الريفية

خصائص الحوض التجميعي للماء			
A التضاريس	B تسرب التربة	C الغطاء النباتي	D اختزان السطح
0.4	0.20	0.2	0.2
تضاريس وعرة حادة؛ متوسط الانحدار أكبر من 30%	لا غطاء تربة فعّالاً؛ إمّا صخر أو غطاء تربة رقيق؛ التسرب مهمل	لا غطاء نباتي فعّالاً؛ إما عارٍ أو غطاء تربة ضئيل جدًّا	مهمل؛ منخفضات السطح قليلة وضحلة؛ طرق صرف شديدة الانحدار وصغيرة، لا برك أو مستنقعات
تلال بانحدار متوسط من 10 إلى 30%	بطيء في أخذ الماء؛ طين أو تربة أخرى ذات قدرة تسرب منخفضة	فقير إلى وسط؛ محاصيل مزروعة نظيفة أو غطاء طبيعي سيئ؛ أقل من 10% من المنطقة تحت غطاء جيد	منخفض، نظام محدد جيد لمسارات التصريف الصغيرة، لا برك أو مستنقعات
0.3	0.15	0.15	0.15
متموج بانحدار متوسط من 5 إلى 10%	طمي طبيعي عميق	وسط إلى جيد؛ نحو 00% من المنطقة أرض عشبية جيدة، غابة أو غطاء مكافئ	خزن الانخفاض السطحي الطبيعي كبير؛ نمطي لأراضي المروج الطبيعية؛ البحيرات، البرك، والمستنقعات أقل من 20% من المناطق
0.2	0.1	0.1	0.1
أرض مستوية نسبيًا؛ معدل الانحدار من صفر إلى 5%	رمل عميق عالٍ أو تربة أخرى تأخذ الماء بسهولة وسرعة	جيد إلى ممتاز؛ نحو 50% في أراضٍ عشبية جيدة، غابة أو غطاء مكافئ	خزن المنخفضات السطحية كبير؛ نظام صرف بمستوى عالٍ غير محدد بحدة؛ خزن مناطق فيضان كبير؛ عدد كبير من البرك والمستنقعات
0.1	0.05	0.05	0.05

ملاحظة:

معامل الجريان مساوٍ لمجموع المعاملات من الموضع الملائم في الصفوف A، B، C، D. يجب أن تكون معاملات الجريان متناسبة مع النسبة المئوية من المنطقة المغطاة.

تحدد بعد ذلك مساحة التصريف وتحسب شدة المطر (مم/ساعة) للفترة المناظرة لزمن التركيز للحوض وفترة التكرار التصميمية. وباستخدام هذه العوامل الثلاثة: معامل الجريان، شدة المطر، ومساحة التصريف، يمكن للمهندس أن يحسب تدفق الذروة للحوض التجميعي للماء بإدخال هذه القيم إلى المعادلة النسبية أعلاه.

2-5-7-1 طريقة رقم المنحني

تستخدم هذه الطريقة لتقدير الجريان السطحي وتحديد التدفقات العظمى لمياه السيول بعد خصم الفواقد المختلفة من مياه الأمطار المتساقطة على حوض الصرف طبقًا لخصائص التربة والأنشطة المقامة عليها واستخدامات الأراضي. ويعبر عن هذه الفواقد بمعامل يطلق عليه رقم منحنى الجريان السطحي (CN)، وتعدُّ طريقة رقم المنحنى من الطرق شائعة الاستخدام لكافة أحواض الصرف مهما اختلفت مساحتها، ولكن كلما كانت مساحة حوض الصرف أصغر كانت نتائجها أدق، شأنها في ذلك شأن الطرق الأخرى. ويرجع ذلك إلى تأثير المساحة في مقدار الدقة في تحديد خصائص حوض الصرف السطحية والطبوغرافية، إذ كلما كانت مساحة حوض الصرف صغيرة كان توصيف خصائصه الجيولوجية وطبيعة الأنشطة والاستخدام لسطحه أدق، عكس الأحواض ذات المساحات الشاسعة. ولأجل ذلك فإن الحسابات المتعلقة بتحديد معدل تدفق السيول فوق سطح حوض الصرف باستخدام طريقة رقم المنحنى أكثر دقة وأقرب للواقع، إذا كان زمن التركيز لمياه السيول أقل من أو يساوي 10 ساعات، وهو لا شك زمن طويل يوحي بترامي أطراف أحواض الصرف وكبر مساحتها.

تعتمد هذه الطريقة بشكل أساسي على التقدير الدقيق للمعاملات الهيدرولوجية التالية للعاصفة التصميمية:

- التوزيع الزمني للعاصفة الممطرة.
- الفواقد الابتدائية للأمطار والتخزين الأولي لحوض الصرف والمتعلقة بكمية المياه المختزنة ببرك التجميع والمناطق المنخفضة بالحوض، وكذلك المستنفدة في عملية الترطيب المبدئي لسطح الحوض.
- معدل التسرب خلال حبيبات التربة (Infiltration Rate) الذي يقل تدريجيًّا مع مرور الوقت من بداية العاصفة المطرية حتى يصل لقيمة ثابتة تتوقف في الغالب على خصائص التربة الفيزيائية وتركيبها الإنشائي ونسبة المواد العضوية فيها.

ولإيضاح كيفية تطبيق طريقة رقم المنحنى وشرح جوانبها، نتناول تفاصيل البيانات اللازم تجهيزها، والمعادلات المختلفة المستخدمة، وتصنيف التربة المكونة لأحواض الصرف بحسب خصائصها الفيزيائية ومعدلات التسرب الخاصة بها، كما نتناول تفاوت رقم المنحنى وتأثره بحالة الحوض وخصائص التربة ومكوناتها والمحتوى الرطوبي لها قبل العاصفة مباشرة بشيء من التفصيل:

أ. البيانات اللازمة لتطبيق الطريقة:

تتطلب طريقة رقم المنحنى تجهيز البيانات التالية لحوض الصرف كي يمكن تطبيقها بسهولة:

- مساحة حوض الصرف (Watershed Area) (كم^2).
- حساب زمن التركيز لجريان مياه السيول فوق سطح الحوض (ساعة).
- رقم منحنى الجريان السطحي. (Runoff Curve Number, CN)
- قيمة عمق الهطول اليومي المقابل للفترة التكرارية التصميمية (مم/يوم).

وتتوقف قيمة منحنى الجريان (CN) على نوع تربة الحوض ونوع الاستخدام والأنشطة الحياتية التي تمارس على سطحه، وتعطي الجداول من رقم (1-11) وحتى (1-14) قيم رقم منحنى الجريان لأصناف التربة المختلفة والموضحة فيما بعد لمختلف أنواع الأنشطة.

وفي حالة أحواض الصرف ذات الأنشطة المتعددة والاستخدامات المختلفة، يتم حساب متوسط رقم المنحنى لسطح الحوض بطريقة تقريبية، حيث يتم تقسيم الحوض في هذه الحالة إلى مجموعة أحواض فرعية تختلف في عددها باختلاف الأنشطة وطبيعة استخدام كل منها، كما يتم حساب متوسط قيمة رقم المنحنى باستخدام المعادلة التالية:

$$CN_{ave} = \frac{\sum_{i=1}^{M} A_i \times CN_i}{\sum_{i=1}^{M} A_i} \quad (1\text{-}14)$$

حيث:

CNave = قيمة رقم المنحنى لحوض صرف ذي سطح متعدد الأنشطة.

i = عداد الأحواض الفرعية لحوض الصرف بقيمة الواحد الصحيح.

M = عدد الأحواض الفرعية لحوض الصرف بحسب الأنشطة والاستخدام.

ب. تصنيف التربة بحسب معدل التسرب

إن خصائص التربة المكونة لأحواض الصرف وتركيبها الإنشائي يؤثران تأثيرًا مباشرًا في العلاقة بين كمية الأمطار المتساقطة على الحوض ومقدار الجريان السطحي والسيول الناتجة عن هذه الأمطار، وفي طريقة رقم المنحنى يتم تصنيف التربة بحسب قيمة معدل تسرب المياه (Infiltration Rate) خلال حبيباتها إلى أربعة أصناف رئيسة، يمكن توضيح أهم ملامحها الإنشائية وخصائصها الفيزيائية على النحو التالي:

- الصنف الأول Group (A)

تربة رملية (Sandy Soils) أو زلطية (Gravel) عميقة ومفككة، وتتميز هذه التربة بمعدلات تسرب عالية حتى وهي متشبعة بالمياه الأرضية. ويتراوح معدل التسرب لهذا الصنف من التربة بنحو 7.6 مم/ساعة وحتى 11.4 مم/ساعة، وكما هو واضح فإن الجريان السطحي فوق أحواض صرف تتكون من مثل هذه التربة سيكون ضعيفًا.

- الصنف الثاني Group (B)

تربة رملية طفلية (Sandy Loam) متوسطة العمق وحبيباتها ما بين متوسطة النعومة (Moderately Fine) ومتوسطة الخشونة (Moderately Coarse)، وتتميز هذه التربة بمعدلات تسرب بين المتوسطة والعالية في حال التشبع بالمياه الأرضية. ويتراوح معدل التسرب لهذا الصنف من التربة بنحو 3.8 مم/ساعة وحتى 7.6 مم/ساعة، وكما هو واضح فإن الجريان السطحي فوق أحواض صرف تتكون من مثل هذه التربة سيكون بين الضعيف والمتوسط.

- الصنف الثالثGroup (C)

تربة طينية طفلية (Clay Loam)، الطبقة السطحية لها جيدة الدمك ولا تحتوي على نسبة عالية من المواد العضوية، وحبيباتها ناعمة (Fine) إلى متوسطة النعومة (Moderately Fine). وتتميز هذه التربة بمعدلات تسرب بين المتوسطة والضعيفة، ويتراوح معدل التسرب من 1.3 مم/ساعة وحتى 3.8 مم/ساعة في حال التشبع بالمياه الأرضية. وكما هو واضح فإن الجريان السطحي فوق أحواض صرف تتكون من مثل هذه التربة سيكون بين متوسط وشديد القوة.

- الصنف الرابع Group (D)

تربة طينية ذات قابلية للانتفاش (Clay Soil with a high swelling potential)، أو تربة ضحلة يليها طبقة صماء، أو تربة مستوى المياه الأرضية فيها مرتفع بصفة دائمة، ويتميز هذا الصنف بمعدلات تسرب ضعيفة جدًا، حيث يتراوح معدل التسرب من 0.05 مم/ساعة وحتى 1.3 مم/ساعة في حال التشبع بالمياه الأرضية. وكما هو واضح فإن الجريان السطحي فوق أحواض صرف تتكون من مثل هذه التربة سيكون شديد القوة.

ويجب حال تصنيف تربة أحواض الصرف الأخذ في الحسبان تأثير التطوير العمراني الذي سيلحق بسطح هذه الأحواض، ومدى تأثر حبيبات تربتها بحركة المركبات عليها وتغير خصائصها الفيزيائية.

ج. المعادلات التطبيقية الرئيسة لطريقة رقم المنحنى:

في هذه الطريقة يتم تقدير عمق مياه السيول (Runoff Depth, R) على وحدة المساحات فوق سطح أحواض الصرف باستخدام المعادلة التالية:

$$R = \frac{(P-I_a)^2}{(P-I_a)+S} \quad (1\text{-}15)$$

حيث:

R = عمق مياه السيل المتوقع حدوثه على وحدة المساحات من حوض الصرف (مم).

P = أقصى عمق هطول 24 ساعة (مم/يوم) للعاصفة الممطرة التصميمية.

Ia = مقدار الفواقد الابتدائية واستيعاب الحوض الأولي (Initial Abstraction) (مم) للعاصفة الممطرة، ويشمل التخزين السطحي في تعاريج سطح الحوض، وكمية مياه الأمطار المختزنة على أسطح أوراق الأشجار والنباتات والغطاء النباتي للحوض - إن وجد – ومياه الأمطار التي تسربت في باطن التربة... إلخ.

S = أقصى سعة تخزينية لحوض الصرف المتساقط عليه الأمطار (مم).

ويمكن حساب السعة التخزينية القصوى لحوض الصرف بالمعادلة التالية:

$$S = 254\left(\frac{100}{CN} - 1\right) \quad (1\text{-}16)$$

كما يمكن التعبير عن الفواقد الابتدائية واستيعاب الحوض الأولي (Initial Abstraction, Ia) للعاصفة الممطرة بالمعادلة التالية:

$$I_a = 0.2\,S \quad (1\text{-}17)$$

يمكن التعبير عن عمق مياه السيول (مم) (Runoff Depth, R) على وحدة المساحات فوق سطح أحواض الصرف بالمعادلة التالية:

$$R = \frac{(P-0.2\,S)^2}{P+0.8\,S} \quad (1\text{-}18)$$

كذلك يمكن الحصول على معدل تدفق مياه السيول لوحدة المساحات ولوحدة عمق المطر المتساقط على سطح الحوض ويعرف بوحدة التدفق الأقصى (Unit Peak Discharge) باستخدام المعادلة:

$$q_u = 10^{C_0-3.36609} \times T_c^{C_1+C_2\times \mathrm{LOG}(T_C)} \quad (1\text{-}19)$$

حيث:

qu = وحدة التدفق الأقصى (م3/ ث / كم2/ مم).

Tc = زمن التركيز (ساعة).

C0, C1, C2 = ثوابت تتوقف قيمها على نسبة الفواقد الابتدائية من مياه الأمطار والاستيعاب الأولي لحوض الصرف إلى عمق المطر الكلي (Ia/P)، وإذا كانت نسبة هذه الفواقد أقل من 0.10 ففي هذه الحالة يتم اعتبار القيم المقابلة لنسبة (Ia/P) = 0.10، وقيم هذه الثوابت موضحة بجدول رقم (1-15) بالنسبة لعاصفة النوع الثاني (SCS type II)، وللقيم غير الموضحة بالجداول وأقل من 0.50 يتم الحصول عليها بالنسبة والتناسب.

وأخيرا يتم الحصول على التدفق الأقصى للجريان السطحي لمياه السيول فوق سطح حوض الصرف باستخدام المعادلة التالية:

$$Q = q_u \times A_B \times R \times F \quad (1\text{-}20)$$

حيث:

Q = التدفق الأقصى لمياه السيول على كامل مساحة حوض الصرف (م3/ثانية).

AB = مساحة حوض الصرف (كم2).

R = عمق مياه السيل (Runoff Depth) (مم) المتوقع حدوثه على وحدة المساحات من حوض الصرف، ويتم حسابه باستخدام المعادلة (1-15).

F = معامل لتصحيح قيمة الجريان السطحي نتيجة وجود برك التجميع بحوض الصرف، وتحدد قيمته من الجدول (11-0).

الجدول رقم (2-0): رقم منحنى الجريان للمناطق الحضرية (Urban Areas).

نـوع الغطـاء النبـاتي والظـروف الهيدرولوجيـة لحـوض الـصرف	مساحة صماء %	تصنيف التربة A	B	C	D
مساحات مفتوحة (متنزهات، حدائق، ملاعب جولف، مقابر، ... الخ)					
• غطاء نباتي ضعيف (Poor condition (grass cover < 50%		68	79	86	89
• غطاء نباتي متوسط (Fair condi- (grass cover 50 to 75% tion		49	69	79	84
• غطاء نباتي جيد (Good condition (grass cover > 75%		39	61	74	80
أماكن انتظار السيارات، أسطح المباني ومداخل الطرق المرصوفة الخ (باستثناء حرم الطريق) Paved parking lots, roofs, driveways, etc.		98	98	98	98
الشوارع والطرق Streets and roads					
• مرصوفة بأرصفة ومصائد أمطار (باستثناء حرم الطريق)		98	98	98	98
• مرصوفة وبها قنوات مفتوحة (بما في ذلك حرم الطريق)		83	89	92	93
• الزلطية (بما في ذلك حرم الطريق)		76	85	89	91
• الترابية (بما في ذلك حرم الطريق)		72	82	87	89
المناطق الصحراوية بجوار المناطق الحضرية Desert urban Areas					
• الحدائق الطبيعية الصحراوية		63	77	85	88
• الحدائق الصناعية الصحراوية		96	96	96	96
المناطق الحضرية Urban districts					
• أماكن تجارية Commercial and business	85	89	92	94	95
• أماكن صناعية Industrial	72	81	88	91	93

الجدول رقم (3-0): رقم منحنى الجريان للمناطق المزروعة.

نوع الغطاء	الوصف	الظروف الهيدرولوجية	تصنيف التربة A	B	C	D
أراض في فترة الراحة بين المواسم الزراعية Fallow	أرض فضاء Bare Soil		77	86	91	94
	بقايا المحصول السابق	ضعيفة	76	85	90	93
	Crop residue cover	جيدة	74	83	88	93
محاصيل متراصة Row Crops	صف مستقيم (Straight Row (SR	ضعيفة	72	81	88	91
		جيدة	67	78	85	89
	صف مستقيم مع بقايا المحصول السابق	ضعيفة	71	80	87	90
		جيدة	64	75	82	85
	أرض طبيعية (Contoured (C	ضعيفة	70	79	84	88
	أرض طبيعية مع بقايا المحصول السابق	جيدة	65	75	82	86
		ضعيفة	69	78	83	87
	أرض طبيعية بمصاطب	جيدة	64	74	81	85
	Contoured Terraced	ضعيفة	66	74	80	82
	أرض طبيعية بمصاطب مع بقايا المحصول السابق	جيدة	62	71	78	81
		ضعيفة	65	73	79	81
		جيدة	61	70	77	80
المناطق السكنية مقسمة طبقًا لمساحة تجمعات المباني						
• 8/1 إيكر (acre) أو أقل (506 أمتار مربعة أو أقل)			65	77	85	90	92
• 4/1 إيكر (acre) (1012 متراً مربعًا)			38	61	75	83	87
• 3/1 إيكر (acre) (1350 متراً مربعًا)			30	57	72	81	86
• 2/1 إيكر (acre) (2024 متراً مربعًا)			25	54	70	80	85
• 1 إيكر (acre) (4047 متراً مربعًا)			20	51	68	79	84
• 2 إيكر (acre) (8094 متراً مربعًا)			12	46	65	77	82
امتداد المناطق الحضرية Developing urban areas (أماكن جديدة من دون زراعات)				77	86	91	94

حبوب صغيرة Small Grain	صف مستقيم (SR) Straight row	ضعيفة	65	76	84	88
		جيدة	63	75	83	87
	صف مستقيم مع بقايا المحصول السابق	ضعيفة	64	75	83	86
		جيدة	60	72	80	84
	أرض طبيعية (C) Contoured	ضعيفة	63	74	82	85
	أرض طبيعية مع بقايا المحصول السابق	جيدة	61	73	81	84
		ضعيفة	62	73	81	8
	أرض طبيعية بمصاطب Contoured Terraced	جيدة	60	72	80	4
		ضعيفة	61	72	79	83
	أرض طبيعية بمصاطب مع بقايا المحصول السابق	جيدة	59	70	78	82
		ضعيفة	60	71	78	81
		جيدة	85	69	77	80
زراعات محكمة أو على نطاق واسع Close- seeded or broadcast		ضعيفة	66	77	85	89
		جيدة	58	72	81	85
البقوليات أو المناوبات Legumes or Rotation		ضعيفة	64	75	83	85
		جيدة	55	69	78	83
أعشاب Meadow	أرض طبيعية بمصاطب Contoured terraced	ضعيفة	63	73	80	83
		جيدة	51	67	76	80

ملاحظات: يتم اعتبار بقايا المحصول السابق إذا كانت تمثل على الأقل مساحة 5٪ من سطح التربة خلال العام.

الجدول رقم (4-0): رقم منحنى الجريان لمناطق المراعي والغابات

نوع الغطاء	الظروف الهيدرولوجية	تصنيف التربة			
		A	B	C	D
المراعي والأراضي العشبية المستخدمة في الرعي Pasture, grassland (ضعيفة إذا كان ≤ 50٪ من مساحة الأرض بها غطاء نباتي، جيدة إذا كان ≥ 75٪ بها غطاء نباتي)	ضعيفة	68	79	86	89
	متوسطة	49	69	79	84
	جيدة	39	61	74	80
المسطحات الخضراء المحمية Meadow-Continuous grass, protected from grazing		30	58	71	78
خليط من الحشائش المتناثرة brush-weed-grass mixture	ضعيفة	48	67	77	83
	متوسطة	35	56	70	77
	جيدة	30	48	65	73
غابات وبها أراض عشبية Woods-grass combination					
ضعيفة أشجار صغيرة وغابات قليلة وإزالة الحشائش.	ضعيفة	57	73	82	86
متوسطة في حالة الغابات القليلة، رعي من دون حرق للحشائش .	متوسطة	43	65	76	82
جيدة في حالة الغابات المحمية من الرعي.	جيدة	32	58	72	79
غابات Woods					
ضعيفة في حالة الأشجار الصغيرة والغابات القليلة وتم إزالة الحشائش بالرعي أو الحرق	ضعيفة	45	66	77	73
متوسطة في حالة الغابات القليلة، رعي من دون حرق للحشائش	متوسطة	36	60	73	79
جيدة في حالة الغابات المحمية من الرعي	جيدة	30	55	70	77
المنافع الزراعية والمخازن والممرات Farmsteads – buildings, lanes, driveways		59	74	82	86

الجدول رقم (5-0): رقم منحنى الجريان للمناطق الجافة وشبه الجافة

نوع الغطاء	الظروف الهيدرولوجية	تصنيف التربة A	B	C	D
خليط من الأعشاب والحشائش الضارة Herbaceous-mixture of grass, weeds and low-growing brush, with brush the minor element.	ضعيفة	-	80	87	93
	متوسطة	-	71	81	89
	جيدة	-	62	74	85
خليط من الأشجار والغابات Oak-aspen-mountain brush, mixture of oak brush, aspen, mountain mahogany, bitter brush, maple, and other brush.	ضعيفة	-	66	74	79
	متوسطة	-	48	57	63
	جيدة	-	30	41	48
أشجار الصنوبر والأشجار المماثلة لها Pinyon-juniper-pinyon, juniper, or both; grass understory.	ضعيفة	-	75	85	89
	متوسطة	-	58	73	80
	جيدة	-	41	61	71
الحشائش المتوسطة الحجم Sagebrush with grass understory	ضعيفة	-	67	80	85
	متوسطة	-	51	63	70
	جيدة	-	35	47	55
الحشائش الصغيرة مثل الصبار Saltbrush, greasewood, creosote-bush, blackbrush, bursage, palo verde, mesquite, and cactus	ضعيفة	63	77	85	88
	متوسطة	55	72	81	86
	جيدة	49	68	79	84

تصنيف الظروف الهيدرولوجية: جيدة إذا كان ≥ 70٪ من مساحة الأرض مغطاة بحشائش، متوسطة إذا كان الغطاء من 30-70٪ من مساحة الأرض، ضعيفة إذا كان الغطاء ≤30٪ من مساحة الأرض.

الجدول رقم (6-0): قيم الثوابت المختلفة بالمعادلة (2-) لعاصفة (SCS Type II)

(I_a/P)	C_0	C_1	C_2
0.10	2.55323	0.61512 -	0.16403 -
0.30	2.46532	0.62257 -	0.11657 -
0.35	2.41896	0.61594 -	0.08820 -
0.40	2.36409	0.59857 -	0.05621 -
0.45	2.29238	0.57005 -	0.02281 -
0.50	2.20282	0.51599 -	0.01259 -

الجدول رقم (7-0): معامل التصحيح للجريان السطحي (F) نتيجة وجود برك التجميع والمستنقعات

النسبة المئوية لمساحات برك التجميع والمستنقعات	معامل التصحيح (F)
صفر ٪	1.00
٪ 0.2	0.97
٪ 1	0.87
٪ 3	0.75
٪ 5	0.72

د. التباين في قيمة رقم المنحنى

إن الفواقد التي تستقطع من كميات مياه الأمطار المتساقطة على حوض صرف ما تعتمد بشكل أساسي على خصائص سطح الحوض وطبيعة الأنشطة المقامة عليه، وفي طريقة رقم المنحنى يتم توصيف رقم منحنى الجريان السطحي لحوض الصرف بالنظر في هذين العاملين (خصائص السطح، طبيعة الأنشطة)، وقيمة هذا الرقم تعكس مدى شدة مياه السيول والجريان السطحي فوق سطح الحوض أو مدى ضعفها، فأحواض الصرف ذات الأسطح المصمتة والتربة المكونة لها من الصنف الرابع (Group D) يكون رقم المنحنى لها كبيرًا، أما الأحواض ذات الأسطح الرخوة والتربة المكونة لها من الصنف الأول (Group A) ومعدل التسرب لها عالي القيمة فإن رقم المنحنى لها يكون صغيرًا.

وتستخدم قيم رقم منحنى الجريان السطحي والمعطاة بالجدول من رقم (11-0) وحتى جدول رقم (14-0) لأحواض الصرف ذات التربة التي يكون محتواها الرطوبي في حالة ما قبل العاصفة الممطرة مباشرة (Antecedent Runoff Condition) ذا درجة متوسطة (ARC-II)، وهو ما يعني أن التربة تكون في حالة ليست بالجافة (ARC-I) ولا هي بالرطبة المتشبعة بالمياه الأرضية (ARC-III)، ولكن بين هذه وتلك.

ويوصى أثناء التصميم الهيدرولوجي لشبكات تصريف السيول ومنشآت الحماية من أخطارها بمراعاة أن يتم اعتبار التربة من الدرجة المتوسطة (ARC-II) لدواعي الأمان والسلامة في التصميم، حيث إنه من الوارد حدوث أمطار خفيفة في اليوم السابق للعاصفة تؤدي إلى تشبع جزئي للتربة.

وعلى كل حال يمكن تصحيح رقم المنحنى المعطى بهذه الجداول إذا كان المحتوى الرطوبي للتربة - قبل العاصفة الممطرة مباشرة - ذا درجة دنيا (ARC-I)، بمعنى أن التربة جافة - لكنها لم تصل بعد إلى نقطة الذبول Welting Point - باستخدام المعادلة التالية:

$$CN\ (I) = \frac{4.2 \times CN(II)}{10 - 0.058 \times CN(II)} \quad (21\text{-}1)$$

كما يمكن تصحيح رقم المنحنى المعطي بالجداول إذا كان المحتوى الرطوبي للتربة - قبل العاصفة الممطرة مباشرة - ذا درجة قصوى (ARC-III) بمعنى أن التربة رطبة باستخدام المعادلة التالية:

$$CN\ (III) = \frac{23 \times CN(II)}{10 + 0.13 \times CN(II)} \quad (22\text{-}1)$$

حيث:

- $CN\ (I)$ = رقم المنحنى لحوض الصرف حال أن تكون التربة جافة والمحتوى الرطوبي ذا درجة دنيا.
- $CN\ (II)$ = رقم المنحنى لحوض الصرف حال أن تكون التربة متوسطة الرطوبة والمحتوى الرطوبي ذا درجة متوسطة (II)، وهي القيم الموجودة بالجداول المعطاة.
- $CN\ (III)$ = رقم المنحنى لحوض الصرف حال أن تكون التربة رطبة والمحتوى الرطوبي ذا درجة قصوى.

3-5-7-1 التحليل الإحصائي

في حالة توفر قياسات تدفق من محطة قياس قريبة من موقع التقاطع المطلوب تصميمه يمكن تقدير التدفق التصميمي لفترات العودة المختلفة عن طريق التحليل الإحصائي لقيم التدفق السنوي القصوى، بالطريقة ذاتها التي تم توضيحها سابقًا في التحليل الإحصائي لعمق المطر اليومي.

4-5-7-1 التقديرات الغير مباشرة

عادة لا توجد بيانات محطة القياس في موقع الوادي حيث يوجد عبارة أو جسر. عندما يحدث هذا، فعلى المهندس أن ينقل البيانات إما من داخل ذات الحوض التجميعي للماء أو من الأحواض المجاورة، ليستعملها في تصميم معبر السيل، ولكن فقط من تلك الأحواض المجاورة التي لها خصائص مماثلة.

إن التنبؤ بتدفقات الذروة في حوض مائي غير مقاس تتألف من جزأين. أولا، يجب تحليل بيانات تدفقات الذروة أمام وخلف التقاطع، أو بيانات لحوض مجاور مقاس، كما تم توضيحه سابقًا. ثم إن على المهندس تحويل هذه المعلومات إلى المعبر المطلوب تصميمه باستعمال الطرق البيانية أو التحليلية الموصوفة أدناه.

أ. الطريقة البيانية

بعد أن يتم تحديد تدفقات الذروة لفترات التكرار المنشودة للحوض المائي المجاور، فإن هذه القيم ترسم مقابل معامل الحوض التجميعي للماء إما على ورق رسم بياني عادي أو لوغاريتمي. إن رسم التدفق مقابل مساحة حوض التصريف لهو ما ينصح به. بعد تخطيط هذه النقاط، يتم توفيق منحني ملائم لها باستخدام البرامج المناسبة. ثم يحدد التدفق للموقع المنشود باستعمال هذا المنحني بدلالة معامل ذلك الحوض.

ب. الطريقة التحليلية

توضع التدفقات المحسوبة من التحليل الإحصائي للأحواض المقاسة في شكل قائمة مرفقة بعدة معاملات للحوض التجميعي المائي لكل حوض تم استعماله. بعد ذلك يمكن إجراء تحليل خطي أو ارتدادي لأكثر من متغير، كما هو موضح في أي مرجع إحصائي قياسي. ستمكن نتائج هذا النوع من التحليل من التنبؤ بالتدفق من أي حوض تجميع ضمن تلك المنطقة المعينة من البلاد.

مثال لهذه الطريقة باستعمال معامل واحد فقط وتحليل ارتداد (انحدار) خطي هو كالتالي:

المعادلة للتنبؤ بالتدفق يكون على الصورة:

$$Q = a + b\,X \quad (1\text{-}23)$$

حيث Q هو التدفق، X هو معامل الحوض (الهطول مثلًا) و a و b معاملات يجب تقديرها. هذه التقديرات تحدد بالصيغ التالية:

$$b = \frac{n\sum X_i Q_i - \sum X_i \sum Q_i}{n\sum X_i^2 - (\sum X_i)^2} \quad (1\text{-}24)$$

$$a = \frac{\sum Q_i - b\sum X_i}{n} \quad (1\text{-}25)$$

Xi = معامل (عمق المطر مثلًا)

Qi = التدفقات التي تقابل هذه المعاملات

n = عدد نقاط البيانات المستعملة في التحليل

بعد تحديد كل من a وb فإن معامل الحوض للموقع المعين المطلوب تصميمه يستبدل في المعادلة ويحسب التدفق. وباستعمال مجموعة من فترات التكرار من لأحواض أخرى فإنه يمكن تحديد العلاقة ما بين التردد وتدفق الفيضان. كما يجب على المصمم أيضًا بحث ما إذا كانت العلاقة بين المتغيرات غير خطية واختيار الصورة المناسبة للعلاقة بناءً على ذلك ومن ثم إجراء التحليل باستخدام البرامج الحاسوبية المناسبة.

5-5-7-1 معادلات الانحدار

لقد تم إعداد معادلات انحدار مشابهة لتلك المذكورة أعلاه للاستعمال في المناطق القاحلة والصحراء. وبقليل من التحوير تم نقل هذه المعادلات للاستعمال في المملكة العربية السعودية. وحيثما تتوفر بيانات محدودة يمكن تحديد المعادلات باستعمال الطرق التي وصفت سابقًا. وحيث لا توجد بيانات فإنه يمكن استعمال المعادلات التالية في جدول رقم (0-17) لتخمين تدفق الذروة للحوض. ويتم الرجوع إلى الشكل (6-1) لموقع كل منطقة هيدرولوجية. إن خطأ التخمين المرافق لكل معادلة انحدار تعطي المهندس فكرة عن مدى الثقة التي يجب أن يتمتع بها باستعماله لهذه الطريقة.

الجدول (8-0): معادلات الانحدار لمقادير الفيضان

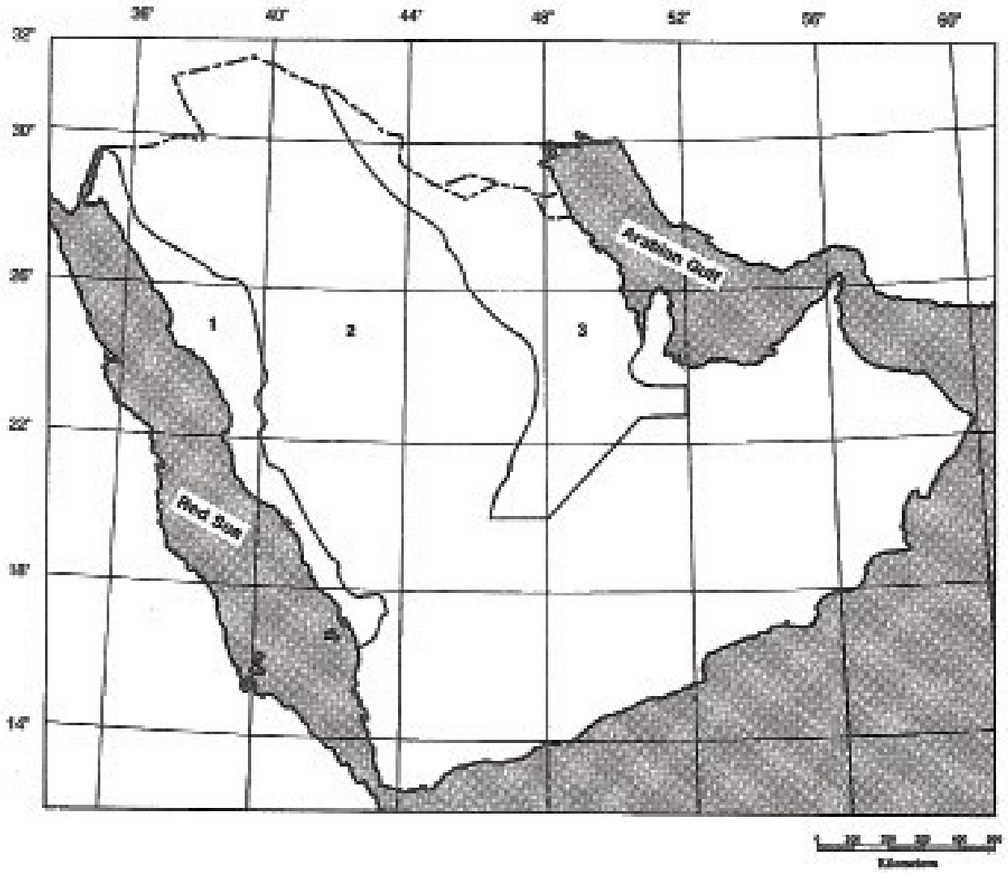
Q_T = مقدار تدفق الفيضان بالأمتار المكعبة في الثانية لفترة التكرار T الموضحة.

A = مساحة التصريف بالكيلومترات المربعة.

E = متوسط ارتفاع الحوض بآلاف الأمتار فوق متوسط مستوى سطح البحر.

P = المتوسط السنوي للهطول بالمليمترات.

المعادلة	الخطأ المعياري للتخمين في المئة
المنطقة الهيدرولوجية 1	
$Q_2 = 1.63\ A^{0.433}$	76
$Q_5 = 3.98\ A^{0.462}$	53
$Q_{10} = 6.34\ A^{0.475}$	53
$Q_{25} = 10.4\ A^{0.487}$	62
$Q_{50} = 14.4\ A^{0.494}$	72
$Q_{100} = 19.4\ A^{0.499}$	83
$Q_{500} = 34.9A^{0.509}$	111
المنطقة الهيدرولوجية 2	
$Q_2 = 0.00147\ A^{0.673}\ E^{-0.605}\ P^{1.03}$	81
$Q_5 = 0.00706\ A^{0.650}\ E^{-0.868}\ P^{0.987}$	64
$Q_{10} = 0.0152\ A^{0.638}\ E^{-1.00}\ P^{0.971}$	58
$Q_{25} = 0.0354\ A^{0.626}\ E^{-1.14}\ P^{0.944}$	58
$Q_{50} = 0.0594\ A^{0.617}\ E^{-1.22} P^{0.933}$	61
$Q_{100} = 0.0969\ A^{0.610}\ E^{-1.30}\ P^{0.915}$	66
$Q_{500} = 0.250\ A^{0.595}\ E^{-1.45}\ P^{0.886}$	78
المنطقة الهيدرولوجية 3	
$Q_2 = 0.355\ A^{0.491}\ E^{2.25}$	83
$Q_5 = 0.426\ A^{0.446}\ E^{3.60}$	74
$Q_{10} = 0.453\ A^{0.423} E^{4.31}$	75
$Q_{25} = 0.490\ A^{0.398} E^{5.10}$	80
$Q_{50} = 0.499\ A^{0.383} E^{5.60}$	85
$Q_{100} = 0.520\ A^{0.369} E^{6.09}$	91
$Q_{500} = 0.544\ A^{0.342}\ E^{7.04}$	107



الشكل (16): مسار المناطق الهيدرولوجية في المملكة العربية السعودية

القسم الثاني
تصميم العبارات

1-1 عام

يهدف هذا الفصل إلى عرض فكرة عامة عن عبارات الطرق السريعة لأغراض التخطيط والتصميم الهيدروليكي. أما الفصل الثاني فيحتوي على ملخص لاعتبارات التصميم بما في ذلك الهيدرولوجيا وبيانات الموقع وتقييمه. بينما يحتوي الفصل الثالث علي معلومات مفصلة عن التصميم الهيدروليكي لجسم العبارة (الحجم والشكل والمادة) وإعدادات المدخل (قطاعات طرف الأنبوب مسبقة الصنع والجدران الأمامية والجدران الجانبية والحافّات والأطراف المستدقة أو المسلوبة).

2-1 مقارنة بين العبارات والجسور ومصارف العاصفة

العبارات والجسور ومصارف العاصفة هي منشآت الهدف منها تنظيم وتسيير مياه العواصف في كل مسارات منظومة الطرق؛ لذا يجب على المصمم أن يقرر طريقة التحليل المستخدمة عند تصميم معابر الطرق (التقاطعات مع المجاري المائية) أو عند بحث بدائل التصميم لمعبر معين. بالنسبة لمعظم معابر الطرق السريعة، ينحصر الاختيار بين الجسور والعبارات. وأحيانًا يكون تحليل شبكات تصريف العواصف لازمًا وهو ما سيتم مناقشته في نهاية هذا القسم.

عند مقارنة العبارات بالجسور، يجب أن يحدد المصمم أي النوعين من المنشآت هو الأفضل بالنسبة لموقع معين، ثم يقرر كيفية تحليل هذا المعبر. على سبيل المثال، يتشابه الجسر الصغير مفرد البحر المتكئ على جدران رأسية، في كثير من النواحي، مع العبارة الصندوقية الكبيرة، وهكذا:

- أيهما أفضل من الناحية الهيدروليكية والجمالية والاقتصادية؟
- كيف ينبغي تحليل المنشأ الذي يتم اختياره (هل يتم تحليله كجسر ذي انسياب سطحي حر باستخدام مفاهيم التدفق المتغير تدريجيًّا في القنوات المفتوحة، أو كعبارة لها عمود مائي عند المدخل بناءً على تحليل العبارات التقليدي)؟

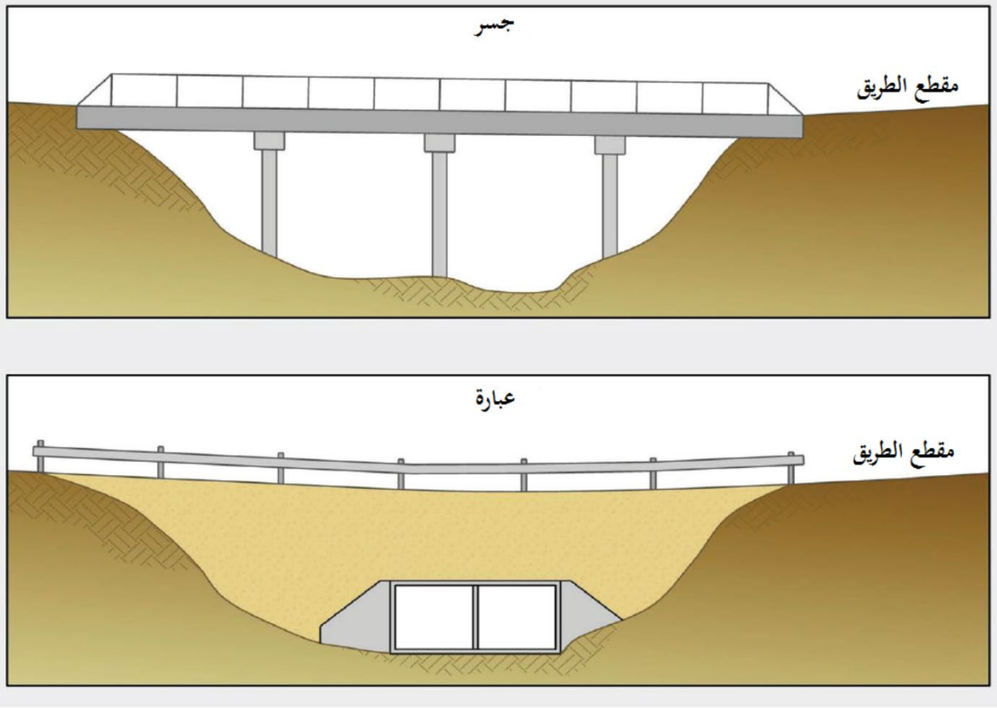
تستخدم العبارات في الحالات التالية:

- عندما لا تكون الجسور مطلوبة هيدروليكيًّا.
- عندما يكون احتمال تجمع المخلفات والحطام أمام العبارة مقبولًا.
- عندما تكون العبارة أفضل اقتصاديًّا من الجسر (وتشمل التكاليف حواجز الحماية وكل ما يختص بالسلامة).

أما الجسور فستخدم في الحالات التالية:

- عندما تكون العبارات غير عملية.
- عندم يكون الجسر أفضل اقتصاديًّا من العبارة.
- لتلبية متطلبات استخدام الأراضي والوصول إليها.
- لتقليل المخاوف البيئية التي لا تحققها العبارات.
- لتجنب تعديات مسارات الفيضان.
- لاستيعاب المخلفات والحطام الكبير.
-

الحسابات الاقتصادية يكون لها دور جوهري، في العادة، في التقرير بين الجسر أو العبارة كحل للمعبر المائي إذا استوفى كلاهما المتطلبات الهيدروليكية والإنشائية. عادةً ما تكون التكلفة الأولية للعبارة أقل من الجسر، حيث يسمح استعمال عمود الماء الزائد عند مدخل العبارة باستخدام فتحة أصغر لتمرير التصريف المطلوب (انظر الشكل 1-1)، مقارنةً بالجسر الذي يتم تصميمه عادةً لتمرير التصريف التصميمي بخلوص حر بين قاع الجسر وسطح الماء. ومع ذلك، يجب موازنة هذه الميزة مع الأضرار المحتملة للفيضانات المرتبطة بعمود الماء الزائد أمام العبارة، وخصوصًا عند التصريفات الأعلى (من التصميم)، أو عند ظهور مشكلات تتعلق بمرور كائنات مائية مثل الأسماك التي غالبًا ما توجب استخدام فتحة أكبر وقاع طبيعي للمعبر المائي.



الشكل (1-1): مقارنة بين الجسر والعبارة في الموقع نفسه

تكاليف صيانة العبارات قد تنجم عن تآكل القناة المائية عند المدخل والمخرج، وتآكل وتلف قاع العبارة، وتراكم الرواسب والمخلفات والحطام، وإصلاح الردم (الحاجز الترابي) في حالة تجاوز الماء قمته. إلا أن صيانة الجسور عادة ما تكون أكثر تكلفة، وتشمل نواحي مثل صيانة سطح الجسر والهيكل العلوي والتآكل حول الدعامات الوسطية والأكتاف وتراكم الرواسب والحطام المحتمل.

وتدخل أيضًا اعتبارات السلامة والحسابات الجمالية في معايير الاختيار بين الجسر والعبارة. تتضمن اعتبارات السلامة الخاصة بالعبارات استخدام حواجز الحماية (الدرابزين) أو شبكات قضبان حديدية للأمان. من المهم الإدراك أن العبارات التي يزيد طول بحرها على 6.1 متر (20 قدمًا) (البحر المفرد لعبارة ذات خلية واحدة أو البحر الكلي لعبارة متعددة الخلايا) تعدُّ جسورًا في معايير فحص الجسور ومن ثم تخضع للفحص الروتيني وفقًا للمتطلبات. قد يعدُّ الجسر أكثر جمالية من العبارة عند عبور الوديان أو الشعب ذات المناظر الخلابة.

هناك اختلافات في الافتراضات الهيدروليكية والتحليل المستخدم في تصميم العبارات والجسور. تحليل التدفق في القنوات المائية المفتوحة (ذات السطح الحر) داخل أو خلال أي منشأ يمكن أن يعتمد على افتراضات العمق العادي البسيطة نسبيًّا أو على حسابات التدفق المتغير تدريجيًّا الأكثر تعقيدًا. عادة يتم الاستناد إلى تحليل العمق العادي للماء في القناة أسفل المجرى بعد العبارة لتحديد وضع الماء خلف العبارة. بالإضافة إلى ذلك، غالبًا ما يتم في افتراضات تحليل العبارات تجاهل السرعات عند الاقتراب من مدخل العبارة أو عند قناة أسفل المجرى مباشرةً خلف العبارة، التي تؤدي للمبالغة في تقدير خسائر طاقة الدخول والخروج. في المقابل، يعتمد التحليل الهيدروليكي للجسور عادةً على حسابات التدفق المتغير تدريجيًّا التي تعطي صورة أدق لسطح الماء على طول المعبر، والتي تأخذ في الحسبان سرعات الاقتراب والخروج من المنشأ.

في النهاية، عادةً ما يكون تحليل العبارات الكبيرة ذات التدفق السطحي الحر عبر المنشأ (أي لا يوجد عمود مائي) استنادًا إلى مفاهيم التدفق المتغير تدريجيًا في القنوات المفتوحة والمستخدم في تحليل الجسور أفضل من الإجراءات الحسابية المفصلة في هذا القسم. تصميم المنشآت الصغيرة يكون أسهل باستخدام التحليل الهيدروليكي والإجراءات القائمة على العبارات. استنادًا إلى اللوائح، بالإضافة إلى المشكلات الهيدروليكية، يكون استخدام النمذجة الهيدروليكية القائمة على تحليل الجسور لعبارة فردية ذات بحر يساوي 6.1 متر أو أطول توجهًا معقولاً، نظرًا لأن تلك المنشآت ستعمل عادةً بموجب التدفق الحر للسطح المائي. بالنسبة إلى المعابر الصغيرة التي قد تستخدم أنابيب أو صناديق كبيرة، لأغراض مرور الكائنات المائية مثلاً، فإن النمذجة الهيدروليكية القائمة على تحليل الجسور قد تكون أكثر ملاءمة مجددًا نظرًا لظروف التدفق الحر المتوقعة للسطح المائي.

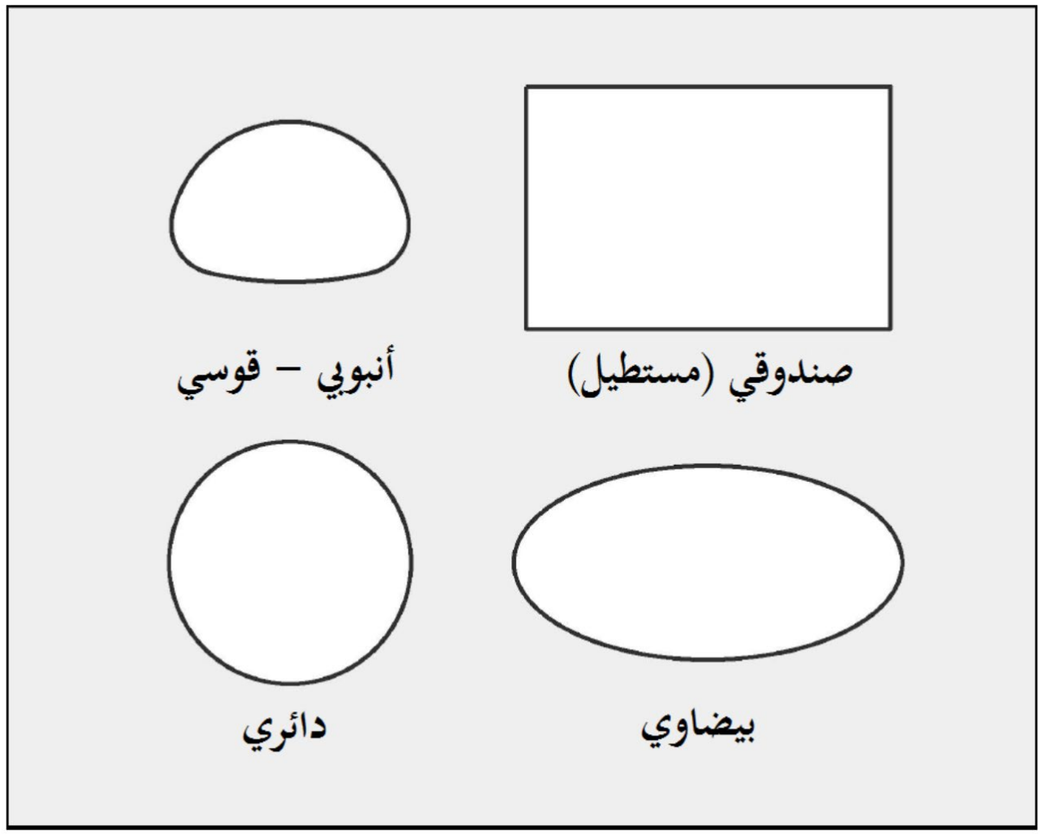
في ناحية أخرى، متى تكون العبارة الطويلة مشابهة لنظام تصريف عواصف «قصير»؟ إذا كانت هناك نقاط دخول لتصريفات متعددة على طول العبارة (مثل مصارف الطرق أو الجزيرة الوسطي)، أو تغييرات هندسية متعددة (الانحناءات، أو تغيرات في حجم الأنبوب، أو تغييرات في الانحدار، وما إلى ذلك)، أو تغييرات محتملة في نظام التدفق داخل العبارة، قد يكون تحليل شبكات تصريف العواصف الأقوى إجمالاً وبرامج الكمبيوتر أفضل من استخدام إجراءات تحليل العبارات الموضحة في هذا الدليل.

3-1 نظرة عامة على العبارات

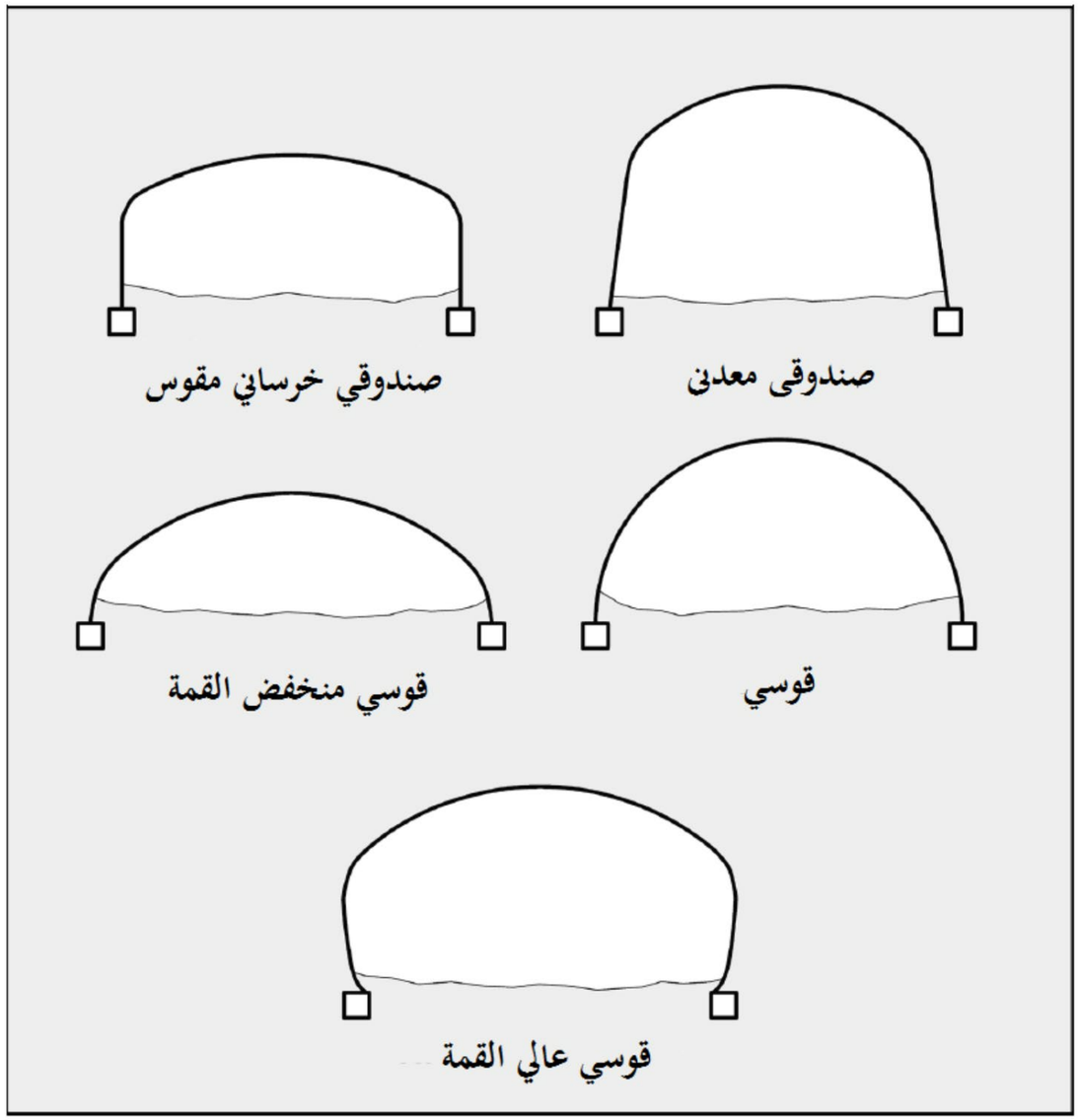
العبارة هي قناة تسمح بمرور الماء تحت طريق أو سكة حديد أو أي نوع من العوائق الأخرى ويكون غالبًا مطمورًا تحت حاجز أو ردم ترابي. تصنع العبارات من مجموعة متنوعة من المواد وهي متوفرة في العديد من الأشكال وبإعدادات مختلفة. عوامل انتقاء العبارة المناسبة تشمل المقطع الطولي للطريق، وخصائص القناة، وتقييم أضرار الفيضانات، وتكاليف البناء والصيانة، وتقديرات عمر الخدمة.

1-3-1 الأشكال

هناك العديد من أشكال المقطع العرضي لكل من عبارات القاع المقفل والمفتوح. أكثر أشكال العبارات المقفلة القاع شيوعًا هي الدائرية، والصندوقية (المستطيلة)، وبيضاوية الشكل، والأنبوبية - القوسية (انظر الشكل 2-1). هذه الأشكال تصنع بشكل نمطي من نفس المادة على محيط العبارة بأكمله. يعتمد اختيار الشكل على تكلفة الإنشاء، والقيود المفروضة على منسوب سطح الماء عند المدخل، وارتفاع ردمية الطريق، والأداء الهيدروليكي. يمكن إنشاء هذه الأشكال بأسلوب الدفن وهو غرز جزء منها أسفل قاع المجرى المائي عند أدنى نقطة للمدخل والمخرج. تضم وسائل التصميم الملحقة بهذا القسم الأشكال الدائرية والصندوقية فقط. العبارات المفتوحة القاع النموذجية تضم أشكالاً متنوعة لها تكوينات صندوقية وقوسية مختلفة مبينة في الشكل (3-1). الأشكال القياسية المتوفرة في برنامج الكمبيوتر HY-8 الذي توفره إدارة الطرق السريعة الفيدرالية FHWA الأمريكية لتصميم العبارات تشتمل أشكال المقاطع العرضية الموضحة في الشكلين (2-1) و(3-1) إلى جانب أشكال أخرى تحدد من قِبل المستخدم.



الشكل (1-2): أشكال العبارات الشائعة الاستخدام



الشكل (1-3): الأشكال الاعتيادية للعبارات مفتوحة القاع

2-3-1 المواد

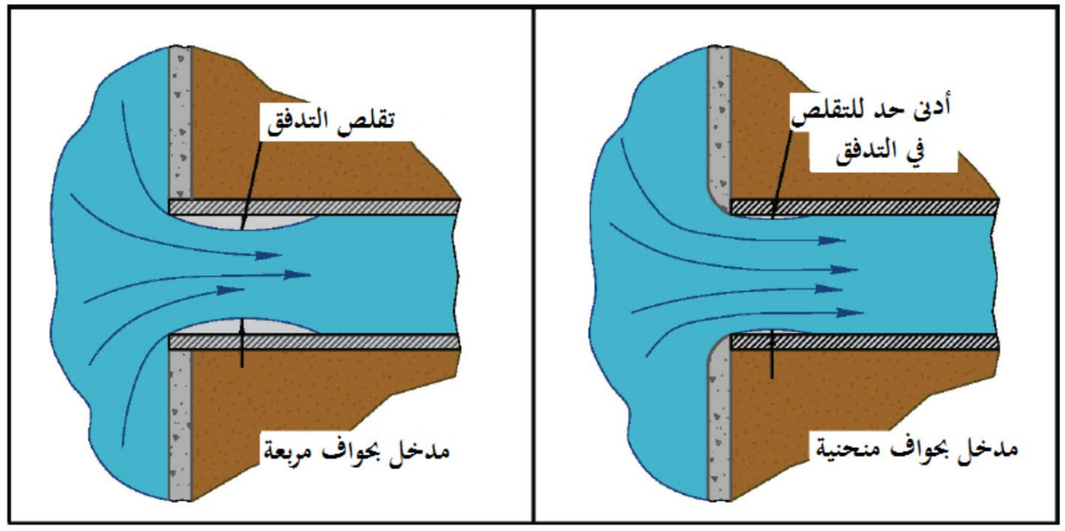
يعتمد اختيار مادة العبارة على عوامل عدة منها القوة الإنشائية (الهيكلية) والخشونة الهيدروليكية والقدرة على التحمّل (مقاومة التآكل والاحتكاك) والقابلية للبناء. أكثر المواد المستخدمة في إنشاء العبارات هي الخرسانة (كلتاهما المسلحة أو غير المسلحة)، والمعادن المموجة (الألومنيوم أو الصلب) والبلاستيك (البولي إيثلين عالي الكثافة (HDPE) أو كلوريد البولي فينيل (PVC)). تشتمل المواد الأقل استخدامًا على الصلصال (الطين) والحجر والخشب، إذ يمكن العثور عليها في هياكل العبارات التاريخية وهي مواد غير معتادة في إنشاء العبارات الحديثة. المواد التي تصنع منها العبارات تتطور باستمرار، ويمكن أن تشمل في المستقبل أنواعًا مختلفة من المواد البلاستيكية والألياف الزجاجية والمواد المركبة. يمكن أيضًا تبطين العبارات بمواد أخرى لمنع التآكل والاحتكاك، أو لتقليل المقاومة الهيدروليكية. على سبيل المثال، يمكن تبطين العبارات المعدنية المموجة بالخرسانة الإسفلتية أو بمادة بوليميرية لتقليل الخشونة.

3-3-1 المداخل

تستعمل العديد من الإعدادات المختلفة للمدخل مع جسم العبارة. وتشمل الإعدادات تركيبات من نوعين، إما مسبقة التجهيز أو مشيدة بالمكان. وعادة ما يتم إعداد مدخل العبارة إما بإبراز جزء منها خارج الردم، أو بإنشاء جدران خرسانية أمامية وجانبية مصبوبة بالمكان حول المدخل، أو بتركيب قطاعات طرفية للعبارة مسبقة الصب أو الصنع، أو بتتويج طرف العبارة (أو شطبه بزاوية) ليتوافق مع انحدار الردم الترابي (انظر الشكل 4-1). اختيار الإعدادات المختلفة لمداخل العبارات يؤخذ فيه اعتبارات عدة تتعلق بالأداء الهيدروليكي، والثبات الإنشائي، والشكل الجمالي، والحد من التآكل، والمحافظة على الردم.

الشكل (1-4): أربعة إعدادات اعتيادية للمدخل

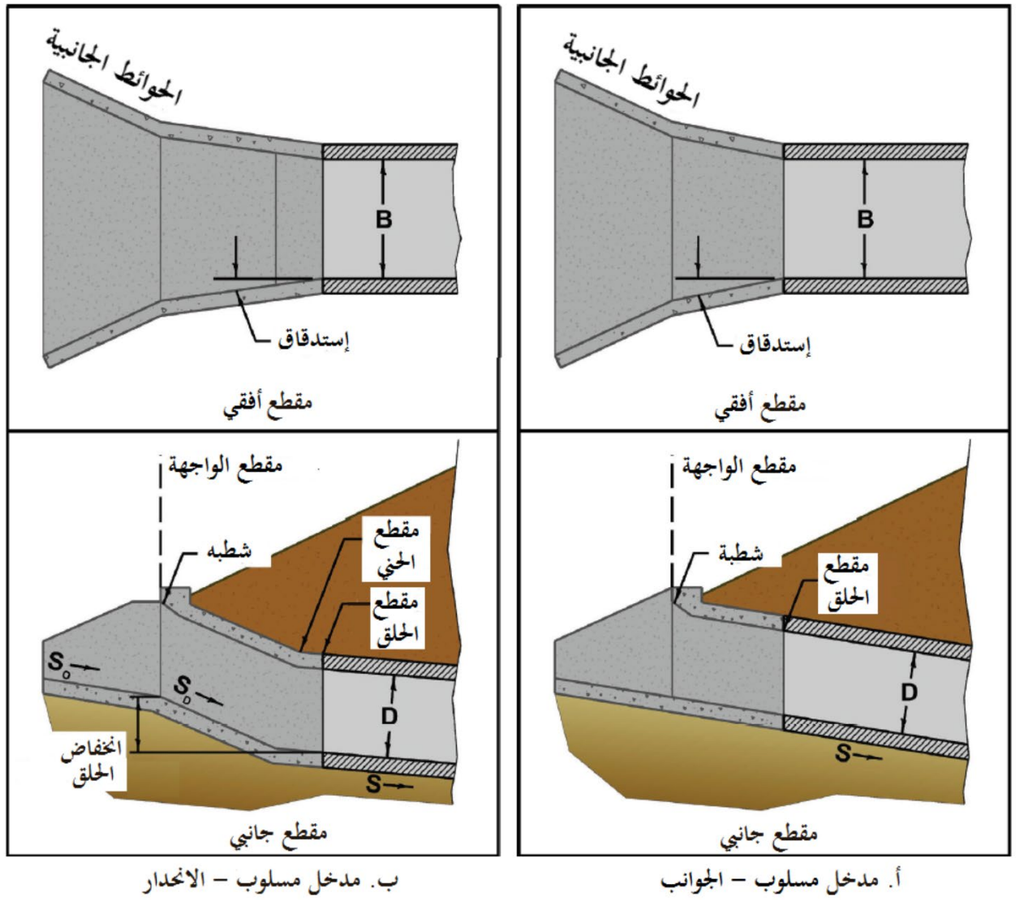
يمكن تحسين السعة الهيدروليكية للعبارة عن طريق اختيار مدخل مناسب. غالبًا ما تكون القناة المائية أو المجرى المائي المغذي للعبارة أكبر من وعاء العبارة (الأسطوانة أو الصندوق)؛ ما يسبب تقلصًا في الماء المتدفق عبر مدخل العبارة نتيجة التبدل المفاجئ في مقطع الانسياب. وقد يكون هذا التقلص حاكمًا أساسيًا للتدفق عبر العبارة. وهكذا فإن تزويد أو معالجة مدخل العبارة بما يحقق الانتقال التدرجي للتدفق يقلل من فقدان الطاقة ومن ثم يصنع وضعًا أكفأ عند المدخل من الناحية الهيدروليكية (انظر الشكل 5-1). ومن ثم تكون حواف المدخل المشدوفة أو المشطوفة أكفأ من الحواف الحادة المربعة.



الشكل (1-5): تقلص الماء عند المدخل

المداخل المسلوبة الجوانب والمسلوبة الانحدار، والتي يشار إليها عادة باسم المداخل المسلوبة أو المستدقة، تقلل من تقلص التدفق أكثر عند المدخل. يوضح الشكل 6-1 نوعين من المداخل المسلوبة، مسلوب- الجوانب ومسلوب- الانحدار. كذلك خفض العبارة يمكن أن يزيد الضاغط المائي الفعال على المقطع المنظم للتدفق، ومن ثم يؤدي إلي زيادة كفاءة العبارة. يمكن أن يكون الخفض إما خفضًا للمدخل أو خفضًا للحلق.

عند النظر في استخدام مدخل مسلوب أو مستدق، يجب على المصمم تقييم الزيادة في تكلفة إنشاء العبارة الناتجة عن إضافة هذا القطاع مقابل التوفير في تكلفة الأنبوب. فضلًا عن ذلك، إذا كان مرور الكائنات المائية خلال العبارة مهمًا، فإن التصغير في حجم الأنبوب الناتج عن المدخل المسلوب في العادة لا يكون بديلًا تصميميًا مقبولًا. غير أنه عندما تكون المداخل المستدقة مجدية اقتصاديًا، فإن التحسن في الأداء الهيدروليكي في بعض الحالات يكون ملحوظًا. واحد من الأمثلة النموذجية لاستخدام المداخل المسلوبة ربما يكون في حالة العبارة طويلة نسبيًا وذات انحدار حاد، وهو ما قد يقع في المناطق الحضرية. قد يكون هناك تطبيق آخر في حالة مشروع لتوسيع طريق، حيث يكون أنبوب العبارة القديم في حالة جيدة، ولكنه صغير الحجم نتيجة للتحضر الحادث في المنطقة الذي أدى إلى زيادة تصريفه التصميمي. بدلًا من استبدال العبارة القديمة وما يرتبط به من تكلفة وتعطيل حركة المرور، يمكن تصميم مدخل مسلوب كجزء من امتداد العبارة لتحسين كفاءتها الهيدروليكية. كذلك في حالة إعادة تأهيل عبّارة تحت ردم عال ربما يكون استخدام المدخل المسلوب عند البداية عوضًا عن وضع بطانة للعبارة تقلل من مساحة المدخل وحجم الأنبوب.



الشكل (1-6): رسم تخطيطي للمداخل مسلوبة - الجوانب ومسلوبة - الانحدار

4-3-1 وظيفة العبارة

تؤدي العبارات مجموعة متنوعة من الوظائف الهيدروليكية وغير الهيدروليكية. الوظيفة الهيدروليكية المعتادة للعبارة هي توفير معبر للمجرى المائي عند التقاطعات، كما هو موضح سابقًا في هذا الفصل. تشمل الوظائف الهيدروليكية الأخرى تخليص سهول الفيضان، حيث يمكن وضع عبارة أعلى ضفة سهل فيضاني واسع لتصريف تلك المنطقة خلال أحداث الفيضان الكبيرة. غالبًا ما تكون تلك العبارات جافة لسنوات طويلة ولا يحدد لها قنوات تصريف عند المدخل أو المخرج. كما تقوم العبارات الصغيرة غالبًا بتخليص قنوات الصرف الجانبية على طول الطريق؛ ما يؤدي إلى تحويل أو تبديد جزء من تصريف تلك القنوات. ويتم استخدام العبارات أيضًا في منشآت التحكم في المخارج الخاصة ببرك الاحتجاز ومنشآت تسيير المياه المختلفة. تشمل الوظائف غير الهيدروليكية منشآت العبور للمرور البشري أو الحيواني، مثل معابر المشاة أو الممرات، ومعابر الماشية، ومنافذ معدات المزارع، والمعابر المصممة لتسهيل حركة الحياة البرية.

4-1 هيدروليكا العبارات

التحليل النظري الكامل لهيدروليكا العبارات القائم على المعادلات الأساسية قد يكون صعبًا. وذلك لأن ظروف التدفق في العبارة الواحدة تختلف بمرور الوقت. كما أن أنبوب العبارة قد يملؤه التدفق بالكامل أو بشكل جزئي وفقًا لظروف المجرى المائي أمام وخلف العبارة، ولخصائص الأنبوب، وللشكل الهندسي للمدخل. نتيجة لهذا الفهم ولعدم وجود منهجية متوافقة لتصميم العبارات قامت الإدارة الفيدرالية للطرق السريعة (FHWA) بدءًا من خمسينيات القرن الماضي بإجراء أبحاث في مختبرات المكتب القومي للمعايير (NBS). أسفرت هذه الأبحاث عن سلسلة من سبعة تقارير بحثية. تم استخدام تلك المعادلات لتطوير رسوم بيانية (نوموغرافات أو آباكات) لتقييم هيدروليكا العبارات (الملحق 1). هذه الرسوم البيانية هي أساس إجراءات تصميم العبارات التي طورتها الإدارة الفيدرالية للطرق السريعة (FHWA) والتي نُشرت لأول مرة في دورية التصميم الهيدروليكي لعبارات الطرق السريعة HEC-5 لسنة 1965.

كان النهج الأساسي المطروح في HEC-5 نهجًا محافظًا يعتمد على تحليل العبارة حسب الأنواع المختلفة من ضوابط التدفق ومن ثم تصميمها حسب النظام الذي ينتج الحد الأدنى من أداء هيدروليكي للعبارة. وهكذا فإن التصميم حسب الحد الأدنى للأداء الهيدروليكي للعبارة يتجاهل الظروف المؤقتة التي قد ينتج عنها فترات من الأداء الأفضل. مزايا التصميم حسب الأداء الأدنى هي سهولة التصميم وضمان أن الأداء سيكون كافيًا في ظل الظروف الهيدروليكية غير المواتية.

1-4-1 حالات التدفق

قد يملأ التدفق أنبوب العبارة بكامل طوله أو بشكل جزئي كمل سبق ذكره. ولكن التدفق بكامل الطول نادر الحدوث. بشكل عام، هناك على الأقل جزء من الأنبوب يكون غير مملوء بالكامل ويكون التدفق فيه جزئيًا. الطريقة الوحيدة لتحديد طول الأنبوب الذي يكون التدفق فيه تامًا (بكامل المقطع العرضي للعبارة) هي إجراء حسابات شاكلة سطح الماء على طول العبارة.

1-1-4-1 التدفق التام أو الكامل

إذا ملأ التدفق العبارة بكامل طولها فيطلق على تلك الحالة الهيدروليكية التدفق المضغوط ويكون المحرك الرئيسي للجريان في العبارة هو الضغط المائي؛ ولذلك فإن زيادة مساحة المقطع العرضي للعبارة (تكبير العبارة) في حالة التدفق المضغوط يؤدي إلى اتساع مساحة التدفق – وهي المساحة التي يملؤها الماء في المقطع العرضي للعبارة - ومن ثم لزيادة مقدار التدفق.

أحد الظروف التي يمكن أن توجد تدفقًا مضغوطًا في العبارة هي الضغط المرتد الناتج عن ارتفاع منسوب سطح الماء في قناة أسفل المجرى (بعد مخرج العبارة)، ويمكن أيضًا أن يَحدُث تدفق مضغوط بسبب ارتفاع منسوب سطح الماء في قناة أعلى المجرى (قبل مدخل العبارة).

بغض النظر عن المسببات فإن السعة الهيدروليكية للعبارة التي تعمل وفقًا للتدفق المضغوط تتأثر بالظروف قبل مدخل العبارة وبعد مخرجها (الظروف في أعلى وأسفل المجرى) وبالخصائص الهيدروليكية للعبارة.

2-1-4-1 التدفق الجزئي (تدفق حر السطح)

يمكن تصنيف التدفق حر السطح أو التدفق الجزئي في العبارة إلى ثلاثة أصناف أو أنظمة، مثلما يتم تصنيف التدفقات في القنوات المفتوحة: التدفق تحت الحرج والحرج وفوق الحرج. ويتم تحديد نظام الموافق من خلال تقييم الرقم اللابعدي، Fr، والذي يطلق عليه رقم فرويد:

حيث: $$F_r = \frac{V}{\sqrt{gy}}$$

V : متوسط سرعة التدفق (م/ثا)

g : تسارع الجاذبية الأرضية (م/ثا2)

y : العمق التمثيلي (م) وعادة ما يكون العمق المكافئ أو العمق الهيدروليكي.

غالبًا ما يستخدم العمق المكافئ لتعريف العمق التمثيلي في المقطع الدائري ويتم تعريفه على أنه الجذر التربيعي لنصف مساحة التدفق المستعرض $\sqrt{A/2}$.يستخدم العمق الهيدروليكي للأشكال الأخرى ويتم حسابه عن طريق قسمة مساحة التدفق المستعرضة على عرض سطح الماء الحر (A/ T).

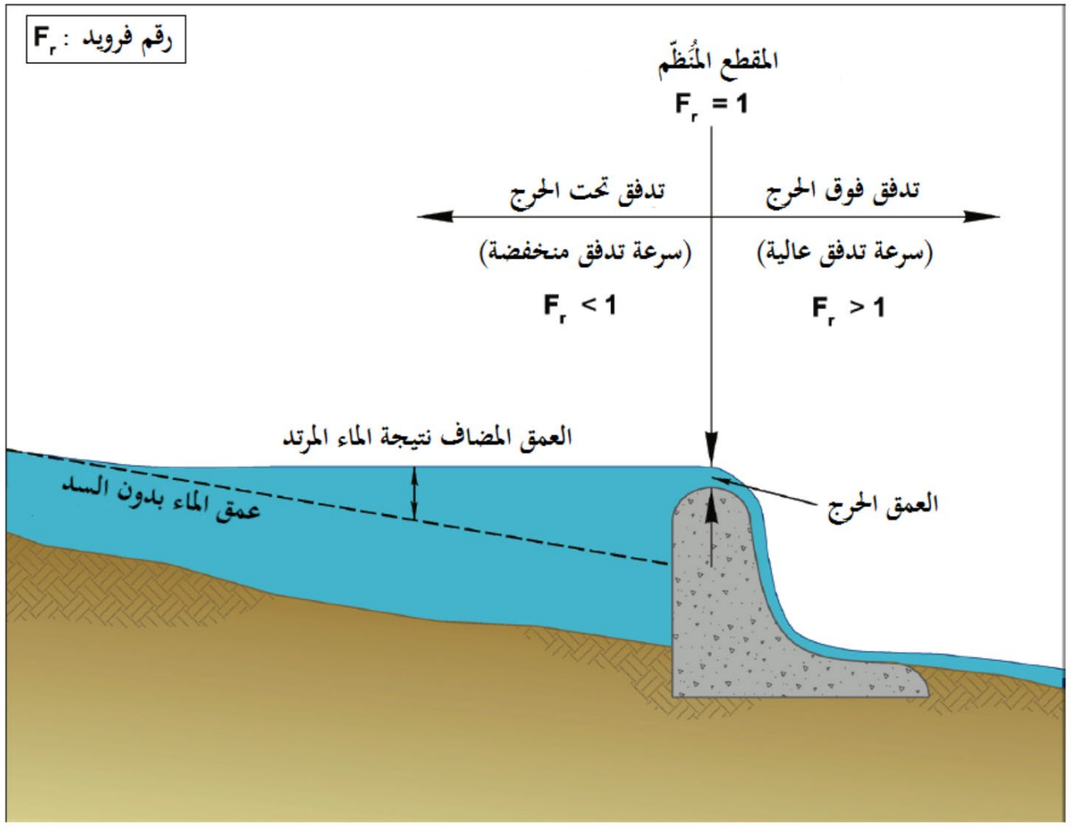
عندما يكون رقم فرويد أكبر من الواحد Fr > 1.0، يكون التدفق فوق الحرج ويتسم بالجريان المندفع.

عندما يكون رقم فرويد أقل من الواحد Fr <1.0، يكون التدفق دون الحرج ويتميز بالجريان الهادئ.

إذا كان رقم فرويد يساوي الواحد Fr = 1.0، يتم تعريف التدفق على أنه حرج.

يمكن توضيح أنظمة التدفق الثلاثة بتمثيل لسد صغير في الشكل 7-1. يحدث التدفق تحت الحرج في أعلى المجرى قبل قمة السد، حيث يكون الماء عميقًا والسرعة منخفضة. أما التدفق فوق الحرج فيحدث في أسفل المجرى بعد القمة، وتكون المياه ضحلة والسرعة عالية. ويقع التدفق الحرج عند قمة السد ويمثل نقطة الانقسام والتحول بين نظام التدفق تحت الحرج ونظام التدفق فوق الحرج. ولتحليل أصناف التدفق حر السطح، يجب أولاً تحديد نقطة على الشكل معروفة العمق والتدفق (وتدعى المقطع المنَظّم). توجد علاقة محددة بين العمق الحرج والتدفق الحرج عند قمة السد؛ ما يجعله مقطعًا مُنَظّمًا مناسبًا.

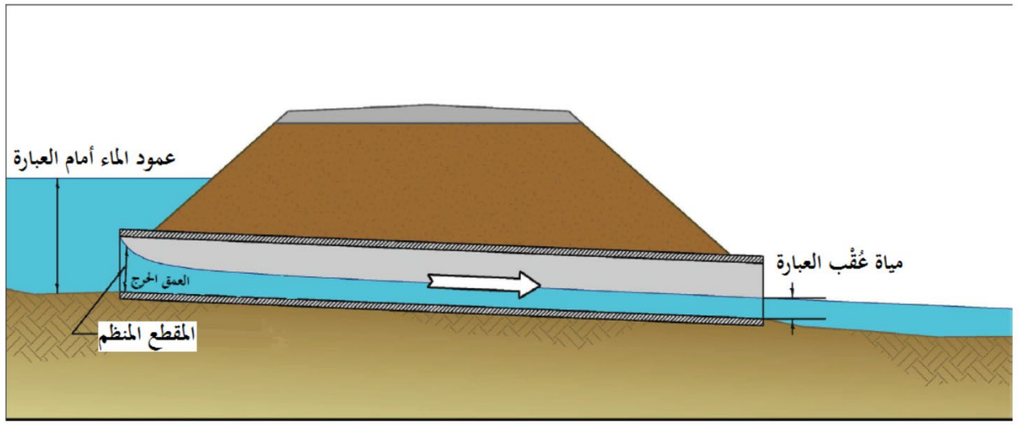
لمواصلة تحليل أصناف التدفق حر السطح يجب أن يتم تحديد التدفق تحت الحرج وفوق الحرج. المثال باستخدام السد في الشكل (7-1) يصور كلا نظامي التدفق. يمكن أن تتأثر خصائص التدفق تحت الحرج، مثل العمق والسرعة، بأي اضطرابات أو قيود للسريان في أسفل المجرى. على سبيل المثال، إذا تم وضع عائق على قمة السد (المقطع المنظم)؛ فإن مستوى الماء سيرتفع عند أعلى المجرى. أما نظام التدفق فوق الحرج، فلا تتأثر خصائصه بالاضطرابات في أسفل المجرى. على سبيل المثال، إذا وضع عائق عند قاعدة السد أسفل المجرى فإنه لن يؤثر في مستويات المياه في أعلى المجرى عند قمة السد.



الشكل (1-7): أصناف (أنظمة) التدفق فوق سد صغير

نـوع التدفـق الموضـح بمثـال السـد الصغـير نفسـه قـد يحـدث في عبـارة شـديدة الانحـدار تتدفـق تدفقًـا جزئيًـا (تدفـق حـر السـطح) (انظـر الشـكل 8-1). في هـذه الحالـة، يقـع العمـق الحـرج عنـد مدخـل العبـارة، ويوجـد التدفـق تحـت حـرج قبـل مدخـل العبـارة في أعـلى المجـرى ويوجـد التدفـق فـوق حـرج داخـل أنبـوب العبـارة.

يوجـد نـوع خـاص مـن التدفـق حـر السـطح يطلـق عليـه "تدفـق كامـل- بالـكاد". وهـي حالـة خاصـة تحـدث حينـما يتدفـق الأنبـوب ممتلئًـا بكامـل طولـه ولكـن دون حـدوث ضغـط للـماء داخـل العبـارة. في هـذه الحالـة يمـس سـطح المـاء قمـة الأنبـوب بالـكاد. ويتـم تحليـل هـذا النـوع مـن التدفـق بـذات الإجـراءات الخاصـة بالتدفـق حـر السـطح.



الشكل (1-8): مقطع لتدفق نظام المدخل نموذجي

2-4-1 أنواع ضوابط التدفق

هنـاك نوعـان أساسـيان مـن ضوابـط (أو أنظمـة) التدفـق في العبـارات، تـم تحديدهـما في الأبحـاث التـي أجرتهـا إدارة الطـرق السريعـة الفيدراليـة FHWA والمكتـب القومـي للمعايـير (NBS) في الولايـات المتحـدة الأمريكيـة، وهـما نظامـي المدخـل والمخـرج. وكان الأسـاس في وضـع هـذه النظـم التصنيفيـة هـو موقـع المقطـع المنُظّـم للتدفـق في العبـارة. تحديـد خصائـص الضغـط المـائي وأنظمـة التدفـق تحـت الحرجـة وفـوق الحرجـة تلعـب دورًا مهـمًا في تحديـد موقـع المقطـع المنظـم في العبـارة، ومـن ثـم في تحديـد نـوع نظـام التدفـق في الحـالات المدروسـة. عمومًـا، تعتمـد السـعة الهيدروليكيـة للعبـارة عـلى مجموعـة مختلفـة مـن العوامـل لـكل نـوع تلـك الأنظمـة.

1-3-2-2 نظام المدخل

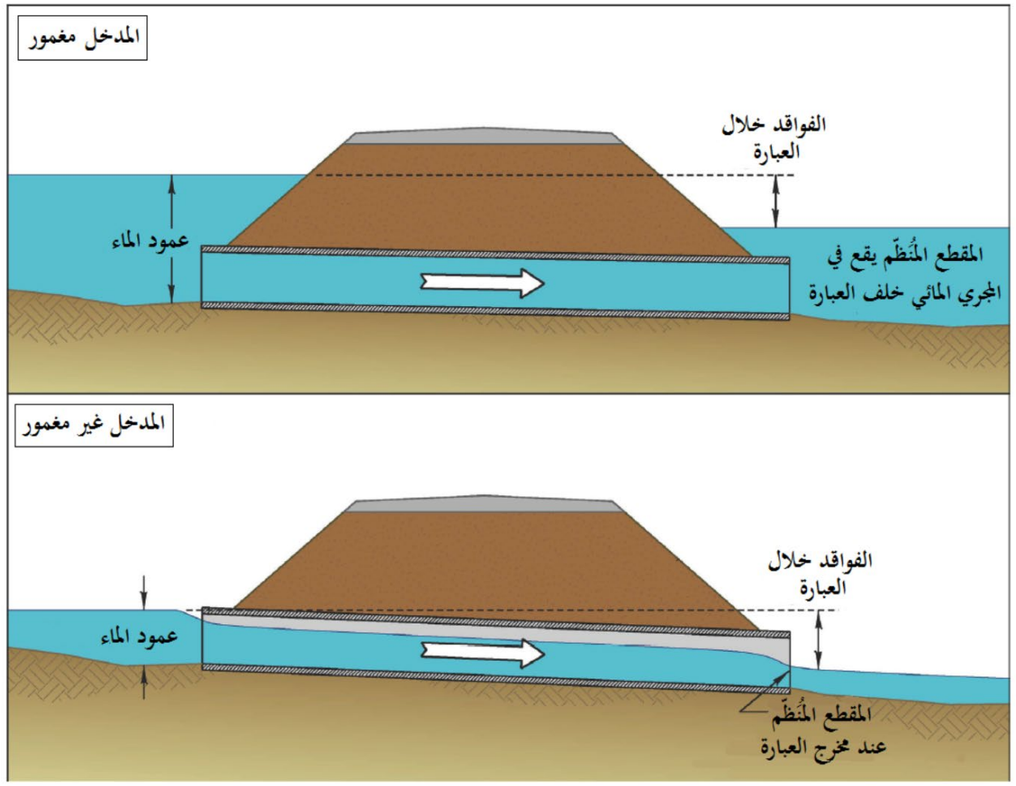
يحـدث هـذا النظـام (نظـام المدخـل) عندمـا يكـون أنبـوب (أو صنـدوق) العبـارة قـادرًا عـلى نقـل تدفـق أكبـر مـما يقبلـه المدخـل. يقـع المقطـع المنظـم في العبـارة التـي تعمـل وفقًـا لنظـام المدخـل قـرب المدخـل مـن الداخـل بفـارق بسـيط جـدًا. ويقـع العمـق الحـرج أيضًـا عنـد هـذا الموقـع أو بالقـرب منـه، ويكـون نظـام التدفـق الحـادث في المجـرى مباشـرة بعـد هـذا الموقـع تدفقًـا فـوق الحـرج. يوضـح الشـكل (8-1) حالـة تدفـق نموذجيـة حسـب نظـام المدخـل. في هـذا النظـام لا تؤثـر الخصائـص الهيدروليكيـة للعبـارة والقنـاة المائيـة بعـد المقطـع المنظـم (المدخـل) في السـعة الهيدروليكيـة للعبـارة. وهكـذا، فـإن منسـوب سـطح المـاء في أعـلى المجـرى (أو عمـق عمـود المـاء) قبـل المدخـل وهندسـة المدخـل يمثـلان عنـصري التحكـم الرئيسـين في التدفـق عـبر العبـارة. وتتضمـن هندسـة المدخـل، شـكل المدخـل ومسـاحة المقطـع المسـتعرض للمدخـل وإعـدادات المدخـل (انظـر الجـدول رقـم (1-1).

2-3-2-2 نظام المخرج

يحـدث هـذ النظـام (نظـام المخـرج) عندمـا يكـون أنبـوب (أو صنـدوق) العبـارة غـير قـادر عـلى نقـل تدفـق يكافـئ مـا يقبلـه المدخـل. يقـع المقطـع المنظـم في العبـارة التـي تعمـل وفقًـا لنظـام المخـرج عنـد مخـرج الأنبـوب أو أبعـد منـه في اتجـاه المجـرى مـائي. وفقًـا لهـذه الظـروف، يكـون نظـام التدفـق الحـادث في أنبـوب العبـارة إمـا تدفقًـا تحـت الحـرج أو تدفقًـا مضغوطًـا. يوضـح الشـكل (9-1) حالتـين نموذجيتـين للتدفـق حسـب نظـام المخـرج. في هـذا النظـام تلعـب جميـع الخصائـص

الهندسية والهيدروليكية للعبارة دورًا في تحديد سعتها الهيدروليكية. تشمل هذه الخصائص جميع العوامل التي تحكم نظام المدخل، ومنسوب سطح الماء عند المخرج، وخصائص الأنبوب. انظر الجدول رقم (1-1).

تميز العوامل في الجدول رقم (1-1) بين الخصائص الهندسية للمدخل وأنبوب العبارة للأخذ في الحسبان تأثير المداخل المسلوبة (المستدقة) المستخدمة في بعض العبارات. بالنسبة للعبارات غير المسلوبة (التقليدية)، يتطابق مدخل العبارة والأنبوب في مساحتي المقطع العرضي والشكل. ويُطلق على انحدار العبارة «انحدار الأنبوب» لتمييزه عن معاملات الميل الأخرى التي قد توجد عند المدخل، على سبيل المثال عند استخدام مدخل منخفض عن قاع المجرى المائي. ويعد انحدار الأنبوب هو العامل الرئيس في التأثير في عمل العبارة حسب نظام المدخل أو نظام المخرج. في حالة العبارات المتوّجة (انظر الفقرة 3-3-1)، يكون طول الأنبوب مبنيًا على النقطة التي يتقاطع عندها قمة العبارة (التاج) مع منحدر الردم.



الشكل (1-7): حالات تدفق نظام المخرج النموذجية

الجدول رقم 1-0: العوامل المؤثرة في تصميم العبارات.

العامل	نظام المدخل	نظام المخرج
عمود الماء عند المدخل	X	X
مساحة مقطع العبارة	X	X
شكل العبارة	X	X
إعدادات المدخل	X	X
خشونة الأنبوب (المقاومة)	-	X
طول الأنبوب	-	X
انحدار الأنبوب (الميل الطولي)	X	X
ماء عُقْب العبارة	-	X
ملحوظة: عاملا المساحة والشكل يتعلقان بمساحة وشكل المدخل في نظام المدخل، بينما عاملا المساحة والشكل يتعلقان بمساحة وشكل الأنبوب في نظام المخرج.		

3-4-1 عمود الماء عند المدخل

الطاقة ضرورية لدفع الماء المتدفق عبر العبارة. تظهر هذه الطاقة كزيادة في منسوب سطح الماء في الجانب العلوي من العبارة عند المدخل (كعمود من الماء زائد). عمومًا، يطلق على العمق المقاس من سطح الماء في الجانب العلوي من العبارة إلى أدنى نقطة على مدخل العبارة – عمق عمود المدخل (Headwater Depth) (انظر الشكلان 8-1 و9-1).

قد يبرك الماء بكميات كبيرة في الجانب العلوي من العبارة في حالة ما إذا كانت تحت ردمٍ عالٍ أو في منطقة بها أرضية مسطحة. في تلك الحالة قد تُضعِف أو تُخمِد البركة التي أوجدتها العبارة من تدفق الذروة للفيضان، على غرار الإخماد الناجم عن خزان أو بحيرة خلف سد. على الرغم من أن هذا التخفيض في تصريف الذروة للفيضانات قد يبرر التخفيض (أو التصغير) في حجم العبارة المطلوبة، إلا أن هذا ليس من الممارسات شائعة الاستخدام في تصميم العبارات.

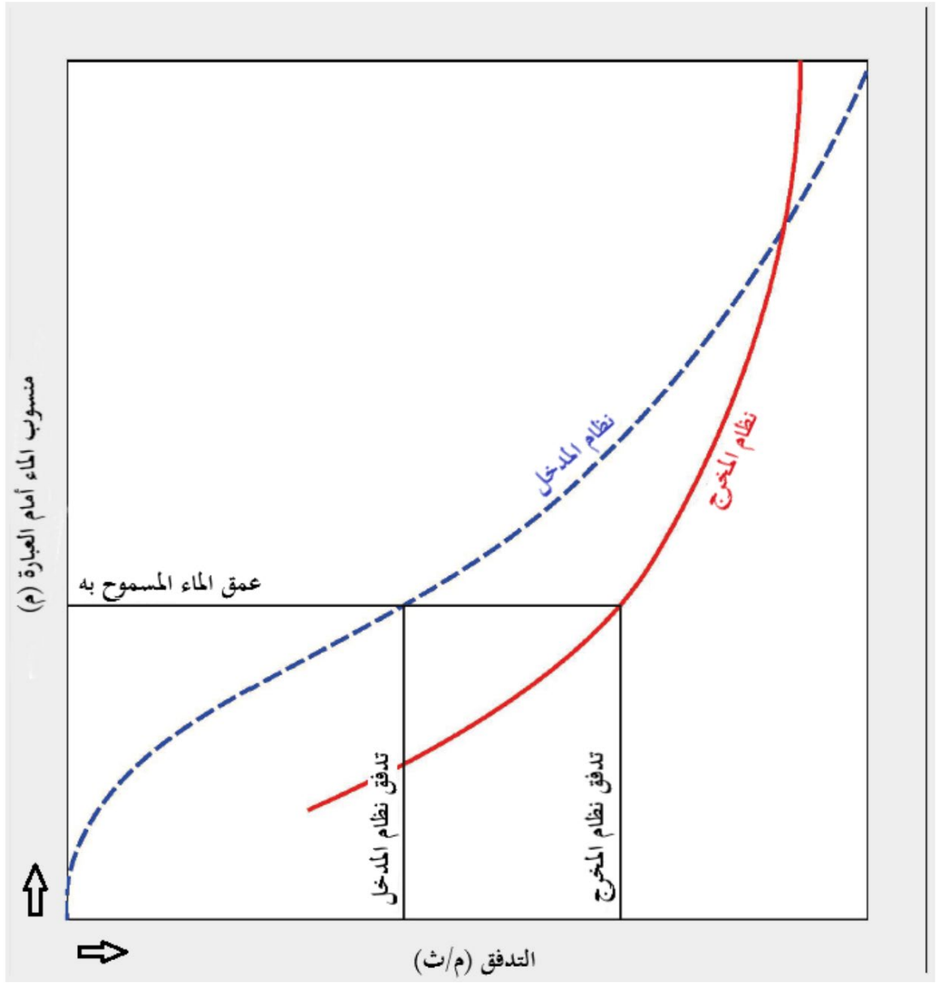
3-4-1 سرعة المخرج

نظرًا لأن العبارة غالبًا ما تقلص المساحة المتاحة للتدفق في القناة المائية، فقد تكون سرعات التدفق في العبارة أعلى منها في القناة. يمكن أن تتسبب هذه السرعات المتزايدة تحات (Scour) في قاع المجرى المائي وتعرية (Erosion) للجسور بالقرب من مخرج العبارة. من حين لآخر يمكن تجنب المشاكل البسيطة الناتجة عن السرعات الزائدة بزيادة خشونة أنبوب العبارة. في بعض الأحيان تكون هناك حاجة لإضافة منشآت لتبديد الطاقة ومعدات لحماية المخرج لتجنب التحات المفرط عند مخرج العبارة. عندما تعمل العبارة بنظام المدخل ولا يكون أنبوب العبارة فعالًا بسعته القصوى، ففي الأغلب يكون تسطيح الميل (تخفيف الانحدار) أو إضافة قطاع مخشن للعبارة مفيد لتقليل سرعات المخرج.

4-4-1 منحنيات الأداء

منحنى الأداء هو رسم بياني يوضح العلاقة بين عمق العمود المائي أو منسوب سطح الماء عند مدخل العبارة ومعدل التدفق خلالها. الرسم التخطيطي الناتج من هذه العملية يكون مفيدًا في تقييم السعة الهيدروليكية للعبارة عند مناسيب أو أعماق مختلفة. ومن بين استخدامات منحنى الأداء، أنه يبرز عواقب حدوث معدلات تدفق أعلى من المسموح به في موقع العبارة.

عند إعداد منحنى الأداء للعبارة، يجب رسم منحنيات نظامي المدخل والمخرج كليهما معًا. يعد ذلك ضروريًا لأنه من الصعب التنبؤ بالنظام السائد عند عمق أو منسوب معين للماء. أيضًا، لأن النظام قد يتحول من المدخل إلى المخرج أو العكس في مدى من معدلات التدفق. يوضح الشكل 10-1 منحنى أداء نموذجي لعبارة. استنادًا إلى مفهوم الحد الأدنى من الأداء (انظر القسم 4-1)، عند منسوب أو عمق الماء المسموح به (انظر القسم 4-3-1)، تعمل العبارة الموضحة في الشكل بنظام المدخل وبعمل إعدادات أفضل للمدخل، يمكن زيادة الأداء الهيدروليكي للعبارة للاستفادة بشكل أفضل من سعة الأنبوب.



الشكل 1-8: منحنى الأداء الهيدروليكي للعبارة

الفصل الثاني
اعتبارات التصميم

2-1 الهيدرولوجيا

2-1-1 عام

يشمل التحليل الهيدرولوجي تقدير معدل التدفق التصميمي للعبارة على أساس الخصائص المناخية وخصائص حوض التصريف. وهذا التحليل هو الخطوة الأولى في أي تصميم للعبارة ويترتب عليه نتائج التحليل الهيدروليكي. وعندما توجد شكوك إحصائية حول دقة التحليل الهيدرولوجي، فإن التحليل الهيدروليكي للعبارة المترتب عليه والنتائج الكلية لن يكونا بالدقة المطلوبة. المعلومات الواردة في هذا الفصل تقدم نظرة عامة مختصرة عن التحليل الهيدرولوجي. لمزيد من المعلومات التفصيلية، ارجع للقسم الأول من هذا الدليل – الدراسات الهيدرولوجية.

يرتبط التحليل الهيدرولوجي في كثير من الأحيان بأحد المفاهيم الإحصائية وهو "فترة المعاودة" (Return Period) أو الفترة التكرارية للتصريف المائي، وهو يستخدم للإشارة إلى تكرار وقوع الحوادث النادرة مثل العواصف الاستثنائية والفيضانات. وتعد فترة المعاودة هي مقلوب (متبادل) التردد أو التواتر (Frequency) من الناحية الإحصائية. على سبيل المثال: كانت احتمالية التعادل أو التجاوز لحجم فيضان أو عاصفة ما تساوي 2 ٪ (التردد أو التواتر) في أي سنة، تكون فترة المعاودة لذلك الفيضان أو العاصفة هي 50 سنة؛ أي، 1 / 0.02 = 50 سنة. لاحظ أن هذا لا يعني أن الفيضان (أو العاصفة) يتكرر بشكل منتظم كل 50 سنة، وإنما يعني أن فرصة حدوثه أو تجاوزه هي مرة واحدة كل 50 سنة. وهكذا قد يحدث فيضانان فترة معاودتهما 50 عامًا في سنوات قليلة متعاقبة أو قد يحدثان بفاصل زمني يساوي 500 عام. فترة المعاودة هي فقط متوسط عدد السنوات بين تلك الأحداث على مدى زمني طويل.

العبارات الكبيرة والمكلفة قد تتطلب تحليل هيدرولوجي شامل. وقد يكون هذا المستوى المتزايد من الجهد ضروريًا من أجل إجراء تحليل للمخاطر، في تلك الحالة يمكن تبرير حجم العبارة و/ أو الحاجة إلى تحليل هيدرولوجي أكثر دقة. وقد تكون هناك حاجة أيضًا إلى مناهج هيدرولوجية أكثر تعقيدًا لتعريف مجريات الفيضان بالكامل عند إتمام حسابات التسيير الخاصة بالتخزين. ومع ذلك، لا تحدث هذه الظروف بشكل متكرر ويتم تصميم أغلب العبارات على الطرق السريعة باستخدام طرق هيدرولوجية أبسط تتنبأ بتصريف الذروة فقط. بشكل عام، يعتمد تعيين فترة المعاودة على أهمية الطريق الذي يتم إنشاؤه ومقدار الأضرار المتوقعة نتيجة الفيضان. يمكن الرجوع إلى جدول رقم (2-1) لتحديد فترة المعاودة لتصميم العبارة حسب صنف الطريق المشمول.

الجدول رقم (2-0): فترة المعاودة لتصميم العبارة حسب صنف الطريق

صنف الطريق	فترة المعاودة أو الفترة التكرارية	فرصة الحدوث أو التجاوز
الطريق السريع (الأوتوستراد)	100 سنة	1 في المئة
الطرق الشريانية	50 سنة	2 في المئة
الطرق التجميعية	50 سنة	2 في المئة
الطرق المحلية	25 سنة	4 في المئة
بالوعات تصريف العاصفة المدنية	5 سنوات	20 في المئة

2-1-2 تدفق الذروة التصميمي

عندما تمر موجة الفيضان بنقطة على طول المجرى، فإن معدل التدفق يزداد عند تلك النقطة حتى يصل إلى حدٍ أقصى ثم يتراجع. يُطلق على المخطط البياني الذي يوضح هذا التغيير في معدل التدفق بالنسبة للزمن عند تلك النقطة – المخطط الهيدروغرافي (Hydrograph)، ويعرف الحد الأقصى لمعدل التدفق باسم تدفق الذروة (Peak Flow)، وهو عامل رئيس في تصميم العبارات.

في التصميم التقليدي للعبارات، يحدد حجم المنشأ (أو العبارة) وفقًا لقدرته أن يمرر تدفق الذروة خلال الردم الترابي للطريق بعمق أو منسوب للماء مسموح به في الجانب العلوي من العبارة (عند المدخل). ويعتمد قدر (أو شدة) تدفق الذروة على فترة المعاودة (للفيضان أو العاصفة) المختارة لتصميم العبارة.

بالنسبة للمواقع العبارات التي يتوافر بها أجهزة لقياس التدفق، يمكن إجراء التحليلات الإحصائية على تدفقات المجرى المائي المسجلة للحصول على تدفق ذروة تقديري لتصميم العبارة حسب فترة المعاودة المحددة، بشرط أن تكون البيانات في سجلات التسجيل كافية لإجراء التحليل. وتتحسن دقة تقدير التدفق التصميمي للعبارة بزيادة فترة تسجيل البيانات. ومع ذلك، نظرًا لأن بيانات التدفق المقاسة عادة ما تكون غير متاحة إلا للقنوات المائية والأنهار الكبيرة؛ نادرًا ما يستخدم هذا النوع من التحليل في تصميم العبارات.

المشكلة المعتادة أو الأكثر شيوعًا في تصميم العبارات ألا يتوافر بموقع العبارة أجهزة لقياس التدفق. في العادة يتم تحديد التصريف المائي في تلك المواقع (غير المقاسة) اعتمادا على معادلات الارتباط المتاحة حسب تحليل الانحدار (Regression Analysis) أو حسب إحدى الطرق الهيدرولوجية التجريبية المتعددة. تتطلب معادلات الانحدار (Regression Equations) بشكل عام ثوابت حوض التصريف الأساسية مثل مساحة الحوض والانحدار المتوسط للمجرى المائي. بالنظر إلى أن البيانات المتاحة لإعداد معادلات الانحدار هي بيانات لأحواض ذات مساحات كبيرة، فإن هذا المنهج يكون الأفضل عادة لمساحات التصريف الكبيرة ومشاريع تصميم العبارات.

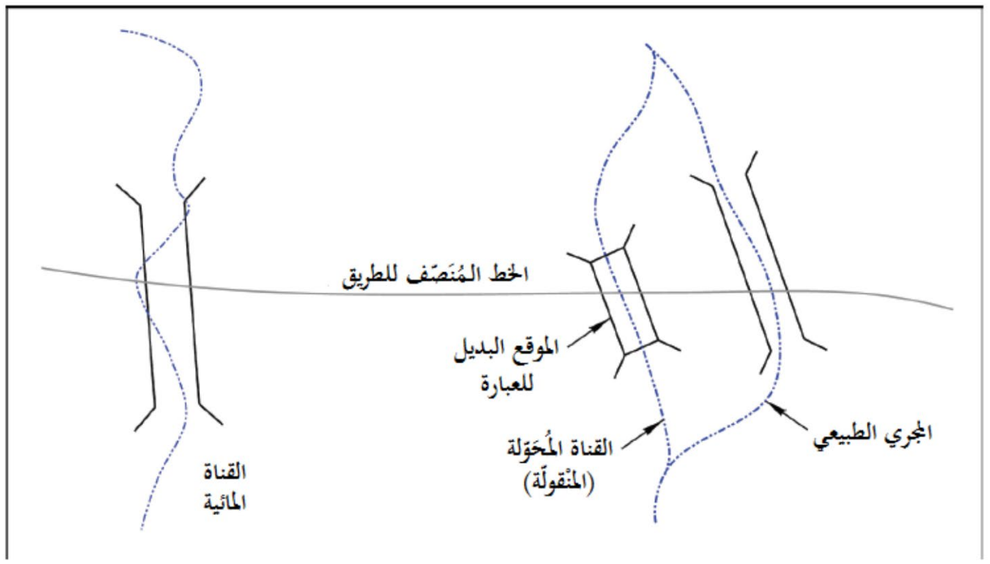
تتوفر أيضًا طرق حتمية (Deterministic Models) لتحديد التصريف المائي - نتائجها تحدد بالكامل من خلال الحالة الأولية والمدخلات، ليست عشوائية أو تصادفية - وهي تقدم نماذج لكيفية عمل الجريان السطحي والأمطار وفقًا لمعادلات ومعاملات تجريبية مختلفة. ويعدُّ الهطل المطري مُدْخَلًا رئيسًا في معاملات هذه الطرق الذي يجب أن يتصل بفترة المعاودة المعتمدة للعاصفة المطرية. وتعتمد كمية البيانات المطلوبة لحوض التصريف على مدى تعقيد المعادلات المستخدمة في النمذجة. أحد الأساليب الأكثر بساطة المستخدمة في العديد من تصاميم العبارات الصغيرة هي الطريقة المنطقية (Rational Method). استنادًا إلى الافتراضات الموجودة في الطريقة المنطقية، من الأفضل تطبيقها على مساحات التصريف التي تقل مساحتها عن 200 فدان إنجليزي (80 هكتارًا = 0.8 كم^2).

2-2 بيانات الموقع

يتطلب التصميم الهيدروليكي لإنشاء العبارة تقييم كمية كبيرة من البيانات بما في ذلك موقع العبارة، وبيانات المجرى الطبيعي، وبيانات الطريق، وعمق (منسوب) الماء المسموح به. ذلك بالإضافة إلى تدفق الذروة التصميمي النمطي لتصميم العبارات. وستتم مناقشة كل بند من هذه العناصر وأهميتها في الفقرات التالية.

2-2-1 موقع العبارة

الموقع المثالي للعبارة أن تكون في قاع المجرى المائي (أو القناة (القائم لتقليل التكاليف المرتبطة بالحفر البنائي وأعمال تعديل المجرى أو القناة. ولكن هذا الأمر ليس دائمًا ممكنًا. فبعض قيعان المجاري المائية تكون ملتوية ولا يمكنها استيعاب عبارة مستقيمة. في حالات أخرى، قد يتعين تحويل أو نقل المجرى المائي (أو القناة) لتجنب تركيب عبارة طويلة بشكل غير اعتيادي. عند نقل المجرى أو القناة، من الأفضل تجنب التبدلات المفاجئة في المجرى عند طرفي العبارة. يعرض الشكل 2-1 مثالين لعمليات موقع العبارة. في إحدى الحالات (في اليسار)، تتبع العبارة خط جريان القناة الطبيعية. في الحالة الثانية (في اليمين)، تم نقل القناة لتقليل طول العبارة. وقد خلصت وكالة المسح الجيولوجي الأمريكية (USGS) إلى أن عمليات نقل أو تحويل القنوات الصغيرة لضبط استقامة وطول العبارات كانت ناجحة ما لم تكن القناة الطبيعية غير مستقرة بالفعل. عند النظر في بدائل نقل القناة، يجب مراعاة الآثار البيئية والتصاريح المطلوبة، التي قد تكون عاملًا رئيسًا في عملية صنع القرار.



الشكل 2-1: طرق تعيين موقع العبارة

2-2-2 بيانات المجرى الطبيعي

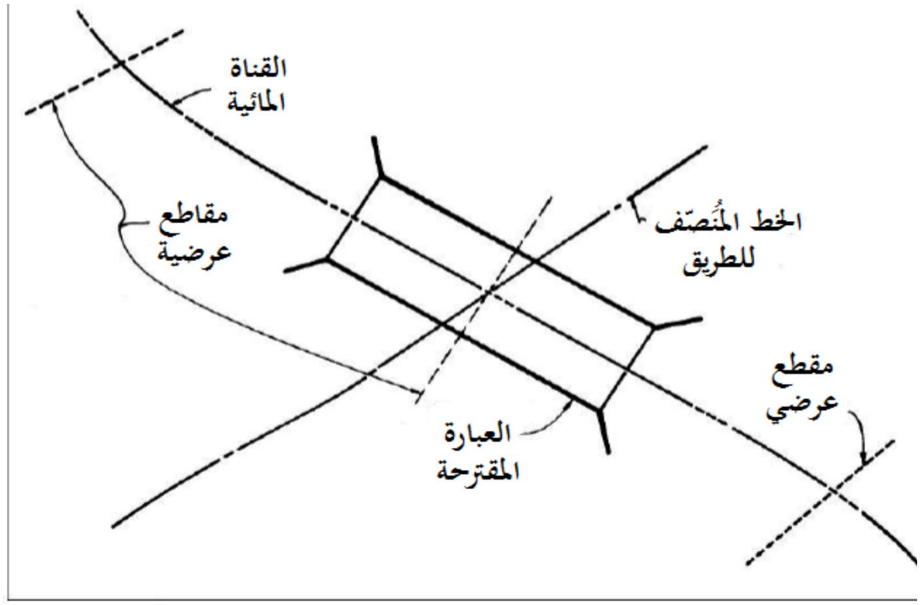
غالبًا ما يؤدي إنشاء العبارة لنقل الماء السطحي خلال ردمية الطريق إلى تغيير حالة القناة (في موقع العبارة) ومجرى الماء الطبيعي قبل وبعد العبارة. للتنبؤ بعواقب هذا التغيير، يجب جمع بيانات دقيقة عن المجرى الطبيعي قبل التنفيذ. وتشتمل تلك البيانات على: معلومات المقطع العرضي، وانحدار المجرى، والمقاومة الهيدروليكية لقناة الأساس والسهل الفيضي حولها، وثبات القناة وأوضاع انتقال الرّسابة، وأي ظرف يؤثر في منسوب سطح الماء بعد العبارة، وسعة التخزين في المجرى أمام للعبارة. التقاط صور فوتوغرافية توضح ظروف وحالة الموقع غالبًا ما تكون مفيدة.

2-2-2-1 المقاطع العرضية

من المفضل للغاية عمل مسح طبوغرافي ميداني (أو حقلي) للموقع تستمد منه بيانات المقاطع العرضية؛ لاستكمال المعلومات في الخرائط الطبوغرافية المتاحة والتأكد من دقتها. من الناحية المثالية، ينبغي أن يتم عمل مسح لمقطعين عرضيين على الأقل، أحدهما في اتجاه المنبع والآخر في اتجاه المصب. يجب أن تكون هذه المقاطع العرضية ممثلة للوصلة المائية. ومن الأفضل عمل مسح لثلاث مقاطع عرضية على الأقل لتحديد انحدار المجرى، وهذه المقاطع تكون على الشكل التالي:

- مقطع قبل التقاطع مع الطريق بـ 30 مترًا (أي قبل مدخل العبارة المفترض).
- مقطع بعد التقاطع مع الطريق بـ 30 مترًا (أي بعد مخرج العبارة المفترض).
- مقطع يقع بين المقطعين السابقين عند محور الطريق.

يمكن الحصول على عرض قاع المجرى الطبيعي وميول الجوانب وعرض السهل الفيضي من المقاطع العرضية السابقة.



الشكل 2-2: تحديد أماكن المقاطع العرضية

إذا كان من المحتمل حدوث تخزين كبير للماء أمام مدخل العبارة (بركة)؛ ما يستوجب إتمام التحليل للتسيير، فقد يكون من الضرورة عمل مسح لمقاطع عرضية إضافية أمام مدخل العبارة. وبالمثل، قد يكون من الضروري عمل مسح لمقاطع إضافية خلف مخرج العبارة في اتجاه الجريان لتحديد منسوب سطح الماء في أسفل المجرى المائي (ماء عُقْب العبارة - Tailwater)، خاصةً عندما تضع المنشآت الأخرى (أو حالة القناة) حدًّا للتحليل الهيدروليكي المعتمد على العمق الطبيعي في أسفل المجرى، ويكون من الضروري إتمام تحليل أكثر تفصيلًا للشاكلة سطح الماء (انظر مناقشة ماء العُقْب التالية).

في حالة توفر مقطع عرضي واحد فقط للمجرى الطبيعي، فسيتم استخدامه كمقطع عرضي نموذجي. ويجب التحقق من هذا الافتراض باستخدام الخرائط الطبوغرافية والصور الجوية. كما يجب الحصول على معلومات إضافية حول انحدار المجرى وحجم التخزين أمام مدخل العبارة من الخرائط الطبوغرافية.

2-2-2-2 انحدار المجرى

يجب تحديد الانحدار (أو الميل الطولي) لقاع المجرى الطبيعي بالقرب من العبارة المقترحة، حتى يتمكن المصمم من ضبط موضع العبارة رأسيًّا في المقطع الطولي بشكل سليم، وتحديد خصائص التدفق في المجرى الطبيعي. غالبًا يتم وضع العبارة المقترحة بانحدار قاع المجرى الطبيعي نفسه. يمكن استخدام بيانات المسح الميداني للمقاطع العرضية للقناة والخرائط الطبوغرافية لتحديد انحدار المجرى. إذا كانت البيانات المتوفرة للمقاطع العرضية أو دقة الخرائط الطبوغرافية محدودة، قد يكون من الضروري إجراء مسح طبوغرافي على طول الخط المنُصِف للقناة لتحديد انحدار المجرى عبر المعبر بدقة.

2-2-2-3 المقاومة الهيدروليكية

يجب تقدير معامل المقاومة الهيدروليكية للمجرى الطبيعي من أجل حساب أحكام التدفق في قناة المجرى. المعتاد اعتبار القيمة (n) لمانينغ (Manning) هي معامل المقاومة الهيدروليكية. تتوفر طرق مختلفة لتقييم معاملات المقاومة للمجاري الطبيعية، بما في ذلك عمل مقارنات مع الصور الفوتوغرافية للمجاري ذات قيم المقاومة المعروفة أو الطرق المجدولة القائمة على خصائص المجرى الطبيعي. الجدول رقم (2-2) يعرض القيم (n) لمانينغ لمجموعة من المجاري الطبيعية المنتقاة.

الجدول رقم (2-2): القيمة (n) لمانينغ لقنوات مجاري الطبيعية صغيرة. عرض السطح في مرحلة الفيضان أقل من 30 مترًا.

قنوات ذات مقاطع عرضية علي نحو منتظم	
بعض الحشائش والأعشاب بلا شجيرات أو بشجيرات قليلة	0.035 - 0.030
نمو كثيف للأعشاب، ولكن مرئيًا يكون عمق التدفق أعلى من طول الأعشاب	0.050 - 0.035
بعض الأعشاب، وشجيرات خفيفة على الجوانب	0.050 - 0.035
بعض الأعشاب، وشجيرات غليظة على الجوانب	0.070 - 0.050
بعض الحشائش، أشجار صفصاف كثيفة على الجوانب (أشجار عالية متدلية الأغصان والأوراق).	0.080 - 0.060
بالنسبة للأشجار داخل القناة، ذات الأغصان المغمورة في المرحلة العالية للفيضان، قم بزيادة جميع القيم أعلاه بمقدار	0.020 - 0.010
قنوات ذات مقاطع غير منتظمة، وبرك، وتعرج طفيف للقناة	
قم بزيادة القيم المذكورة أعلاه بنحو	0.020 - 0.010
جداول مائية في الجبال، لا وجود لنباتات في القناة، عادة ما تكون الجوانب شديدة الانحدار، الأشجار والشجيرات على طول الجوانب مغمورة في المرحلة العالية للفيضان:	
القاع يتكون من الحصى والزلط وبعض الجلاميد الصخرية	0.050 - 0.040
القاع يتكون من الزلط وجلاميد كبيرة	0.070 - 0.050

4-2-2-2 ثبات القناة وأوضاع انتقال الرّسابة

يجب توثيق أي شواهد لعدم ثبات قناة المجرى المائي القائم، رأسيًا وطوليًا، عند تصميم معابر العبارات. ويشمل ذلك الملاحظات عن تآكل خطوط الضفاف، وتحول القناة عن مسارها، وفجوات الحت، ومناطق ترسب الرواسب. بالنسبة لمعابر العبارات الكبيرة، يمكن أن يوفر الحصول على الصور الجوية القديمة ومراجعتها نظرة ثاقبة حول مشكلات ثبات القناة على مدى طويل. إذا تم جمع معلومات متعلقة بالرواسب الموجودة في قاع وجوانب القناة، فإن ذلك يكون ذا قيمة كبيرة في تحليل ثبات القناة. يتضمن هذا عادة عمليات مراقبة ميدانية، وقياس ميداني و / أو أخذ عينات للرواسب يتم إرسالها إلى المختبر لتحليل حجم الحبيبات.

5-2-2-2 ماء عُقْب العبارة

من المحتمل أن يتأثر أداء العبارة بمنسوب سطح الماء في القناة خلف مخرج العبارة، وهو ما يطلق عليه في هذا الدليل – ماء عُقْب العبارة - ليكون قريبًا من المصطلح الإنجليزي TAILWATER. تحديد وضعية ماء العُقْب للعبارة هو خطوة لحساب التدفق حر السطح (تدفق القنوات المفتوحة)، وهو خطوة أولية مهمة في تصميم أي عبارة. يمكن الرجوع لسلسلة التصميم الهيدروليكي HDS-4 الصادرة عن الإدارة الفيدرالية للطرق السريعة (FHWA) عام 2008 - الولايات المتحدة الأمريكية - لإلقاء نظرة عامة على تدفق القنوات المفتوحة، وعملية العمق الطبيعي (NORMAL DEPTH) التي تستخدم غالبًا لتعريف ماء العُقْب في تصميم العبارات. يجب الانتباه إلى أن فرضية العمق الطبيعي تسقط عند وجود أوضاع قد تفضي إلى مناسيب مرتفعة لمياه العُقْب خلف العبارة أثناء الفيضان. بصفة عامة يجب فحص أي حواجز، وعوائق، وانقباضات للقناة، وتأثيرات المد والجزر، ونقاط الالتقاء مع المجاري المائية الأخرى في الاتجاه المنصرف من العبارة، بناءً على الملاحظات والخرائط الميدانية، من أجل تقييم تأثيرها في منسوب مياه العُقْب الحاصل عند مخرج العبارة. في غياب هذه الظروف، يمكن أن يفرض منسوب ماء العُقْب بناءً على منسوب سطح الماء في القنوات الطبيعية المحدد بالعمق الطبيعي. خلاف ذلك، هناك حاجة إلى المزيد من الحسابات التفصيلية لشاكلة سطح الماء، التي تتم باستخدام طريقة الخطوة القياسية (STANDARD STEP METHOD) ويمكن تطبيقها من خلال العديد من برامج الكمبيوتر المتداولة.

6-2-2-2 التخزين أمام مدخل العبارة

قد يكون لسعة التخزين المتاحة أمام مدخل العبارة في المجرى المائي تأثير في تصميمها. يمكن الحصول على سعة التخزين أمام العبارة من الخرائط الكنتورية العامة (ذات مقياس رسم كبير) لمنطقة أعالي العبارة، ولكن من الأفضل استخدام خريطة ذات فاصل كنتوري 0.5 م (2 قدم). في حالة عدم توفر مثل هذه الخرائط، يجب الحصول على عدد من المقاطع العرضية في المجرى أمام مدخل العبارة المقترحة. يجب أن تنسب هذه المقاطع أفقيًا ورأسيًا إلى نقطة معلومة الإحداثيات والمنسوب. يعتمد طول القناة المراد مسحها عرضيًا في اتجاه أعلى العبارة على عمق عمود الماء المتوقع أمام مدخل العبارة وانحدار المجرى المائي. يمكن استخدام المقاطع العرضية لوضع خرائط كنتورية للمنطقة المطلوبة، أو يمكن استخدام مساحات المقاطع العرضية لحساب التخزين. يجب أن يمتد المسح الطبوغرافي من قاع القناة لأعلى وحتى منسوب على الأقل يساوي منسوب عمود الماء المسموح به في المنطقة الواقعة أمام (أو أعلى) العبارة.

3-2-2 بيانات الطريق

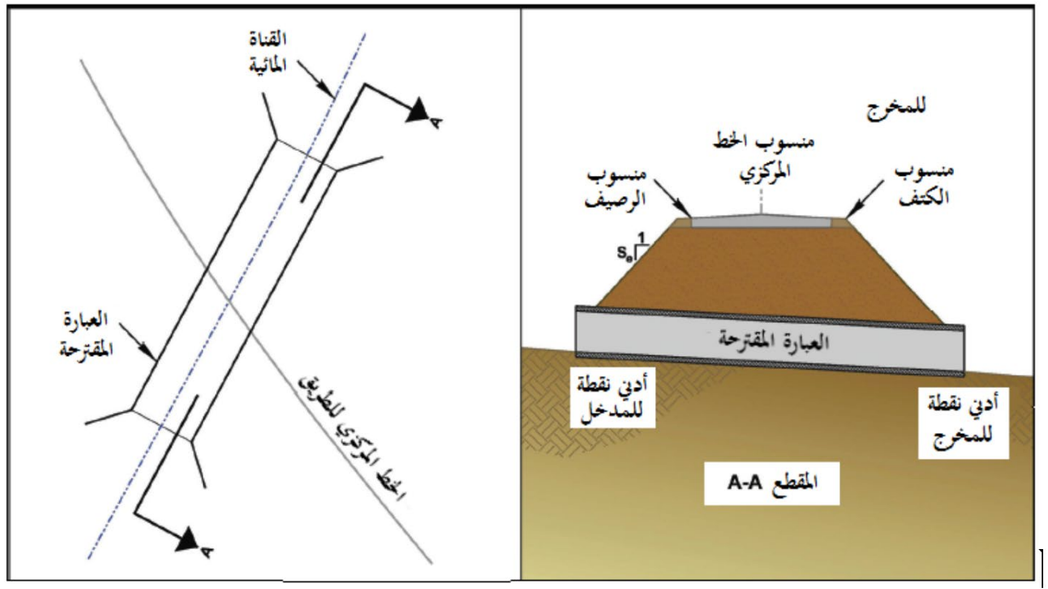
يؤثر الطريق المقترح أو القائم في تكلفة العبارة وسعتها الهيدروليكية وضبط ميل العبارة في المقطعين الجانبي والأفقي، ويمكن الحصول على معلومات عن المقطع الطولي والمقطع العرضي للطريق من الرسومات الأولية للطريق، أو من خلال تطبيق التفصيلات القياسية على مقاطع الطريق. عندما يجب تحديد حجم العبارة قبل وضع الخطط الأولية للطريق، يمكن استخدام أفضل تقدير لمقطع الطريق، ولكن يجب التحقق من تصميم العبارة بعد الانتهاء من رسومات الطريق.

3-3-2-2 المقطع العرضي للطريق

في العادة، يمكن الحصول على المقطع العرضي للطريق المتعامد على الخط المركزي من خلال رسومات الطريق. ولكن المقطع العرضي الذي يحتاجه مصمم العبارة هو مقطع الطريق عند المعبر المائي (بطول المجرى). قد يكون هذا المقطع منحرفًا بالنسبة للخط المركزي الطريق. بالنسبة للعبارة المقترحة، يجب دمج المسقطين الرأسي والأفقي للطريق وبيانات المقاطع العرضية حسب الضرورة للحصول على هذا المقطع المرغوب. يظهر الشكل 3-2 مخططًا لمسقط أفقي ومقطع عرضي للطريق موضحًا عليه المناسيب المهمة.

4-3-2-2 طول العبارة

سوف تتجلي أبعاد ومعالم مهمة للعبارة عند إقامة أو قياس المقطع العرضي المرغوب للطريق. يتم الحصول على أبعاد العبارة عن طريق تركيب أنبوب (أو صندوق) العبارة على المقطع العرضي للطريق والمقطع الجانبي لقاع المجرى المائي (الشكل 3-2). يحدد هذا التراكب منسوبي النقطتين الأدنى لمدخل ومخرج العبارة. هذان المنسوبان وطول العبارة الناتج قيم تقريبية، حيث إن حجم أنبوب العبارة النهائي لا يزال تحديده مطلوبًا (يتحدد بعد إتمام التحليل الهيدروليكي).

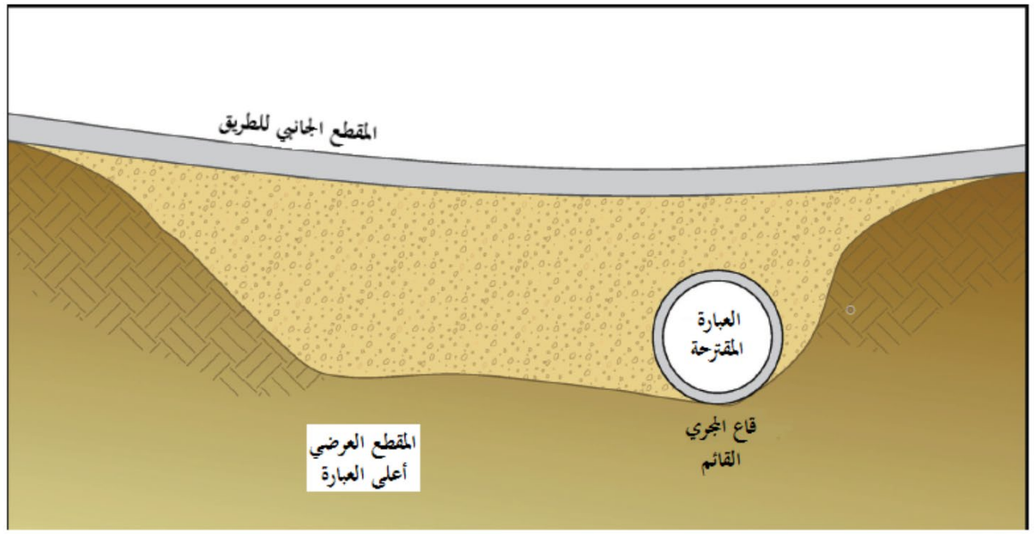


الشكل 2-39: المقطع العرضي للطريق وطول العبارة

5-3-2-2 المقطع الجانبي بطول الطريق

بالنسبة لعبارات صرف التقاطعات، يمثل التشكيل الجانبي للطريق عائقًا يواجه التيار المتدفق للمجرى المائي. إلى حد كبير، تتصرف ردمية الطريق الترابية المدفون فيها العبارة كسد صغير على المجرى المائي. وفي تلك الحالة، تشبه العبارة منشأ الطرد القاعدي، وتعمل قمة الطريق كمفيض للطوارئ في حال وصول البركة في أعلى المجرى (أو عمود الماء أمام مدخل العبارة) إلى منسوب كافٍ. يعتمد الموقع الابتدائي لتجاوز الماء لقمة الطريق على هندسته (الشكل 4-2).

بشكل عام، يمثل المقطع الجانبي الموجود في رسومات الطريق المقطع الجانبي المركزي للطريق (على طول خط المنتصف). قد يؤدي الارتفاع الزائد لحواف الطريق (SUPER ELEVATION)، ألا تتطابق مناسيب خط المنتصف المأخوذة من المقطع الجانبي مع أعلى نقطة على سطح الطريق في المقطع العرضي. يجب أن يستخلص مصمم العبارة المقطع الجانبي الذي ينظم الفيض المائي فوق الطريق ومناسيب تجاوز الفيض للطريق من الرسومات المتاحة. وتكون أدنى نقطة على المقطع الجانبي للطريق ذات أهمية حاسمة، حيث إنها النقطة التي سيحدث عندها أول تجاوز فيضي للطريق. لاحظ أن تلك النقطة الدنيا (على المقطع الجانبي) يمكن أن تكون على بُعد مسافة كبيرة من موقع العبارة.



الشكل 2-4: المقطع الجانبي للطريق – مقطع الوادي

تُستخدم أنواع أخرى من العبارات، بجانب عبارات صرف التقاطعات، في تصريف الطرق، وقد يكون لها أوضاع ومشاكل مختلفة تتعلق بتجاوز الفيض للطريق. على سبيل المثال، تستخدم عبارات تخليص قنوات الصرف الجانبي للطريق لتحويل بعض الجريان السطحي من القنوات الجانبية التي تخدم طريقًا طويلاً منحدرًا للأسفل، وذلك لمنع الماء في قنوات الصرف من تجاوز سطح الطريق و/ أو للتحكم في سرعة التدفق والتآكل في القناة. بالنسبة لهذا النوع من العبارات، لا يوجد أي شرط خاص بالنقطة الدنيا أو تجاوز الفيض المائي لسطح الطريق في سياق عبارات صرف التقاطعات نفسه؛ فالماء الذي لا يتم تحويله يواصل ببساطة الجريان للأسفل في القناة.

4-2-2 عمود الماء المقبول أو المسموح به (Allowable Headwater)

عمود الماء المقبول أو المسموح به هو أقصى ارتفاع جائز (يمكن قبوله) لعمود الماء، أو أقصى عمق للبركة، أمام مدخل العبارة. لاحظ أن هذا يختلف عن عمود الماء التصميمي (DESIGN HEADWATER). عمود الماء التصميمي هو الارتفاع الفعلي لعمود الماء الذي سيحدث أمام العبارة المختارة كما هو مصمم لها. يجب ألا يزيد عمود الماء التصميمي على عمود الماء المقبول. إذا كان الأمر كذلك، يجب اختيار وتقييم تشكيلات إضافية للعبارة حتى يتم الوصول إلى تشكيلة معينة ينتج عنها عمود ماء تصميمي يكون مساويًا لعمود الماء المقبول أو أقل منه.

عندما تقتصر اعتبارات تصميم العبارة على تكلفة الأنبوب أو الصندوق فحسب، فإن أكثر العبارات اقتصادًا (أرخصهم) هي التي تستغل كل الارتفاع المتاح لعمود الماء أمام مدخلها لتمرير التصريف التصميمي، بما أن سعة التصريف تزيد بزيادة ارتفاع الماء أمام العبارة. ولكن هناك العديد من العوامل الأخرى التي تدخل في اعتماد عمود الماء المقبول أو المسموح به. يعتمد تحديد منسوب عمود الماء المقبول أو المسموح به بشكل عام على واحد من أربعة عوامل: الحسابات الاقتصادية، أو القيود التنظيمية، أو القيود التشغيلية، أو قيود الجهات المحلية.

لاحظ أنه يمكن تحقيق زيادة في عمود الماء المتاح أمام العبارة في بعض المواقع عن طريق خفض منسوب مدخل العبارة عن منسوب قاع المجرى المائي. يعدُّ هذا الإجراء مفيدًا للعبارات شديدة الانحدار التي تعمل وفقًا لنظام المدخل.

1-4-2-2 الحسابات الاقتصادية

على الرغم من أن تحويض الماء أمام العبارة (تكوين بركة أمام العبارة) يمكن أن يقلل من حجم الأنبوب أو الصندوق المطلوب، إلا أن الارتفاع المتزايد لعمود الماء أمام العبارة يمكن أن يحدث عنه عواقب اقتصادية ضارة. على سبيل المثال، يمكن أن يؤدي عمود الماء العالي إلى حدوث فجوات أنبوبة في الردم حول الجزء الخارجي من العبارة تسبب تلفًا وفشلًا محتملًا للعبارة. كما يمكن أن يؤدي تزايد عمود الماء إلى سرعات أعلى وحدوث تآكل شديد عند مخرج العبارة، الذي قد يتطلب إضافة منشآت لتبديد الطاقة. كما يمكن تقليل عمود الماء المقبول أو المسموح به في المناطق المحتمل بها تجمع ملحوظ للمخلفات والحطام؛ ما قد يسبب انسدادًا للعبارة وذلك لتقليل الأضرار المحتملة التي قد تنجم عن تجاوز الفيض لقمة الطريق. في كثير من الأحيان تكون هناك قيود ينفرد بها الموقع (موقع العبارة) والتي تحدد الارتفاع المعين الذي لا يجب تجاوزه ضمن فترة معاودة (أو فترة تكرارية) محددة لتقليل المخاطر والخسارة الاقتصادية. قد يتوافق هذا الارتفاع مع بعض النقاط الحرجة على الطريق مثل كتف الطريق أو منسوب تجاوز الفيض للطريق. قد يكون هناك معيار آخر مثل منسوب التضرر من الفيضان لمبنى أو معبر آخر يقع في أعالي المجرى المائي.

2-4-2-2 القيود التنظيمية

إحدى الحسابات الرئيسة في تصميم العبارات هي متطلبات البرامج القومية للتأمين ضد الفيضانات. في الولايات المتحدة الأمريكية يعدُّ قيد التشييد في السهول الفيضانية الذي يؤثر في منسوب الفيضان الأساسي (فترة معاودة لمدة 100 عام) ذا أهمية أساسية في البرنامج القومي للتأمين ضد الفيضانات والذي تديره الوكالة الفيدرالية لإدارة الطوارئ (FEMA). اعتمادًا على موقع العبارة، والتعديات الواقعة في السهول الفيضانية، وما إذا كان هناك مجرى

تنظيمي للفيضان، فإن الزيادة في منسوب سطح الماء المقبول بها تتراوح من 0 إلى 1 قدم (0.3 متر). وبغض النظر عن فترة المعاودة أو الفترة التكرارية المستخدمة في تصميم عبارة لطريق معين (طالع جدول رقم 1-2)، يجب التحقق من فيضان فترة المعاودة لمدة 100 عام لتقييم آثار العبارة على منسوب الفيضان الأساسي.

3-4-2-2 القيود التشغيلية

تتسبب حالة تحويض الماء (أو تكوين بركة أمام العبارة) في إحداث ظروف للتدفق تتغير بسرعة وغالبًا ما يكون التدفق مضطربًا ذا سرعات متزايدة عندما تنتقل المياه للداخل والخارج من العبارة. ظروف التدفق هذه غير ملائمة بشكل عام لحركة الأسماك والكائنات المائية. في المقابل، فإن تصميم معابر الكائنات المائية الأكثر قبولًا غالبًا ما يكون معبرًا له خصائص تدفق (سرعة وعمق وعرض) تشبه إلى حد بعيد القناة الطبيعية في أعالي المجرى المائي قبل العبارة وفي أسفل المجرى بعد العبارة. يقتضي هذا عادةً استخدام منشآت للتصريف أكبر (أو عبّارات أكبر) تضع حدًّا أدنى لارتفاع الماء أمام العبارة، ربما يتم تجاوزه بشكل استثنائي أثناء الفيضانات الكبيرة جدًا (على سبيل المثال، فيضان مدته 50 أو 100 عام).

4-4-2-2 القيود المحلية

قد تضع بعض الجهات المحلية حدودًا على ارتفاع عمود الماء الناتج عن العبارة. على سبيل المثال، قد لا يُسمح لعمق الماء أمام العبارة بتجاوز ارتفاع الأنبوب أو بعض مضاعفات ارتفاع الأنبوب، ويعبر عن ذلك بالنسبة (HW/D). تختلف نسبة HW/D المسموح بها، ولكنها تتراوح عادة من 1.0 إلى 1.5. على الرغم من أن القيود على HW/D قد تكون منخفضة جدًا مما يحد بشدة من المرونة الكامنة في تصميم العبارات، إلا أنه يجب اتباعها ما لم يتم منح إعفاء منها في التصميم.

5-4-2-2 الخلاصة

يمثل الجدول رقم 3-0 تلخيصًا للبيانات المختلفة المطلوبة لتصميم العبارات.

الجدول رقم 0-0: خلاصة البيانات المطلوبة لتصميم العبارات

طبيعة البيانات	مصدرها
البيانات الهيدرولوجية	البيانات الهيدرولوجية
• تدفق الذروة	عن طريق تحليل قياسات المجرى المائي أو الحساب الصيغ الرياضية وفق الصيغة المنطقية أو طريقة *SCS أو معادلات الانحدار ، إلخ.
• تدفق الضبط (لفحص آثار التدفقات الأعلى من الذروة)	كما هو الحال بالنسبة لتدفق الذروة.
• المخطط الهيدروغرافي (إذا استخدمت حسابات التسيير الخاصة بالتخزين)	عن طريق البيانات المقاسة للمجرى المائي أو طرق الإعداد الاصطناعي مثل طريقة *SCS أو طريقة سنايدر أو النماذج الحاسوبية.
بيانات الموقع	بيانات الموقع
• موقع العبارة	اعتمادا على خصائص الموقع بما تتضمنه من معلومات عن المجرى (المقاطع العرضية – الانحدار – الاستقامة).
بيانات المجرى المائي	بيانات المجرى المائي
• المقاطع العرضية	عن طريق المسح الحقلي أو عن طريق الخرائط الطبوغرافية.
• الميل الطولي (الانحدار)	عن طريق المسح الحقلي أو عن طريق الخرائط الطبوغرافية.
• المقاومة الهيدروليكية	عن طريق المعاينة والتصوير والطرق الحسابية.
• ثبات القناة المائية	عن طريق المعاينة والمسح والخرائط الطبوغرافية.
• ماء عُقب العبارة (أثناء المسح الحقلي)	عن طريق المسح الحقلي والخرائط الطبوغرافية.
• تخزين المياه أمام العبارة	عن طريق المسح الحقلي والخرائط الطبوغرافية.
بيانات الطريق	بيانات الطريق
• المقطع العرضي	عن طريق مخططات الطريق.
• المقطع الجانبي	عن طريق مخططات الطريق.
• طول العبارة	عن طريق مخططات الطريق.
عمود الماء المقبول أو المسموح به	عمود الماء المقبول أو المسموح به
• النقاط الحرجة علي الطريق والمباني أو المنشآت المحيطة به.	الصور الجوية أو المسوحات أو الخرائط الطبوغرافية.
• القيود التنظيمية	تشريعات السهول الفيضانية لوصلة المجرى المائي المعنية.
• القيود التشغيلية	تشريعات الأسماك أو الحياة البرية في المناطق الإدارية أو المحلية.
• قيود الجهات الإدارية	تشريعات إنشاء العبارات في المناطق الإدارية أو المحلية.

*SCS: تعرف بطريقة "رقم المنحني – مرفق حفظ التربة" وهي طريقة حسابية لتقدير حجم الجريان السطحي المباشر لحدث هطول الأمطار اعتمادًا على نوع التربة من الناحية الهيدرولوجية ومغطيات التربة وحالة الرطوبة السابقة للتربة.

الفصل الثالث
التصميم الهيدروليكي للعبارات

1-3 التدفق في العبارات

1-1-3 عام

التحليل النظري الدقيق للتدفق في العبارات شديد التعقيد لأن التدفق عادة ما يكون غير منتظم بنواحٍ يتغير فيها التدفق (أو عمق الماء) تدريجيًا وبسرعة معًا في العبارة نفسها. يتضمن التحليل الدقيق حسابات المياه المرتدة وسحب المياه ومعادلات توازن الطاقة والدفع (كمية الحركة) وتطبيق نتائج دراسات النماذج الهيدروليكية. في كثير من الأحيان، تتشكل القفزات الهيدروليكية داخل أنبوب العبارة أو بعده في أسفل المجرى المائي. وقد حددت هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية USGS 18 نوعًا مختلفًا من التدفق في العبارات بناءً على انغمار أو انغماس مدخل العبارة ومخرجها في الماء، ونظام التدفق في الأنبوب، وعمق الماء عند حافة المصب. يمكن أن يتغير نوع التدفق في عبارة معينة بتغير معدل التدفق فيها ومنسوب المياه عند مخرجها (منسوب ماء عُقْب العبارة).

وقد وضعت إدارة الطرق السريعة الفيدرالية FHWA الأمريكية نهجًا منظمًا لتحليل العبارات استنادًا إلى الأنواع المختلفة من التدفق وموقع المقطع المنظم للتدفق في العبارة. المقطع المنظم هو موقع توجد فيه علاقة فريدة بين معدل التدفق خلال العبارة ومنسوب سطح الماء قرب المدخل في أعالي المجرى المائي. تختلف ظروف التدفق كثيرًا في العبارة بمرور الوقت، ولكن في وقت معين، يكون التدفق محكومًا بهندسة المدخل (نظام المدخل)؛ أو بمزيج من هندسة المدخل، وخصائص الأنبوب (أو الصندوق)، وماء العُقْب عند المخرج (نظام المخرج). قد يتأرجح النظام من المدخل إلى المخرج؛ غير أن مفهوم « الحد الأدنى للأداء الهيدروليكي" ينطبق على تحليل وتصميم العبارات حسب النهج المذكور. وهذا يعني أنه على الرغم من أن العبارة قد تعمل بكفاءة أكبر في بعض الأحيان (يمكنها تمرير تدفق أكبر مما صممت عليه لمنسوب ماء معين أمام العبارة)، فإنها لن تعمل أبدًا بمستوى أداء أقل من المحسوب.

تعتمد طريقة تصميم العبارات الموضحة في هذا الدليل على استخدام مخططات التصميم والرسوم البيانية (النوموغرافات أو الآباكات). تعتمد هذه المخططات والرسوم البيانية بدورها على بيانات من اختبارات هيدروليكية عديدة وعلى حسابات نظرية. لاحظ أن كل خطوة من عملية تبسيط التحليل تدرج بعض الأخطاء في النتيجة النهائية. على سبيل المثال، دائمًا يوجد تشتت في بيانات الاختبار واختيار المعادلة الأكثر ملاءمة للتصميم ينطوي على بعض الخطأ. كذلك، فإن الارتباط بين معادلات التصميم ونوموغرافات التصميم ليس دقيقًا. أيضًا، استنساخ مخططات التصميم يدرج خطأً إضافيًا؛ لذلك، ينبغي افتراض أن دقة نتائج هذا الإجراء في حدود زائد أو ناقص 10 في المئة، فيما يتعلق بمنسوب الماء أمام العبارة (أو عمق عمود الماء الناتج عن العبارة).

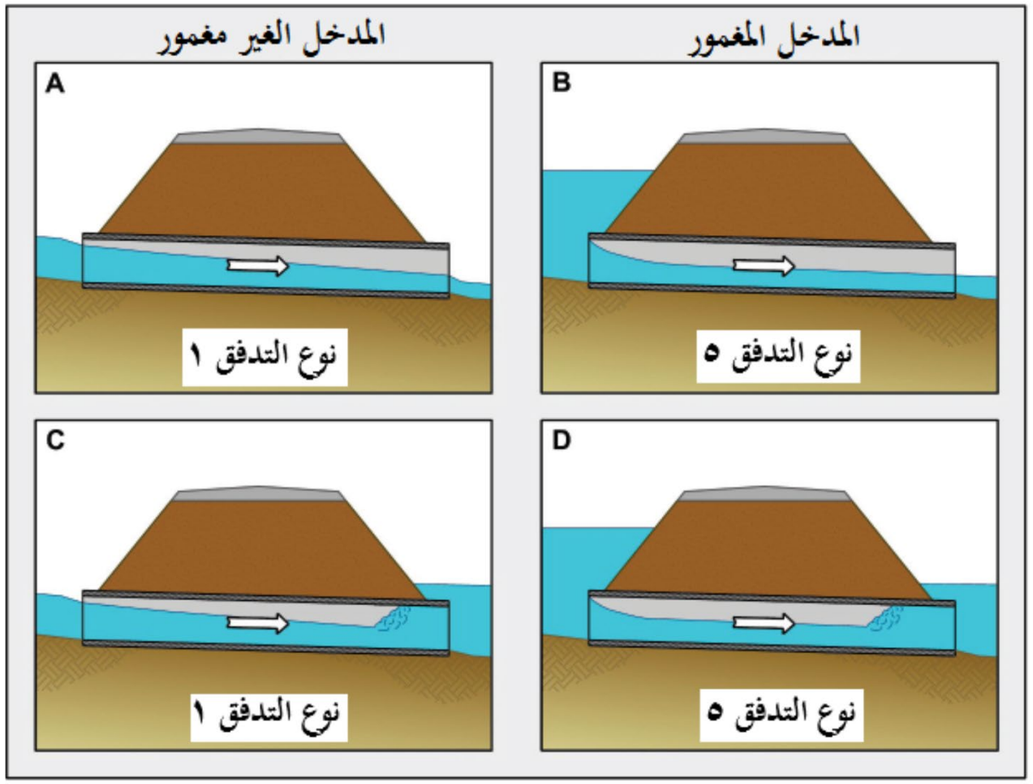
2-1-3 أنواع الضوابط

فيما يأتي وصف عام لخصائص نظامي المدخل والمخرج (ضوابط التدفق في العبارة). العبارة التي تتدفق حسب نظام المدخل تظهر تدفقًا ضحلًا وعالي السرعة في الأنبوب يصنف على أنه «فوق الحرج». بالنسبة للتدفق فوق الحرج، يكون المقطع المنظم في الطرف العلوي للأنبوب (المدخل). وعلى العكس من ذلك، فإن العبارة التي تتدفق حسب نظام المخرج تظهر تدفقًا عميقًا وسرعة أقل نسبيًا يسمى التدفق «تحت الحرج»، أو يمكنها أن تدفق تدفقًا كاملًا. بالنسبة للتدفق تحت الحرج، يكون المقطع المنظم في الطرف الأدنى من العبارة (المخرج). ويكون عمق المياه عند مخرج العبارة هو العمق الحرج أو عمق المياه في القناة التي تصب بها العبارة، أيهما أكبر.

يوضح الجدول رقم 1-1 في الفصل الأول العوامل التي يجب مراعاتها في تصميم العبارات لنظام المدخل والمخرج. العوامل التي تؤثر في أداء العبارة في نظام المدخل، لمنسوب ماء معين أمام العبارة، هي مساحة المدخل، وإعداداته، وشكله فقط. ويتم حساب مستوى الماء أمام العبارة بالنظر لمنسوب أدنى نقطة على المدخل، ولا يكون لمنسوب الماء عند المخرج (ماء العُقْب) أي تأثير في أداء العبارة. أما في نظام المخرج، تؤثر جميع العوامل المدرجة في الجدول رقم 1-1 في أداء العبارة. ويتم حساب مستوى الماء أمام العبارة بالنظر لمنسوب أدنى نقطة على المخرج، ويضاف له الفرق بين منسوبي الماء أمام وخلف العبارة الذي يمثل الطاقة المطلوبة لحمل التدفق عبر العبارة.

3-1-3 نظام المدخل

يوضح الشكل 3-1 أنواع التدفق لنظام المدخل. يعتمد نوع التدفق حسب تصنيفات هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية USGS على انغمار أو انغماس طرفي المدخل والمخرج في الماء. في كل تلك الأمثلة، يقع المقطع المنظم للتدفق في العبارة عند طرفها الأمامي (طرف المدخل). قد تحدث قفزة هيدروليكية في اتجاه الجريان بعد المدخل اعتمادًا على منسوب الماء خلف العبارة (ماء العُقْب).



الشكل 3-1: أنواع نظام المدخل

يوضح الشكلان 3-1 A و C نوع التدفق 1 حيث لا يكون المدخل فيه مغمورًا بالماء. في هذا النوع يمر التدفق خلال العمق الحرج بالكاد خلف مدخل العبارة ويحدث تدفقًا فوق الحرج في الأنبوب. في الشكل 3-1 A ، يتدفق الأنبوب جزئيًا بكامل طوله، ويقترب التدفق من العمق الطبيعي عند نهاية العبارة (طرف المخرج). في الشكل 3-1 C ، لا يحقق انغمار الطرف الخلفي للعبارة (طرف مخرج) في الماء نظامًا للمخرج. في هذه الحالة، يحدث التدفق فوق الحرج خلف المدخل مباشرة وتتكون قفزة هيدروليكية في أنبوب العبارة.

يوضح الشكلان 3-1 B و D نوع التدفق 5 الذي يكون المدخل فيه مغمورًا بالماء. في الشكل 3-1 B ، يظهر الطرف الأمامي للعبارة (طرف المدخل) مغمورًا بالماء بينما يتدفق الماء من الطرف الخلفي (طرف المخرج) تدفقًا حرًا. ويحدث في العبارة تدفق فوق الحرج ويتدفق الأنبوب جزئيًا بكامل طوله. ويقع العمق الحرج بالكاد خلف مدخل العبارة، ويقترب التدفق من العمق الطبيعي عند نهاية العبارة (طرف المخرج). الشكل 3-1 D هو حالة غير اعتيادية حيث لا يحقق انغمار كلا الطرفين للعبارة (طرفي المدخل والمخرج) تدفقًا كاملًا بطول العبارة. في هذه الحالة، سوف تتشكل قفزة هيدروليكية في الأنبوب. كما يمكن أن تنشأ ضغوط هوائية منخفضة عن الضغط الجوي داخل العبارة؛ ما قد يوجد حالة غير مستقرة يتناوب خلالها الأنبوب بين التدفق الكامل والجزئي.

العوامل المؤثرة في نظام المدخل. نظرًا لأن التحكم في التدفق يكون عند الطرف العلوي من العبارة، فإن عمود الماء أمام العبارة وعوامل المدخل فقط هي التي تؤثر في أداء العبارة (الجدول 1-1):

- عمود الماء يقاس عمقه من أدنى نقطة للمقطع المنظم للمدخل حتى سطح الماء في الحوض أمام العبارة.
- مساحة المدخل هي مساحة المقطع العرضي لواجهة مدخل العبارة. عمومًا، تكون مساحة واجهة المدخل هي مساحة الأنبوب (أو الصندوق) نفسها، ولكن بالنسبة للمداخل المستدقة أو المسلوبة تكون مساحة واجهة المدخل أكبر، ويقع القطاع المنظم للتدفق عند الحلق.
- إعداد المدخل يصف نوعه. يبين الشكلان 3-2 و 3-3 بعض الإعدادات النموذجية للمدخل وهي الحافة الرفيعة البارزة، والحواف المُتَوّجَه والتربيعية في الجدار الأمامي، والحافة المشطوفة. كما يوجد نوع آخر من المداخل هو المدخل المستدق أو المسلوب الذي يحتوي على واجهة مكبّرة للمدخل.
- شكل المدخل هو عادة شكل أنبوب العبارة نفسه. ومع ذلك، قد يتم توسيعه كما هو الحال في المدخل المستدق. الأشكال النموذجية هي الأشكال المستطيلة، والدائرية، والبيضاوية. عندما تكون واجهة المدخل مختلفةً عن مقاس أو شكل الأنبوب، فإن هناك إمكانية لوجود مقطع منظم إضافي داخل الأنبوب.
- انحدار الانبوب أو ميله الطولي يؤثر في أداء نظام المدخل، لكنه تأثير ضئيل. تفترض الرسوم البيانية (النوموغرافات) لنظام المدخل ميلًا بنسبة 2٪ لحد تصحيح الانحدار ($S\frac{1}{2}$ لمعظم أنواع المدخل). وهذا يؤدي إلى خفض عمود الماء المطلوب بمقدار 0.01 D. في برنامج الكمبيوتر HY-8 ، يتم استخدام الانحدار الفعلي للأنبوب كمتغير في الحساب.

(أ) الحافة الرفيعة البارزة – أنبوب العبارة يبرز خارج الردم

(ب) المدخل المُتَوّج – يتم قطع أنبوب العبارة بحيث يكون مستوياً مع انحدار الردم

(ج) حافة مربعة في الحائط الأمامي – طرف العبارة مستوي مع الحائط الأمامي

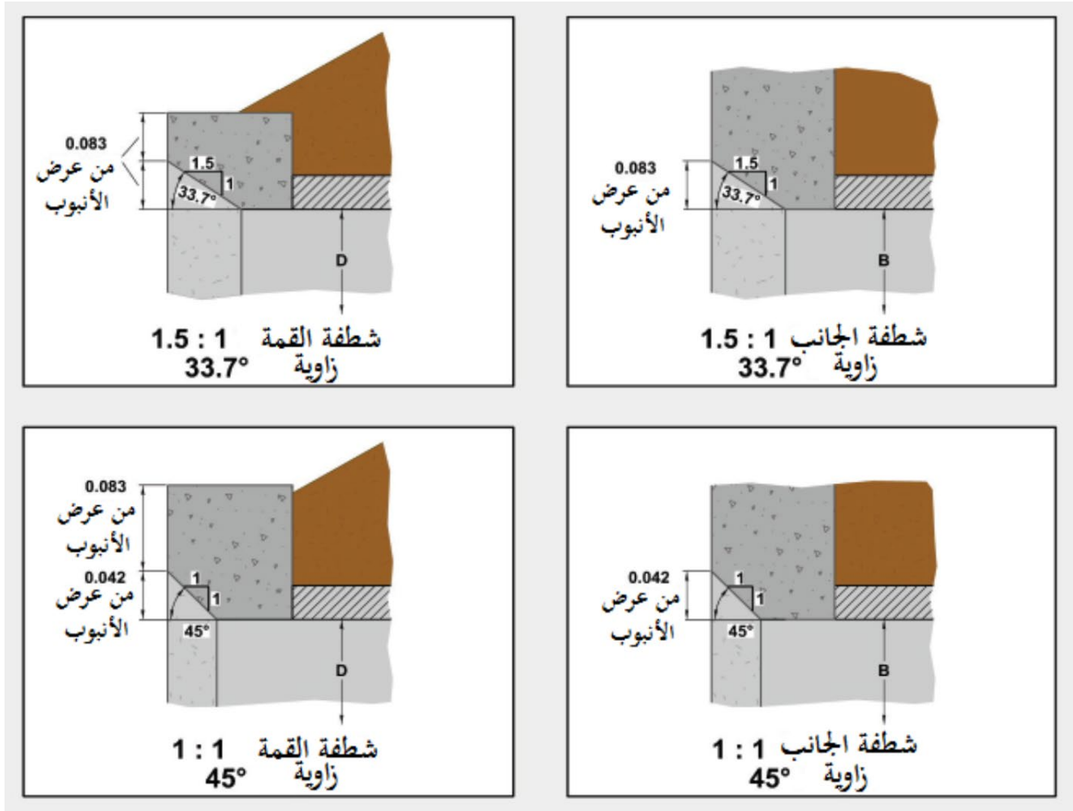
(د) حافة محزوزة بارزة – عبارة من قطاع أنبوب خرساني يمتد من الردم أو الحائط الأمامي

الشكل 3-2: إعدادات المدخل النموذجية

يعدُّ إعداد المدخل عاملًا رئيسًا في أداء نظام المدخل. تظهر إعدادات المدخل النموذجية في الشكل 3-2:

- الشكل 3-2 A : يوضح مدخلاً ذا حافة رفيعة بارزة، وهي إعداد نموذجي للأنابيب المعدنية.
- الشكل 3-2 B : يوضح مدخلاً مُتَوّجًا متوافقًا مع انحدار الردم الترابي.
- الشكل 3-3 C : يوضح حافة تربيعية في الجدار الأمامي. يعطي المدخل البارز ثخين الجدران تقريبًا الأداء نفسه، وهو إعداد نموذجي لأنابيب الخرسانة ذات الأطراف غير المحزوزة.
- الشكل 3-3 D : يوضح حافة محزوزة بارزة وهو إعداد نموذجي للوصلات الأنبوبية الخرسانية (وتسمى أيضًا طرف الدواة).

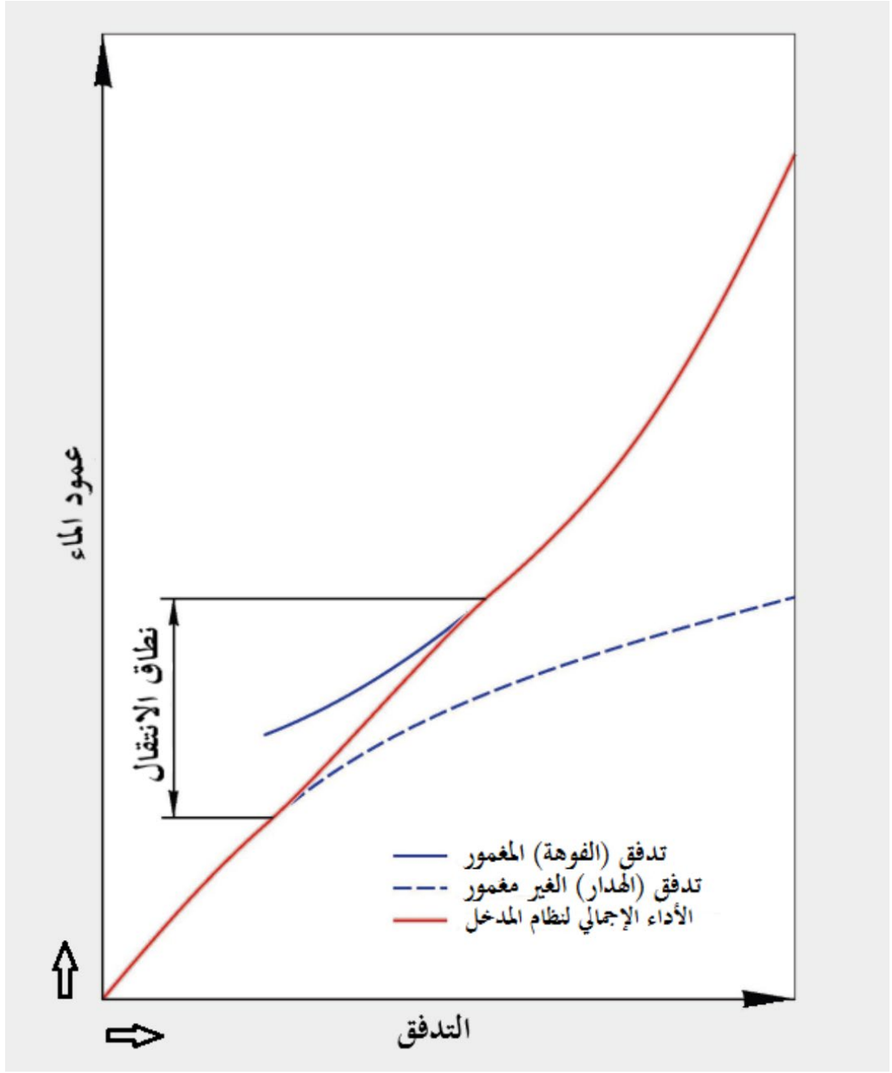
هناك طريقة لزيادة أداء المدخل تتمثل في استخدام الحواف المشطوفة عند مدخل العبارة. تقلل الحواف المشطوفة من تقلص التدفق عن طريق التوسيع الفعال للواجهة. على الرغم من أن أي زاوية للشطف تحسن من الأداء الهيدروليكي، إلا أن مخططات التصميم متوافرة لزاويتين للشطف، وهما 45 و33.7 درجة، كما هو موضح في الشكل 3-3.



الشكل 3-3: الحواف المشطوفة

تتطلب الشُطوف الأكبر حجمًا ذات الـ 33.7 درجة (0.083 قدم / قدم (م / م) أو 1.0 بوصة / قدم من ارتفاع الأنبوب) بعض التعديلات الإنشائية، ولكنها توفر أداءً للمدخل أفضل قليلًا من الشطوف ذات 45 درجة. تتطلب الشطوف الأصغر حجمًا ذات الـ 45 درجة (0.042 قدمًا / قدمًا (م / م) أو 0.5 بوصة / قدم من ارتفاع الأنبوب) تعديلًا إنشائيًا طفيفًا للغاية للجدار الأمامي للعبارة، وهي تحسن من أداء نظامي المدخل والمخرج، لذلك، يوصى باستخدام شطوف ذات 45 درجة في جميع العبارات ذات الجدران الأمامية، سواء في نظامي المدخل أو المخرج، نظرًا لأن الطرف المحزوز أو الجرسي (الشبيه بالجَرَس) للأنبوب الخرساني يوفر أداءً مقاربًا لحافة مشطوفة، فإنه لا يلزم عمل شطبة (أو شطفة) إذا تم الحفاظ على الحزوز عند المدخل. يمكن أن توفر أنواع أخرى من المداخل، مثل الجدار الأمامي ذي الواجهة الحجرية أو مدخل به نوع من الانحناء النصف قطري، أداءً مشابهًا للحافة المشطوفة.

هيدروليكا نظام المدخل. يتحدد أداء نظام المدخل بواسطة النطاقات الثلاث للتدفق الموضحة في الشكل 3-4: غير المغمور والانتقالي والمغمور. بالنسبة للظروف التي ينخفض فيها منسوب المياه أمام المدخل، كما هو مبين في الشكلين 3-1 A و C ، فإن مدخل العبارة يعمل هدارًا(WEIR)). الهدار هو مقطع منظم للتدفق غير مغمور حيثما يمكن التنبؤ بمنسوب سطح الماء أمامه لمعدل تدفق معين. وهكذا يتوجب تحديد العلاقة بين التدفق ومنسوب سطح الماء باختبارات منمذجة لهندسة الهدار أو عن طريق قياس تصريفات النموذج التجريبي. ثم يتم استخدام هذه الاختبارات أو القياسات لإعداد معادلات لتدفق نظام المدخل غير المغمور.



الشكل 3-4: منحنيات نظام المدخل

بالنسبة لأعمدة المياه التي تغمر مدخل العبارة، كما هو مبين في الشكلين 3-1 B و D، يعمل مدخل العبارة كأنه فُوّهَة (ORIFICE). الفوهة هي فتحة مغمورة بالماء في جانبها الأمامي (المنبع) وتتدفق تدفقًا حرًا في جانبها الخلفي (المصب) وتعمل كقطاع منظم للتدفق. يمكن تحديد العلاقة بين التدفق وعمود الماء أمام الفتحة بناءً على نتائج الاختبارات المنمذجة.

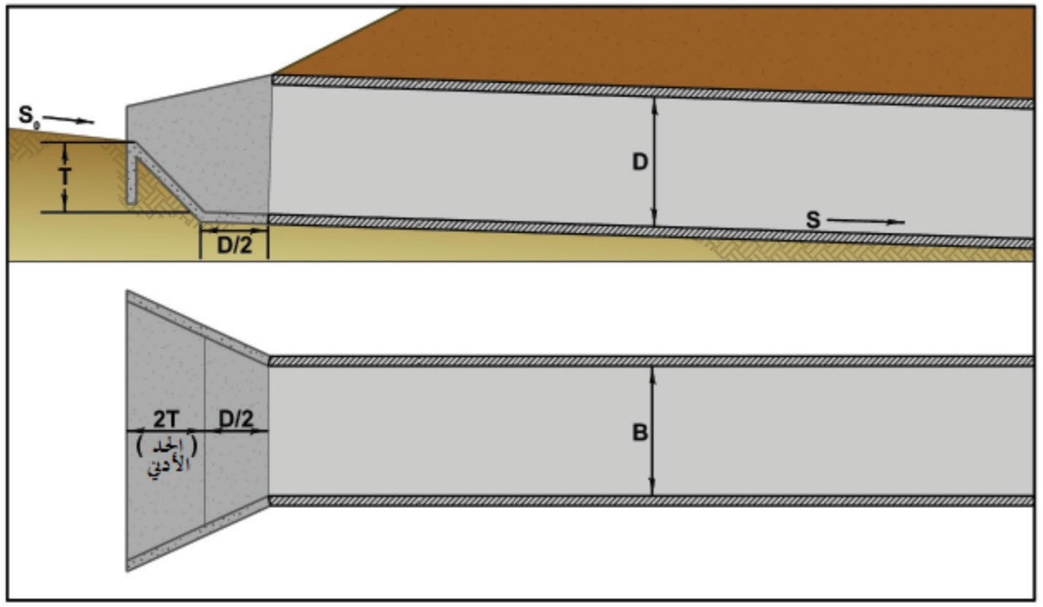
يتعسر تحديد نطاق انتقال التدفق بين حالات أعمدة المياه المنخفضة (نظام الهدار) وحالات أعمدة المياه المرتفعة (نظام الفوهة) بدقة. ولهذا يتم تقريب هذه المنطقة عن طريق الرسم البياني لمعادلات التدفق غير المغمور ومغمور وربطها بخط مُمَاس لكلا المنحنيين، كما هو مبين في الشكل 3-4.

تستخدم منحنيات "تدفق نظام المدخل مقابل عمود الماء أمام العبارة» التي يتم إنشاؤها وفقًا للإجراء أعلاه كأساس لبناء الرسوم البيانية (النوموغرافات أو الآباكات) التصميمية لنظام المدخل ولإعداد المعادلات المستخدمة في البرامج

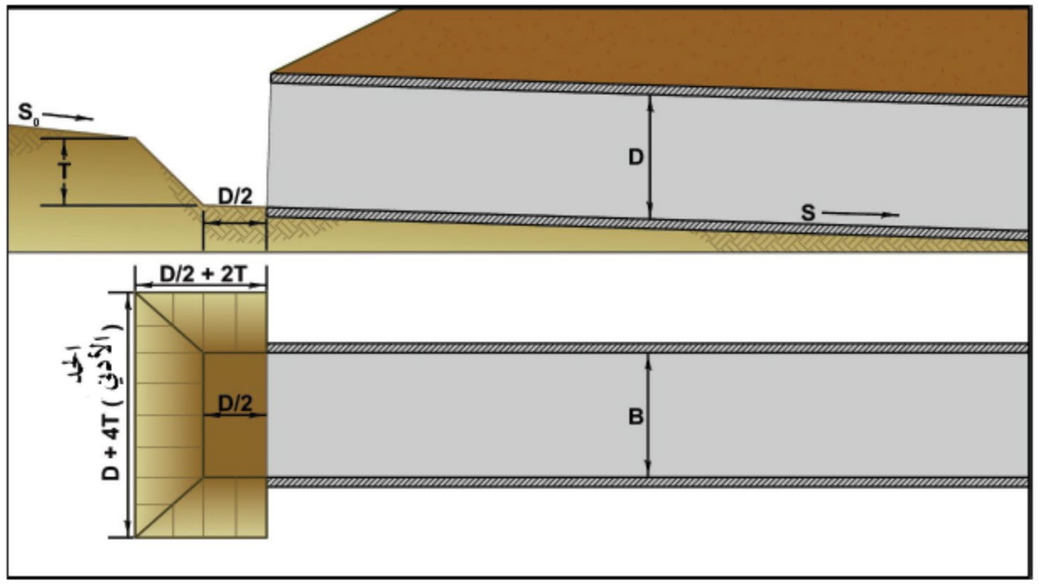
الحاسوبية. كانت المعادلات الأصلية للبرامج الحاسوبية في الأغلب عبارة عن معادلات لمنحنيات موفَّقة متعددة الحدود من الدرجة الخامسة تم إعدادها لتكون بدقة الحلول البيانية نفسها باستخدام النوموغرافات (زائد أو ناقص 10٪) ضمن نطاق الأعمدة المائية التي تتراوح من 0.5 D إلى 3.0 D . لا تزال تستخدم هذه المعادلات في برنامج HY-8 ، ولكن تم استكمالها بمعادلة هدار للأعمدة التي تتراوح من 0.0 Dإلى 0.5D ومعادلة فوهة فوق 3.0 D.

خفض المدخل. يتم خفض المدخل من خلال بناء منفذ المدخل تحت منسوب قاع المجرى المائي. يعرَّف قدر الخفض للمدخل بأنه العمق من قاع المجرى الطبيعي عند واجهة العبارة إلى أدنى نقطة للمدخل. توفر المعادلات أو الرسومات البيانية (النوموغرافات) لنظام المدخل العمق المطلوب لعمود المياه فوق أدنى نقطة للمدخل لتمرير تصريف معين من خلال المدخل. تبقى هذه العلاقة ثابتة بغض النظر عن منسوب أدنى نقطة للمدخل. إذا تم بناء طرف المدخل للعبارة أسفل قاع المجرى المائي، فيمكن بذل ضاغط مائي إضافي على المدخل مع الحفاظ على منسوب المياه نفسه أمام العبارة قبل الخفض.

يظهر الشكلان 3-5 و3-6 طريقتين لإنشاء مُنْخَفَض المدخل عند طرف منفذ دخول العبارة. يوضح الشكل 3-5 استخدام أرضية أساس للمُقَارَبَة من المدخل مع سند الردم بجدران جانبية. يفضل رصف الأرضية. ويبين الشكل 3-6حوض تجميع شيد أمام واجهة العبارة. عادة ما يتم رصف الحوض، ولكن بالنسبة للانخفاضات الصغيرة، قد يكون من المناسب عمل حفرة غير مرصوفة، ولكن مبطنة بدكة الحجارة لمنع خاصّيّة التآكل عن طريق الهبوط الرأسي المفاجئ لقاع المجرى المائي.



الشكل 3-510: عبارة بمدخل منخفض وأرضية أساس للمقاربة وحوائط جانبية



الشكل 3-6: عبارة بمدخل منخفض وحوض تجميع

3-1-4 نظام المخرج

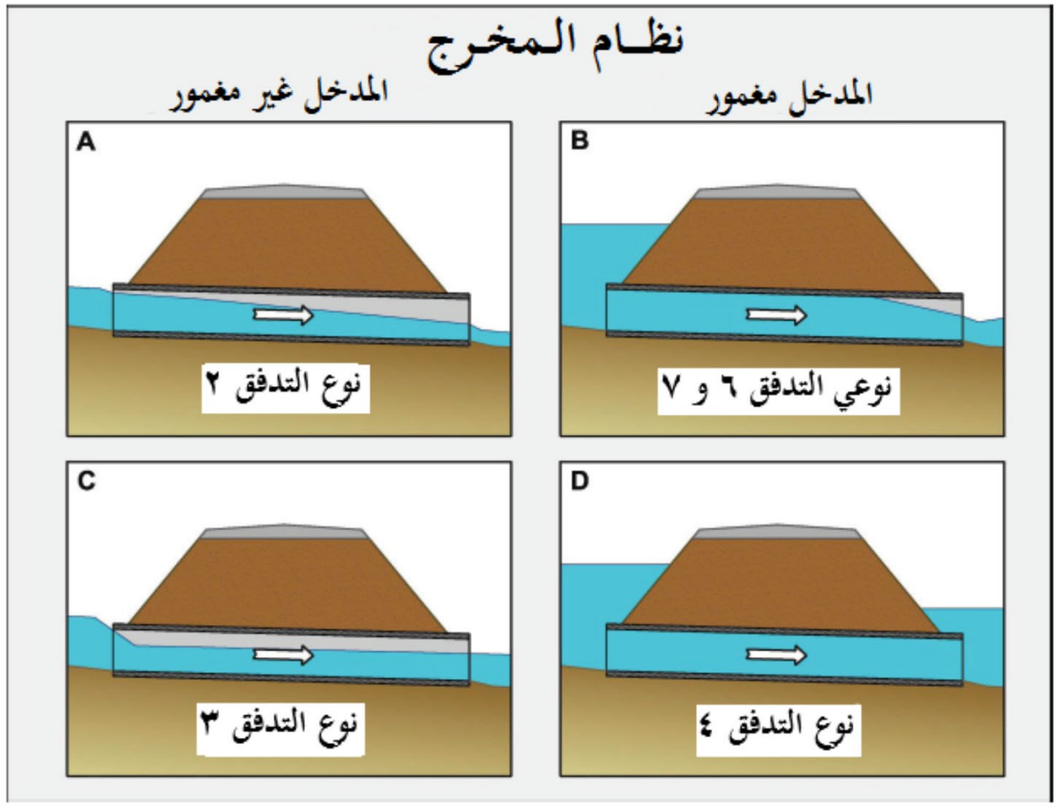
يوضح الشكل 3-7 أنواع التدفق لنظام المخرج. يعتمد نوع التدفق حسب تصنيفات هيئة المسح الجيولوجي الأمريكية USGS على انغمار أو انغماس طرفي المدخل والمخرج في الماء. في جميع الحالات، يقع المقطع المنظم للتدفق في العبارة عند طرفها الخلفي (طرف المخرج) أو أبعد منه في اتجاه التيار. بالنسبة للحالات التي يكون فيها التدفق جزئيًا، يكون التدفق في الأنبوب تحت الحرج.

يوضح الشكلان 3-7 A و C نوعي التدفق 2 و 3 حيثما لا يكون طرفا المدخل والمخرج كلاهما مغمورين. في هاتين الحالتين، يكون عمود الماء أمام المدخل ضحلًا، بحيث تنكشف قمة المدخل عند تقلص التدفق إلى داخل العبارة. ويتدفق الماء في الأنبوب تدفقًا جزئيًا بكامل طوله ويكون أيضًا تدفقًا تحت الحرج. بالنسبة لنوع التدفق 2 (الشكل 3-7 A)، يمر التدفق عبر العمق الحرج عند المخرج. بالنسبة لنوع التدفق 3 (الشكل 3-7 C)، يكون منسوب الماء خلف العبارة (ماء العُقْب) أعلى من العمق الحرج وإذا كان هذا المنسوب أعلى من قمة العبارة فقد يتسبب ذلك في أن يكون التدفق من المخرج كاملًا.

يوضح الشكل 3-7 B نوعي التدفق 6 و 7. في هذين النوعين يكون المدخل مغمورًا بالماء أمام العبارة بينما يكون الطرف الخلفي (المخرج) غير مغمور. بالنسبة لنوع التدفق 6، يفترض فيه أن التدفق يكون كاملًا في أغلب طول الأنبوب (حالة تدفق كامل). بالنسبة لنوع التدفق 7، يكون التدفق فيه جزئيًا على الأقل في جزء من طول الأنبوب (حالة التدفق تحت الحرج). في نوعي التدفق 6 و 7 كليهما، يمر التدفق إما عبر العمق الحرج قبل المخرج بفارق بسيط أو عبر عمق الماء خلف العبارة (عمق ماء العقب)، إذا كان أعلى من العمق الحرج.

يوضح الشكل 3-7 D نوع التدفق 4 وهو التدفق الكامل التقليدي أو المعهود للأنبوب الذي يكون فيه المدخل والمخرج كلاهما مغمورين. ويكون التدفق في الأنبوب تدفقًا مضغوطًا بكامل طوله. غالبًا ما يتم افتراض هذه الحالة في العمليات الحسابية وقد تم استخدامها لإنشاء الرسوم البيانية (النوموغرافات). يمكن أن يحدث نوع التدفق 4 أيضًا

عندما لا يكون المخرج مغمورًا بالماء خلف العبارة (ماء عُقْب العبارة). ولكن هذه حالة نادرة، وتتطلب إما أن يكون عمود الماء أمام العبارة عاليًا للغاية للحفاظ على التدفق الكامل في الأنبوب مع عدم وجود ماء خلفي (ماء عُقْب العبارة) أو أن يكون العمق الحرج أعلى من العبارة.



الشكل 3-7: أنواع نظام المخرج

العوامل المؤثرة في نظام المخرج. نظرًا لأن التحكم في التدفق يكون عند الطرف السفلي (عند المخرج أو بعده)، يتأثر عمود الماء أمام العبارة بجميع العوامل الواردة في الجدول رقم 1-1. عوامل المدخل التي تؤثر في أداء العبارة في حالة نظام المدخل توثر أيضًا في العبارة في حالة نظام المخرج (طالع الفقرة 3-1-3). بالإضافة إلى ذلك، تؤثر خصائص الأنبوب أو الصندوق (الخشونة والمساحة والشكل والطول والانحدار) ومنسوب الماء خلف العبارة (منسوب ماء العُقْب) في أداء العبارة بنظام المخرج:

- خشونة الأنبوب (أو الصندوق) تتعلق بالمواد المستخدمة لتصنيع الأنبوب (أو الصندوق). المواد النموذجية تشمل الخرسانة والمعادن المموجة والبلاستيك. يتم تمثيل الخشونة بواسطة معامل للمقاومة الهيدروليكية مثل قيمة N لمانينغ (MANNING). قيم N لمانينغ النموذجية المستخدمة في تصميم العبارات هي N = 0.012 للعبارات ذات الجدران الناعمة (مثل العبارات الخرسانية) و N = 0.024 للعبارات ذات الجدران الخشنة (المموجة).
- مساحة الأنبوب (أو الصندوق) تتعلق بأبعاد العبارة. كلما كبرت مساحة الأنبوب (أو الصندوق) زاد التدفق الذي يمكن أن يمر خلاله.

- شكل العبارة يتعلق بنوعها وبالمادة المستخدمة في تصنيعها أو إنشائها. استنادًا إلى وضع مركز الثقل لمساحات الأشكال المختلفة، الصندوق هو أكثر الأشكال فاعلية، ثم القوس، ويليه الدائرة.
- طول الأنبوب (أو الصندوق) هو إجمالي الطول من المدخل إلى المخرج؛ نظرًا لأن ارتفاع العبارة التصميمي وانحدارها يؤثران في طولها الفعلي، عادة ما يكون التقدير التقريبي لطول الأنبوب ضروريًا لبدء عملية التصميم.
- انحدار الأنبوب (أو صندوق) هو الانحدار (الميل الطولي) الفعلي لأنبوب العبارة. غالبًا ما يكون انحدار الأنبوب هو انحدار مجرى الماء الطبيعي نفسه، غير أنه عندما يتم رفع أو خفض مدخل العبارة، يكون انحدار الأنبوب مختلفًا عن انحدار المجرى. لا يمثل الانحدار عاملًا في حساب فواقد الطاقة في الأنبوب لأنواع التدفق 4 و 6 و 7 ؛ ولكنه عامل في حساب أنواع التدفق 2 و 3 عند حساب المقطع الجانبي لسطح الماء في العبارة.
- منسوب ماء العُقْب يستند إلى منسوب سطح الماء في المجرى المائي خلف العبارة. يتم استخدام حسابات المياه المرتدة بدءًا من أي عنصر (أو منشأ) منظم للتدفق يقع بعد العبارة في اتجاه التيار أو عمليات المراقبة الميدانية لتحديد منسوب الماء خلف العبارة.

هيدروليكا نظام المخرج (التدفق الكامل للأنبوب). التدفق الكامل في أنبوب العبارة، كما هو موضح في الشكل D 3-7 ، هو أفضل نوع تدفق لوصف الحساب اليدوي لهيدروليكا نظام المخرج. يمكن حساب أوضاع التدفق في نظام المخرج بناءً على توازن الطاقة. تتكون الطاقة الكلية (HL) اللازمة لتمرير التدفق عبر أنبوب العبارة من فاقد المدخل (HE) وفاقد الاحتكاك عبر الأنبوب (HF) وفاقد المخرج (HO). وينبغي إدراج الفواقد الأخرى، بما في ذلك فواقد الأكواع أو الانحناءات (HB)، والفواقد عند الملتقيات أو الوصلات (HJ)، والفواقد عند المصبعات (القضبان الشبكية) (HG) حسب الاقتضاء.

$$H_L = H_e + H_f + H_o + H_b + H_j + H_g \quad (3\text{-}1)$$

يتم حساب السرعة في الأنبوب على النحو التالي:

$$V = \frac{Q}{A} \quad (3\text{-}2)$$

حيث

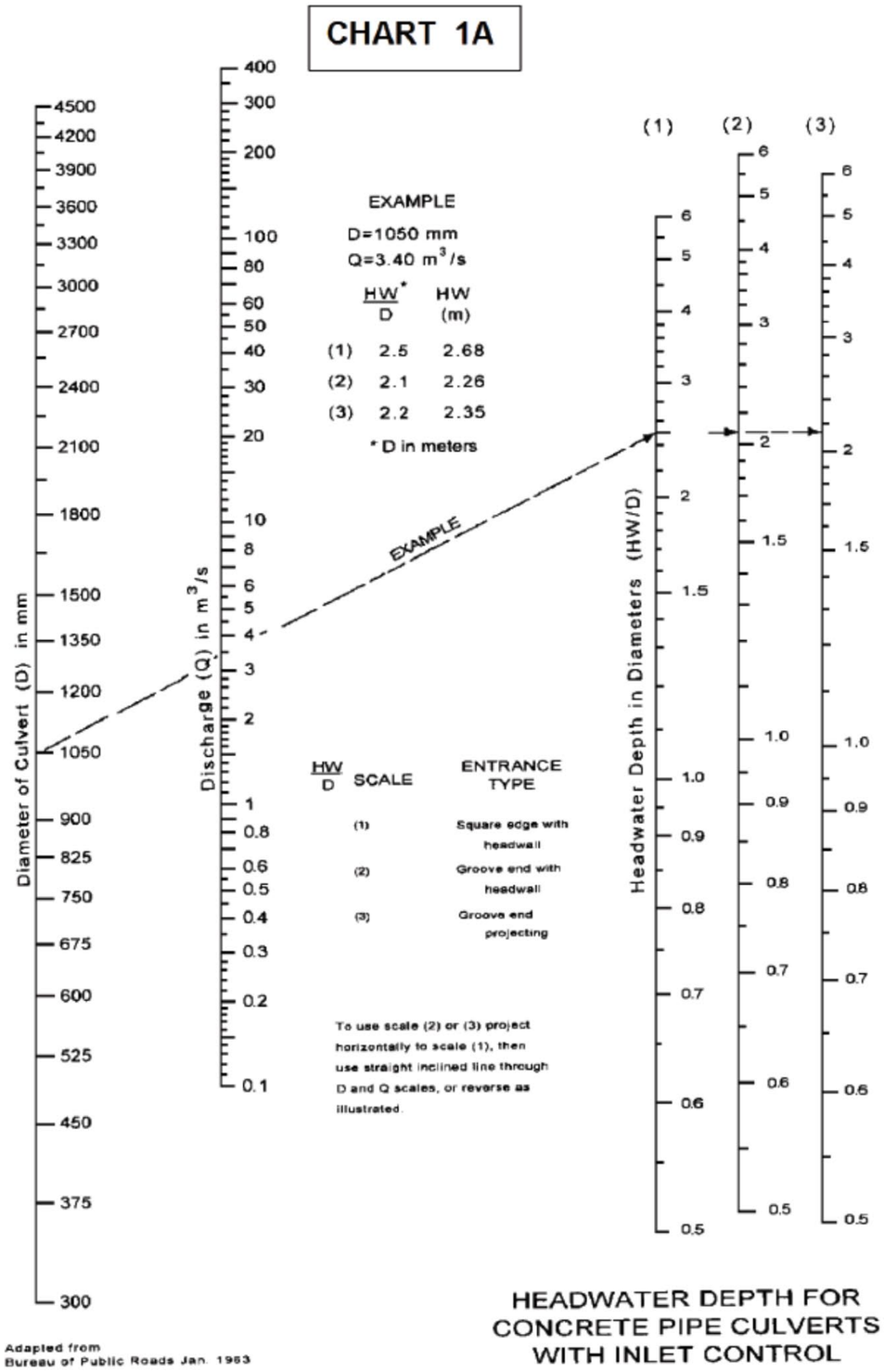
V = متوسط السرعة في أنبوب العبارة ، (م / ث)

Q = معدل التدفق ،)م3 / ث)

A= كامل مساحة المقطع العرضي للتدفق ،) م2)

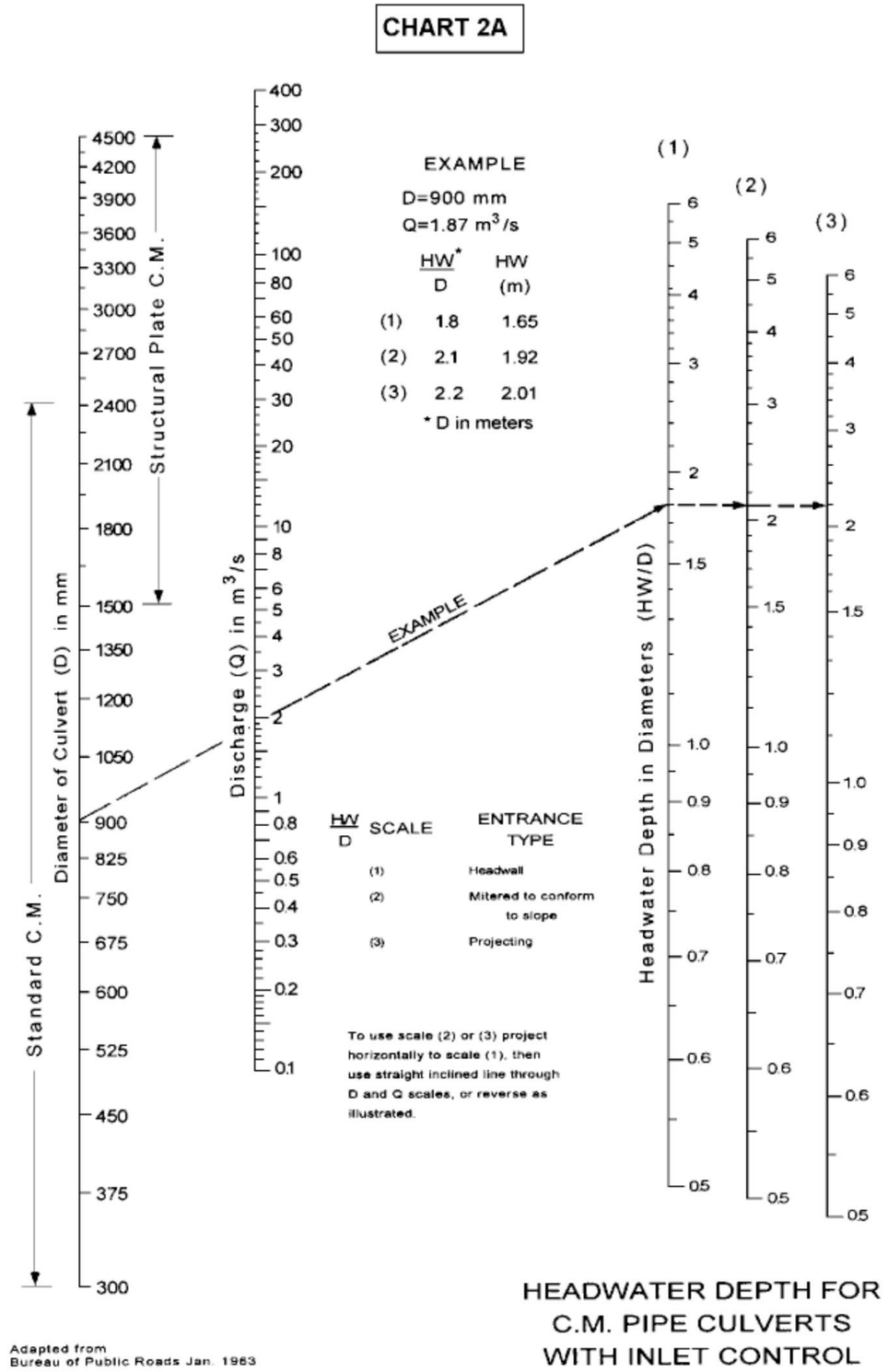
عمود الماء المكافئ لضغط السرعة هو:

$$H_v = \frac{V^2}{2g} \quad (3\text{-}3)$$

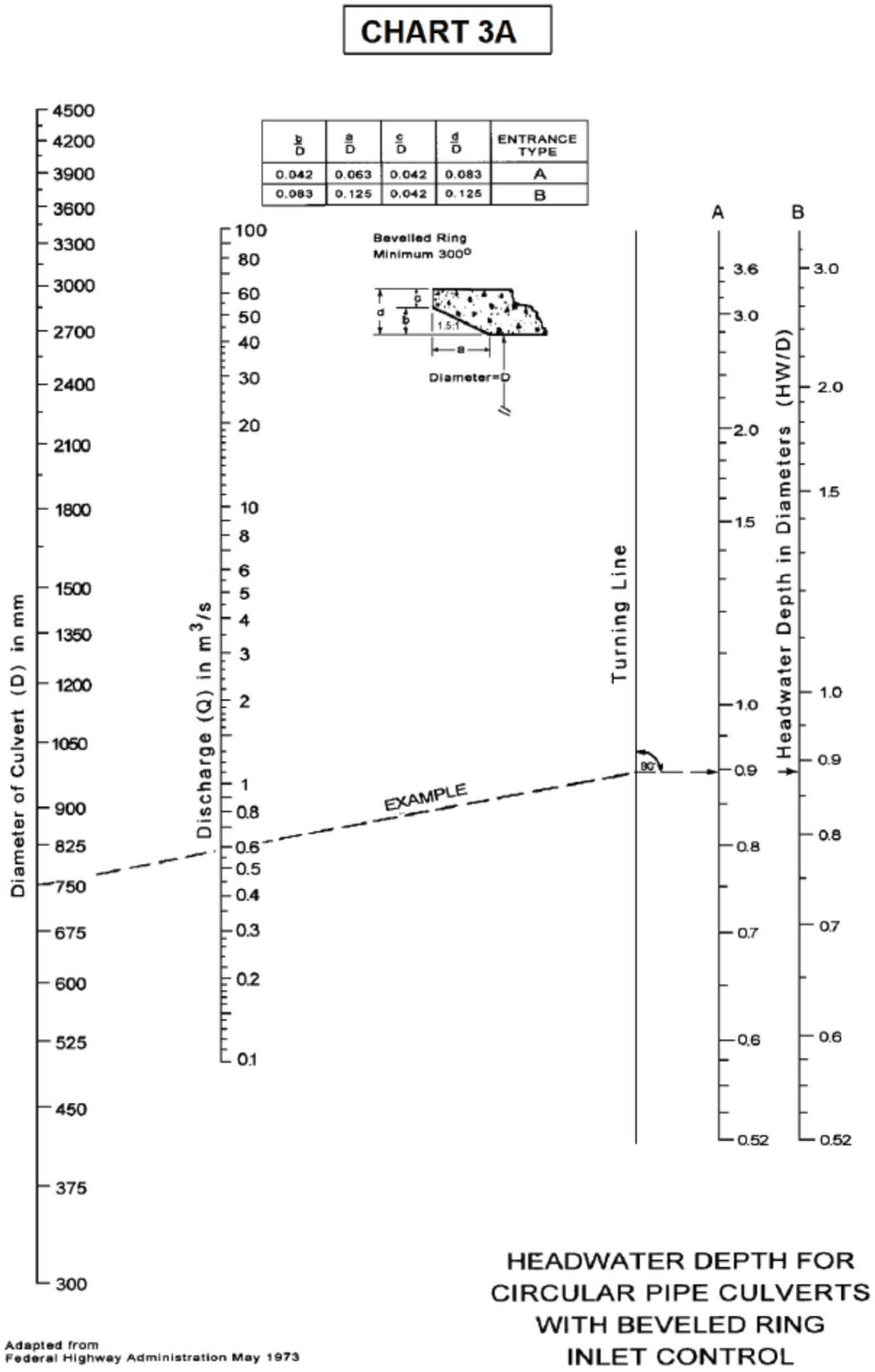


الشكل 4-1: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الأنبوبية الخرسانية حسب نظام المدخل

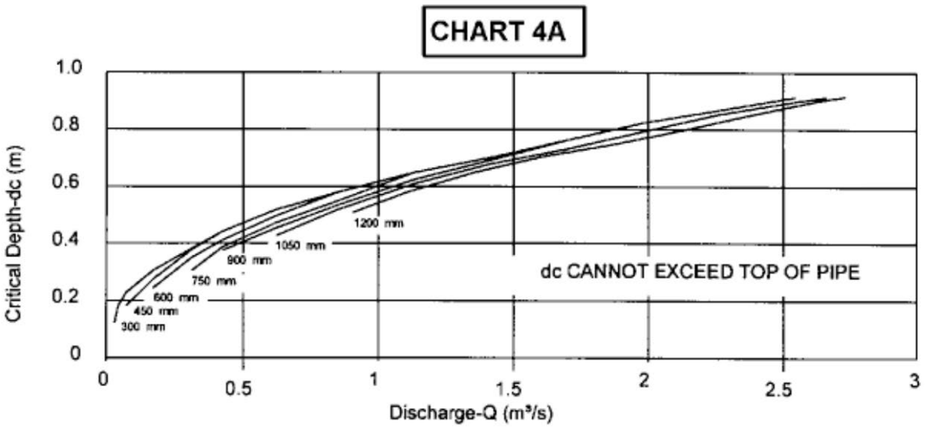
ملحق (ا)
النوموغرافات أو الآباكات اللازمة لعمليات التصميم الهيدروليكي للعبارات



الشكل 4-2: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الأنبوبية المعدنية المموجة حسب نظام المدخل



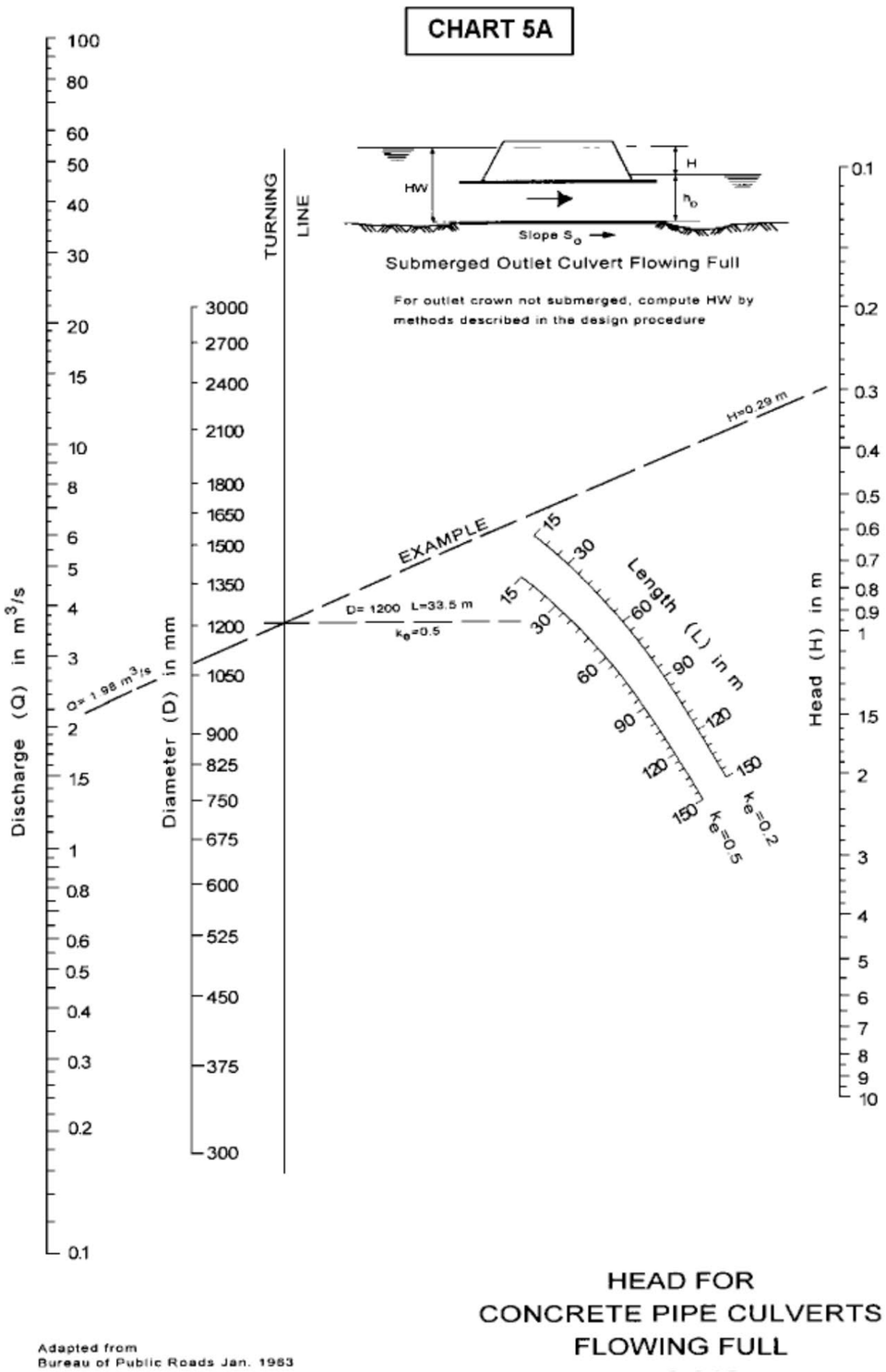
الشكل 4-3: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الأنبوبية الدائرية حسب نظام المدخل بحلقة مشطوفة



Adapted from Bureau of Public Roads

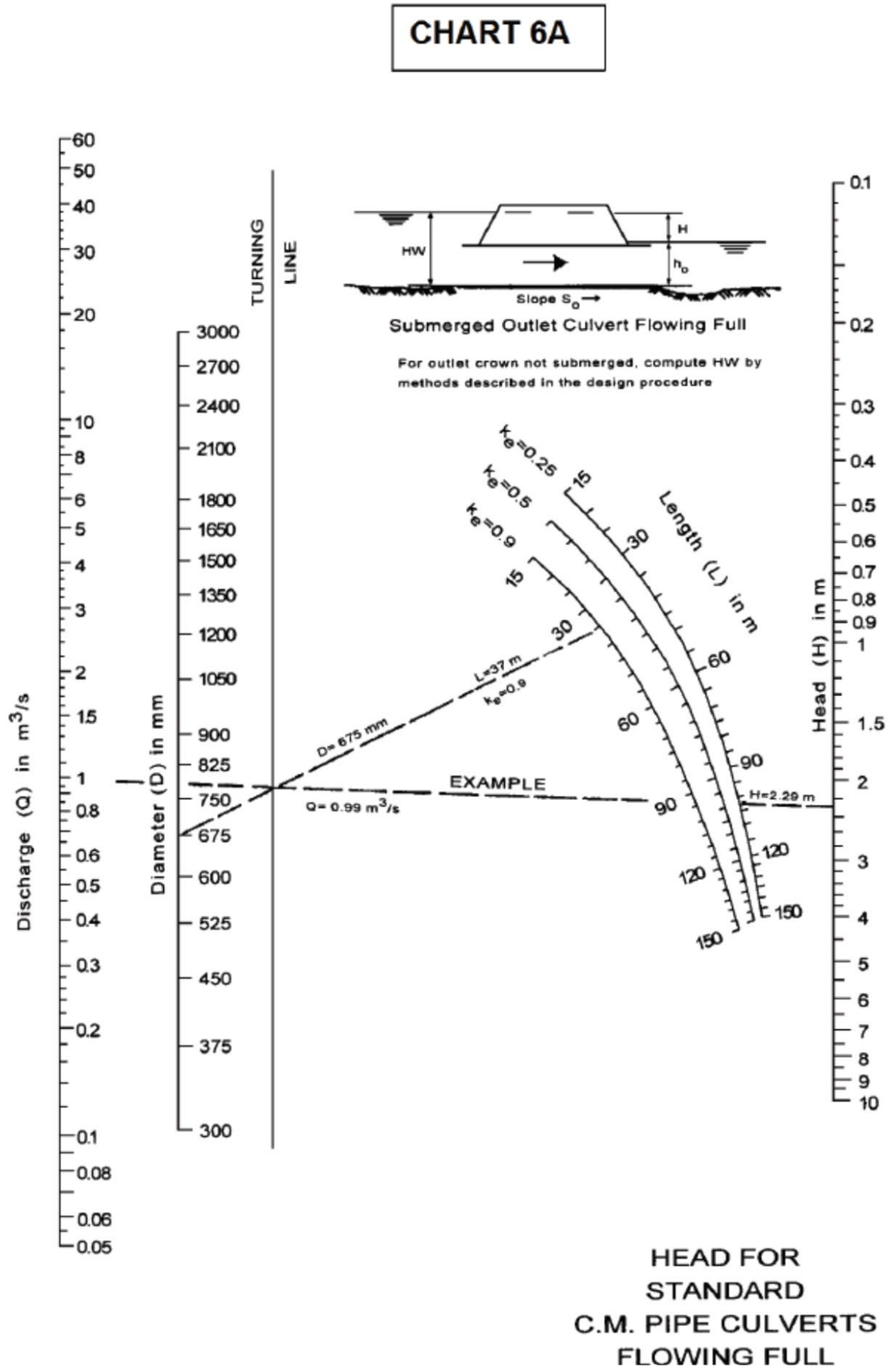
Critical Depth-Circular Pipe

الشكل 4-4: العمق الحرج للأنابيب الدائرية

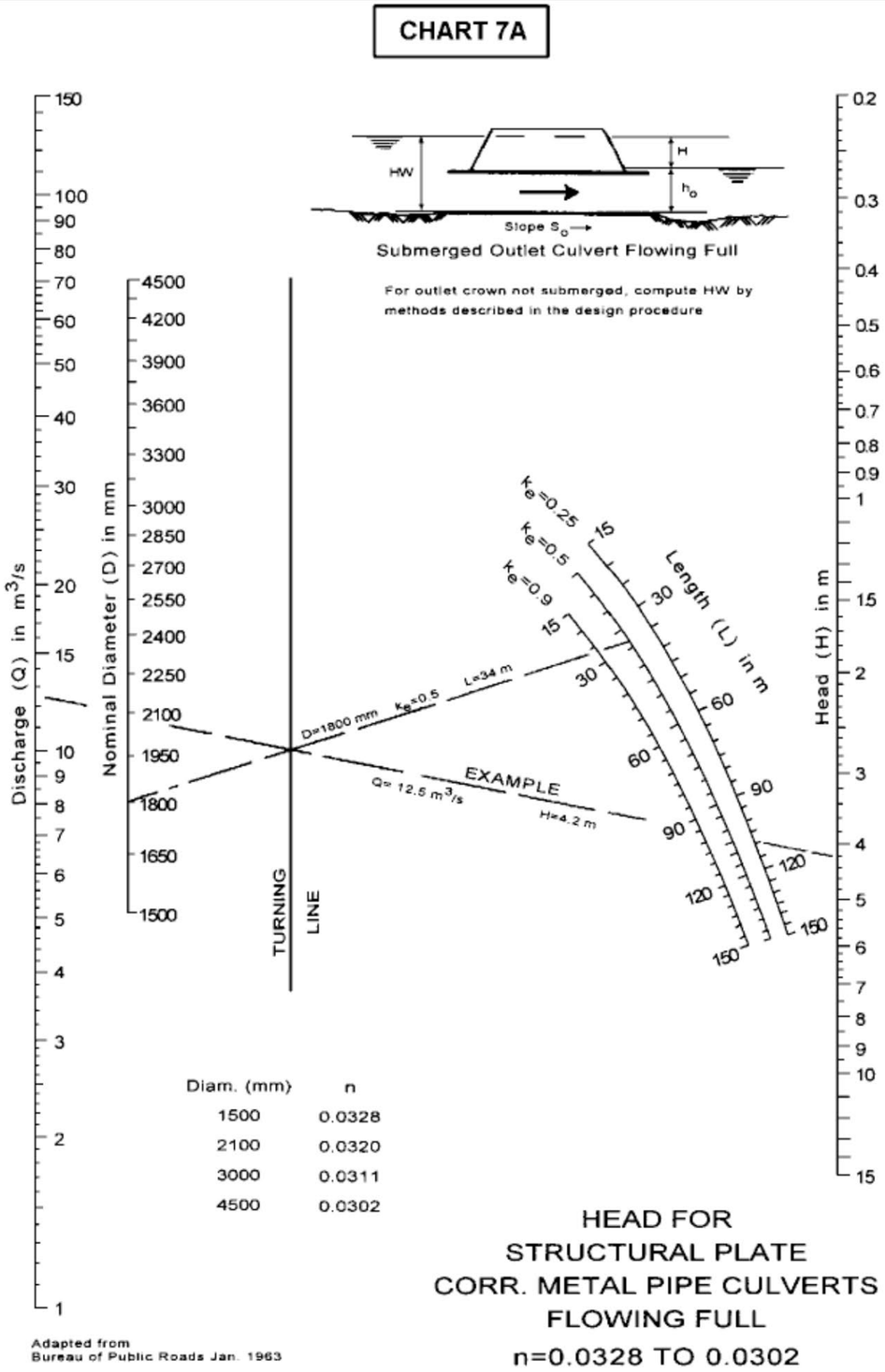


Adapted from
Bureau of Public Roads Jan. 1963

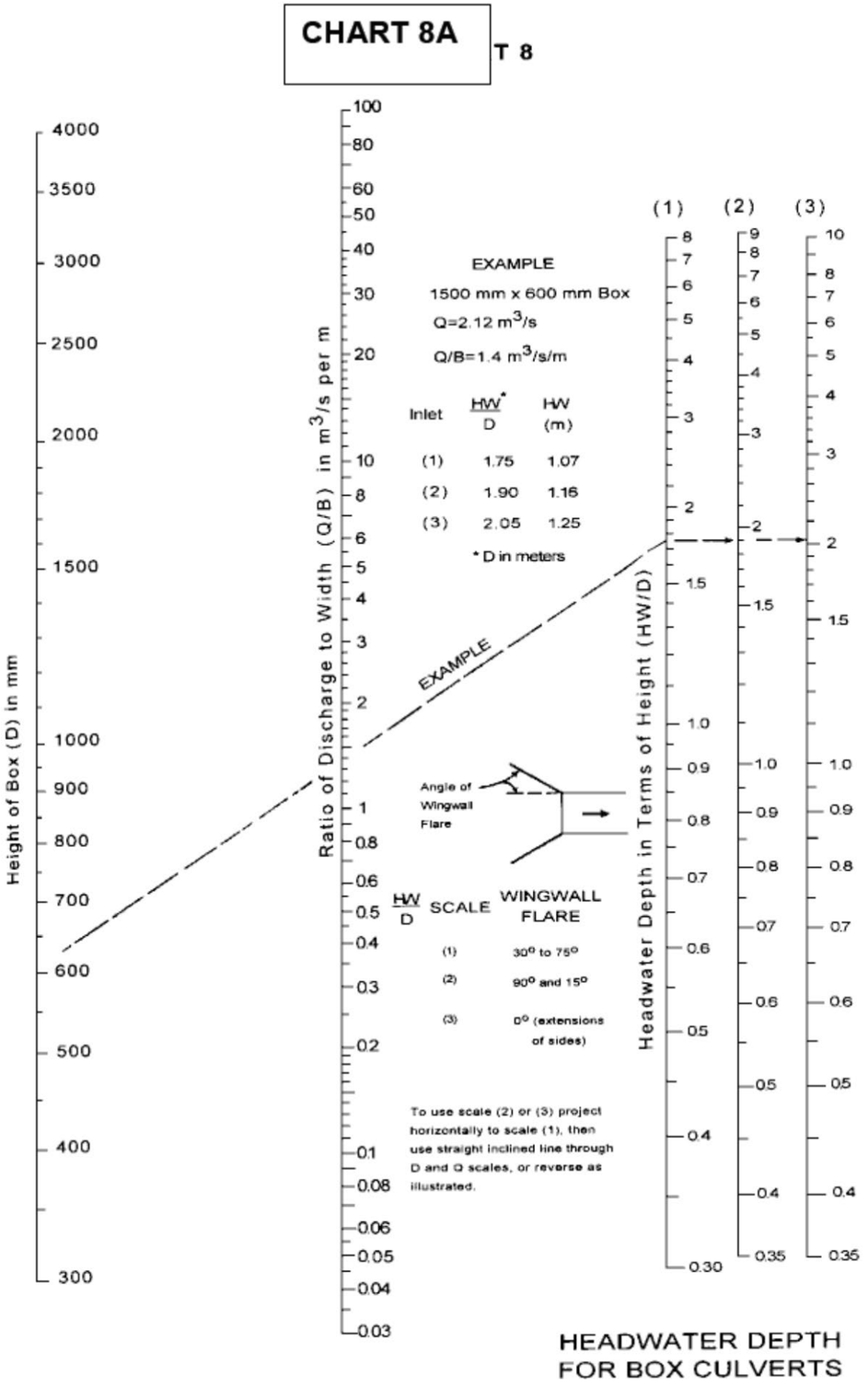
الشكل 4-5: فرق الضغط لعبارات أنبوبية خرسانية تحت التدفق الكامل



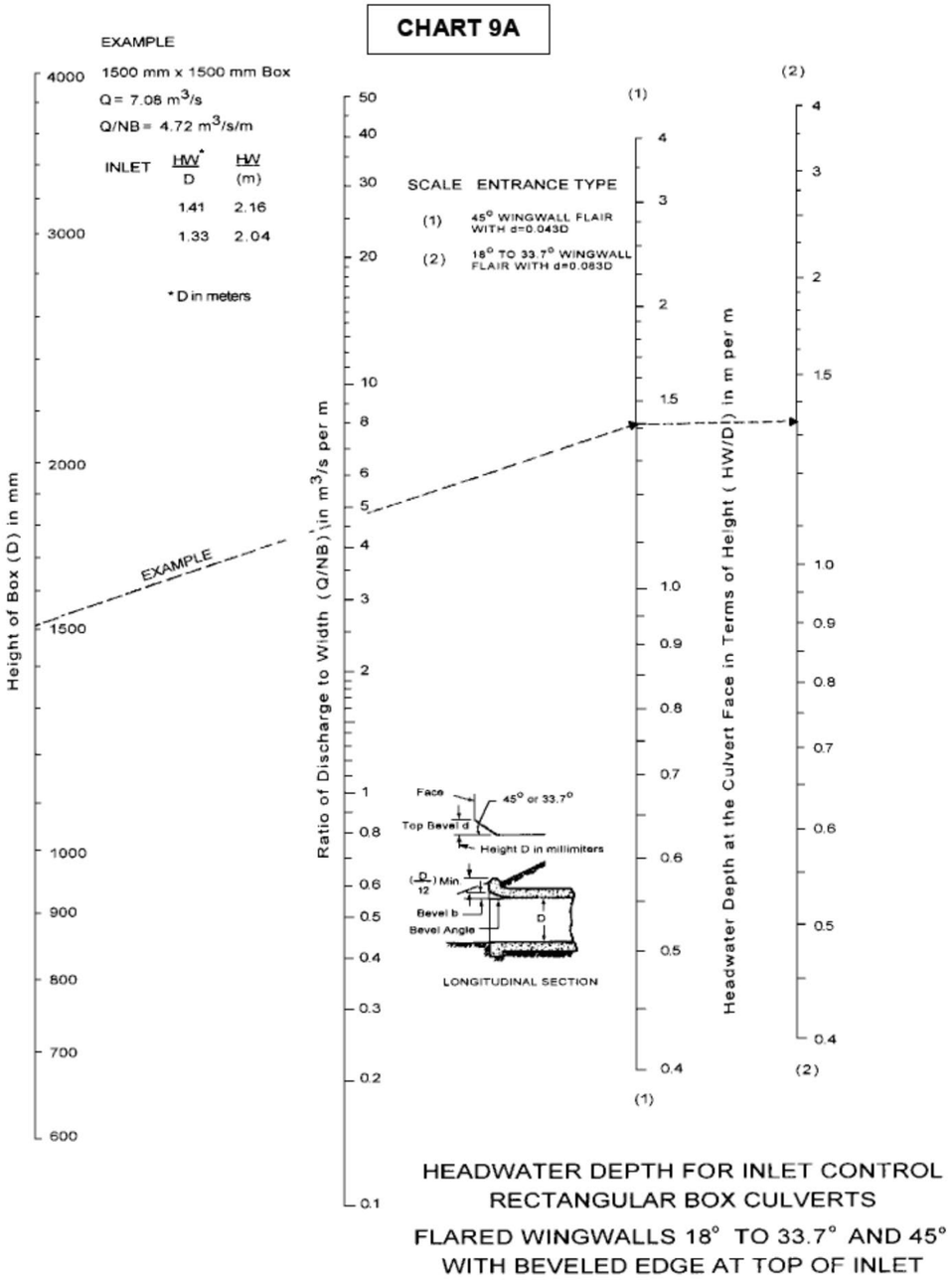
الشكل 4-6: فرق الضغط لعبارات أنبوبية معدنية مموجة نموذجية تحت التدفق الكامل



الشكل 4-7: فرق الضغط لعبارات أنبوبية مصنوعة من صفائح بنيوية معدنية مموجة تحت التدفق الكامل

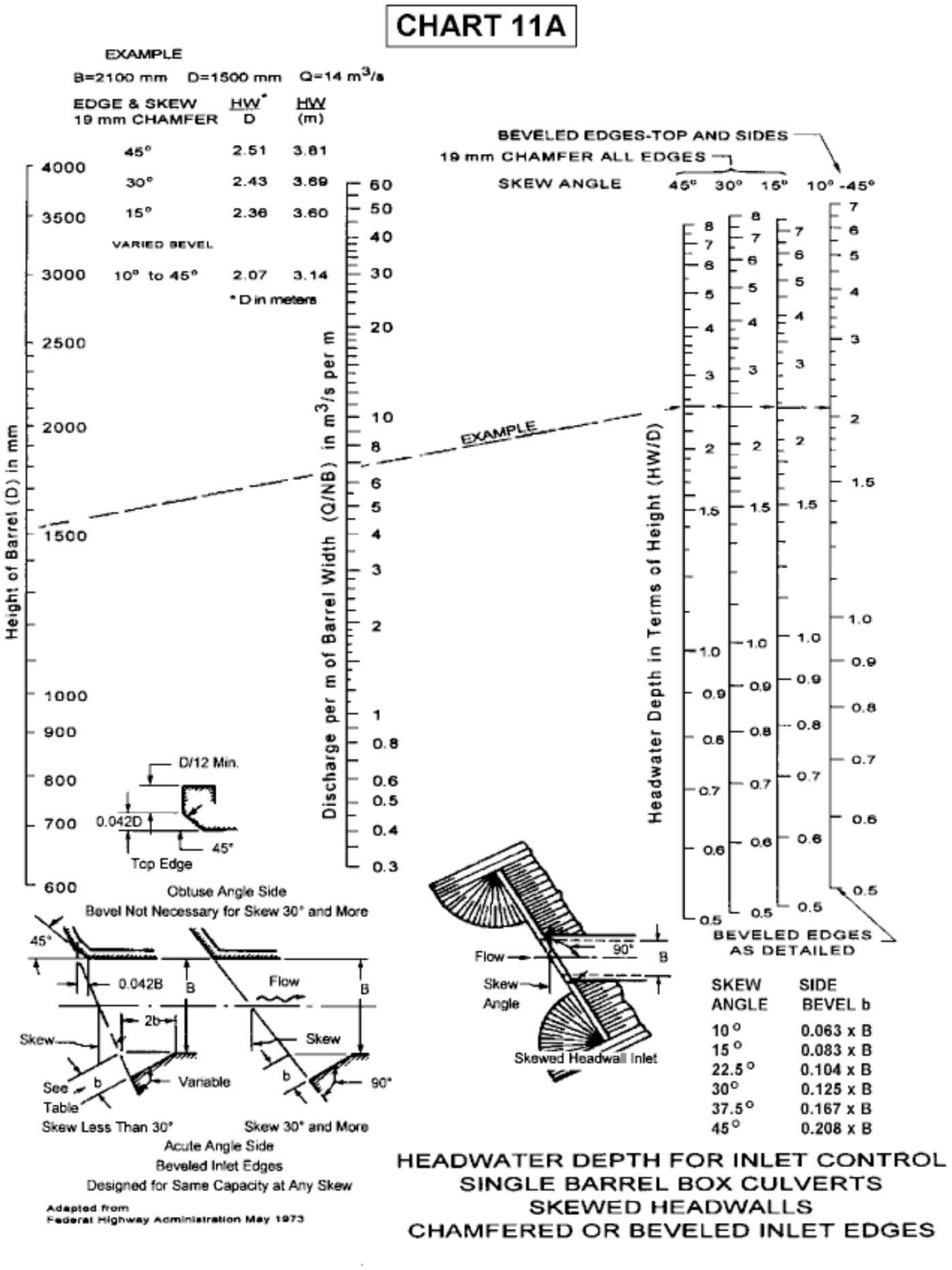


الشكل 4-8: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية حسب نظام المدخل



الشكل 4-9: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة حسب نظام المدخل

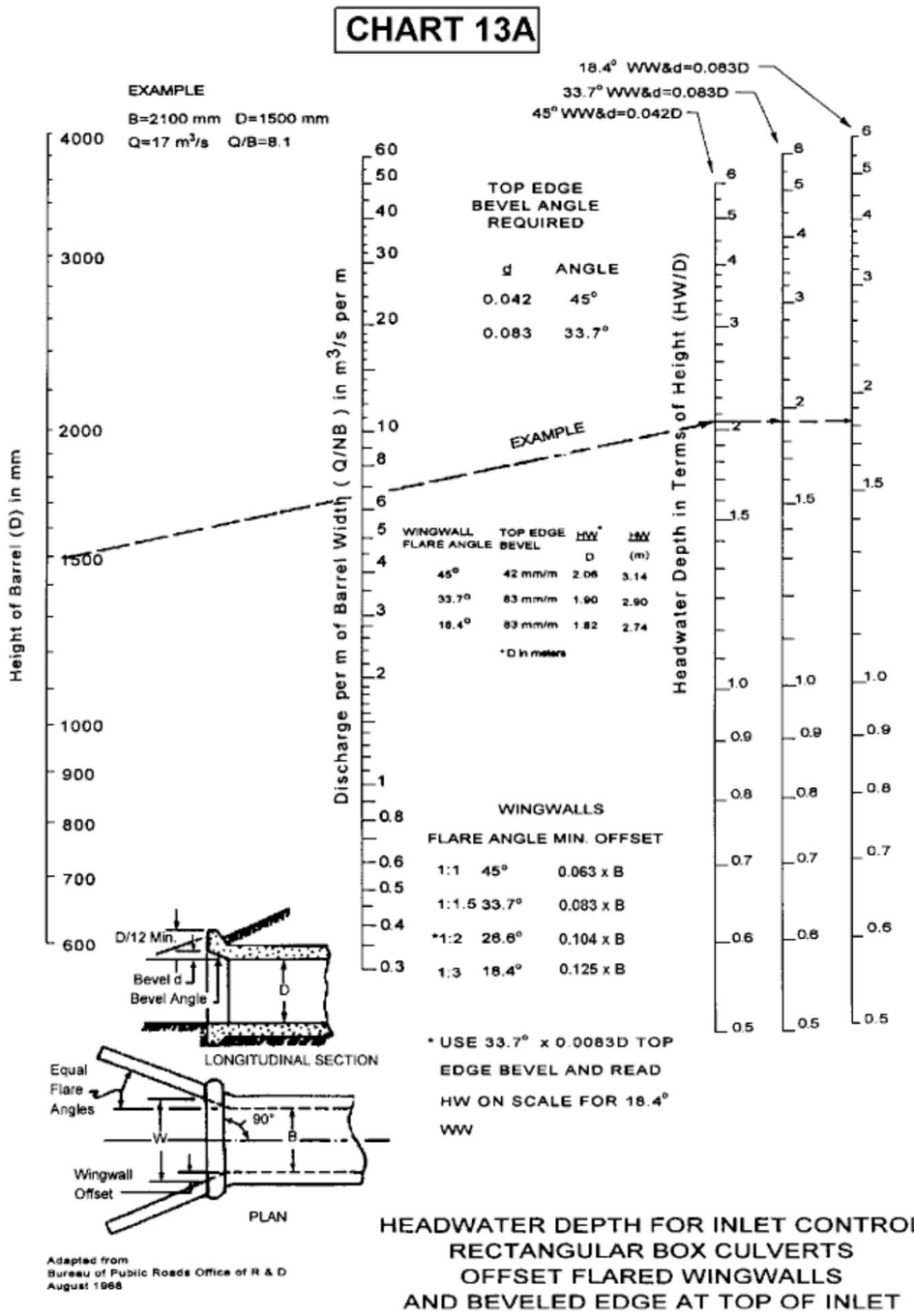
بحوائط جانبية مفلجّة من 018 -036 أو 045 وحواف مشطوفة عند قمة المدخل



الشكل 4-10: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة حسب نظام المدخل

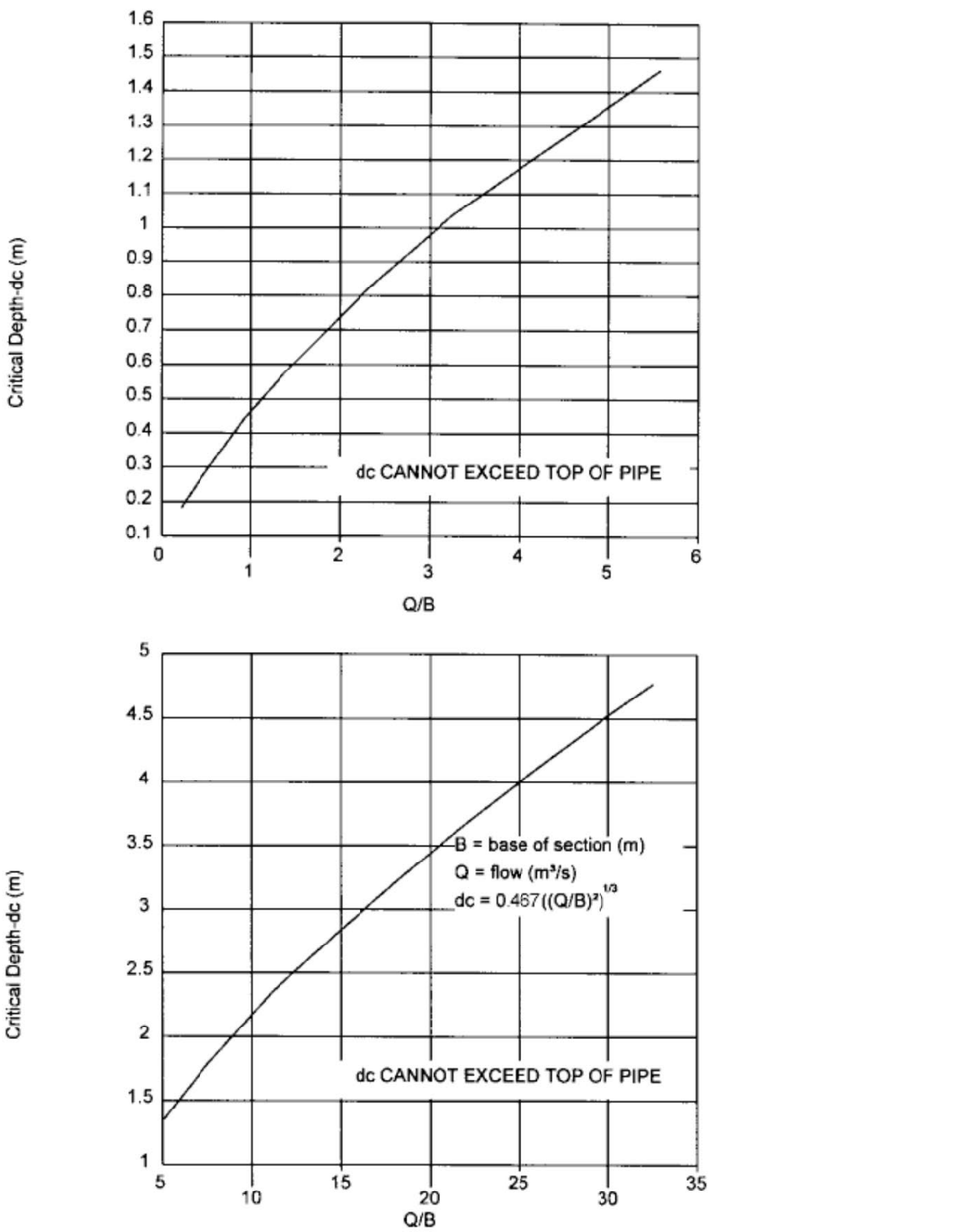
بحائط أمامي قائم 090 ومدخل بحواف مشطوفة أو مشذّبة

الشكل 4-11: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة ذات الخلية الواحدة حسب نظام المدخل - بحائط أمامي منحرف ومدخل بحواف مشطوفة أو مشذّبة



الشكل 4-12: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة حسب نظام المدخل – بحوائط جانبية مفلجّة ومداخل قائمة أو منحرفة وتشذيب 19مم عند قمة فتحة المدخل

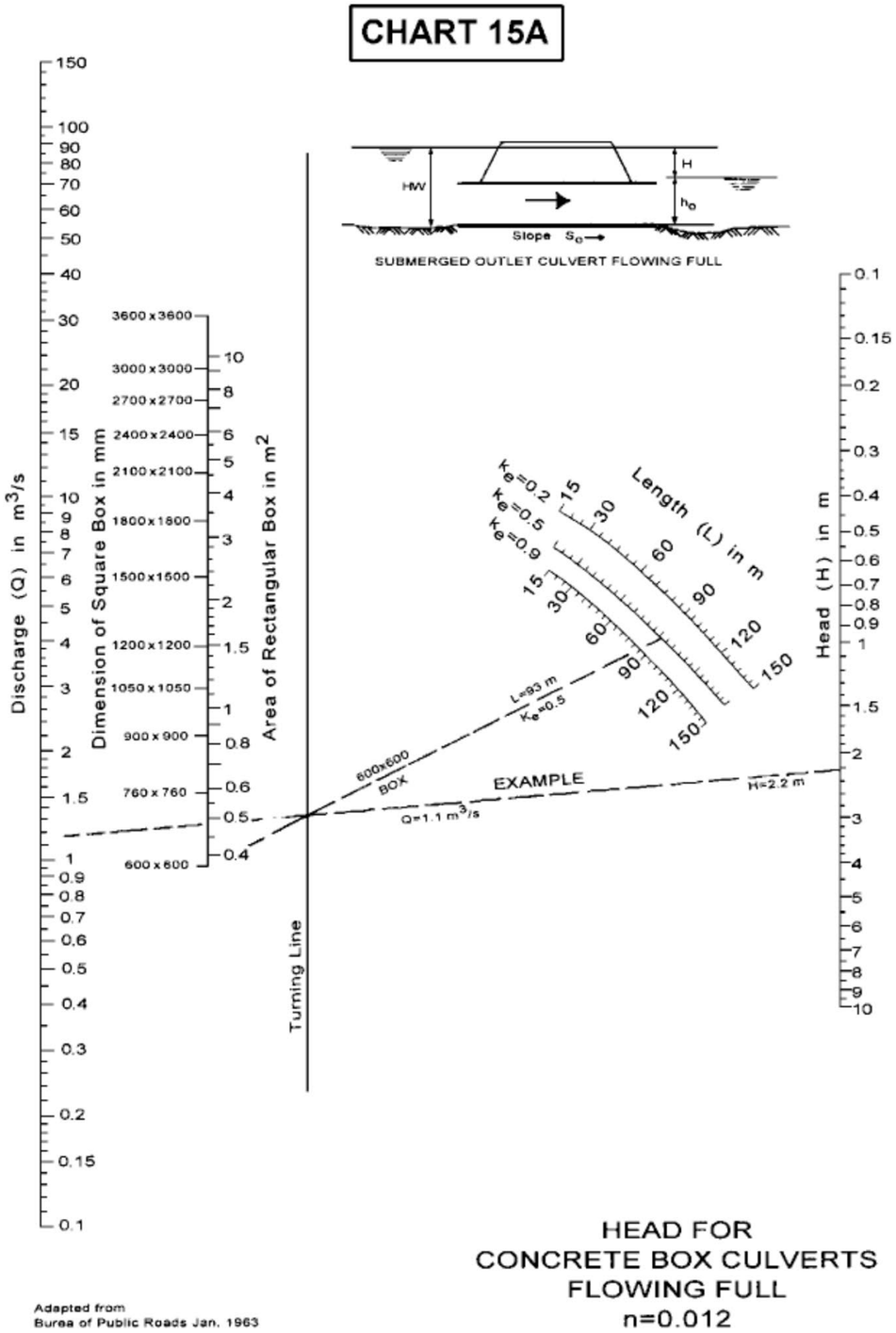
الشكل 4-13: عمق عمود الماء أمام المدخل للعبارات الصندوقية المستطيلة حسب نظام المدخل – بحوائط جانبية مفلجّة مُزّاحة وحافة مشطوفة عند قمة فتحة المدخل



Adapted from Bureau of Public Roads

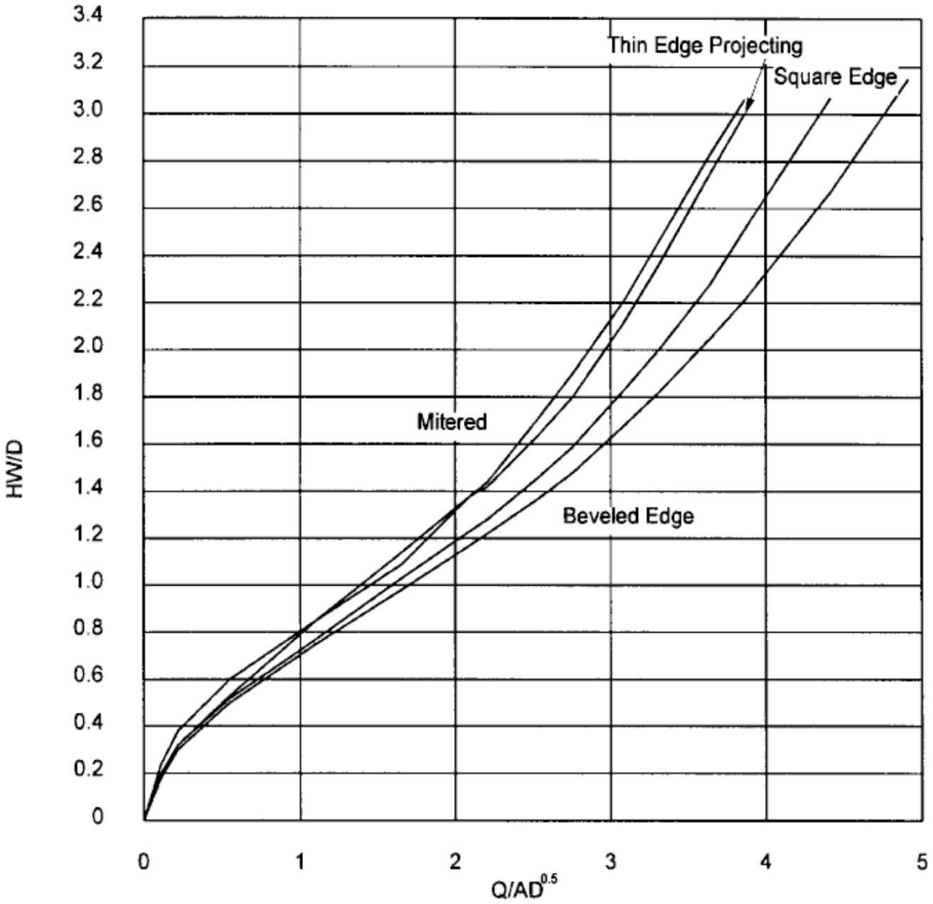
Critical Depth-Rectangular Section

الشكل 4-14: العمق الحرج للمقاطع المستطيلة



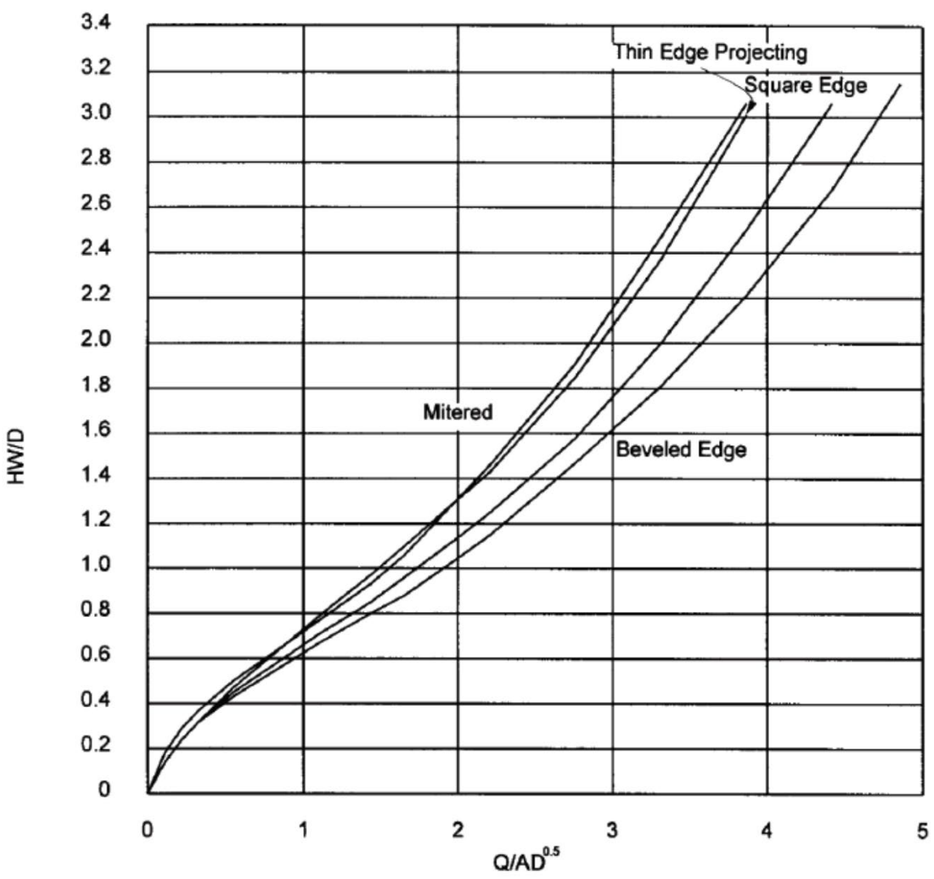
Adapted from
Burea of Public Roads Jan. 1963

الشكل 4-15: فرق الضغط لعبارات صندوقية خرسانية تحت التدفق الكامل



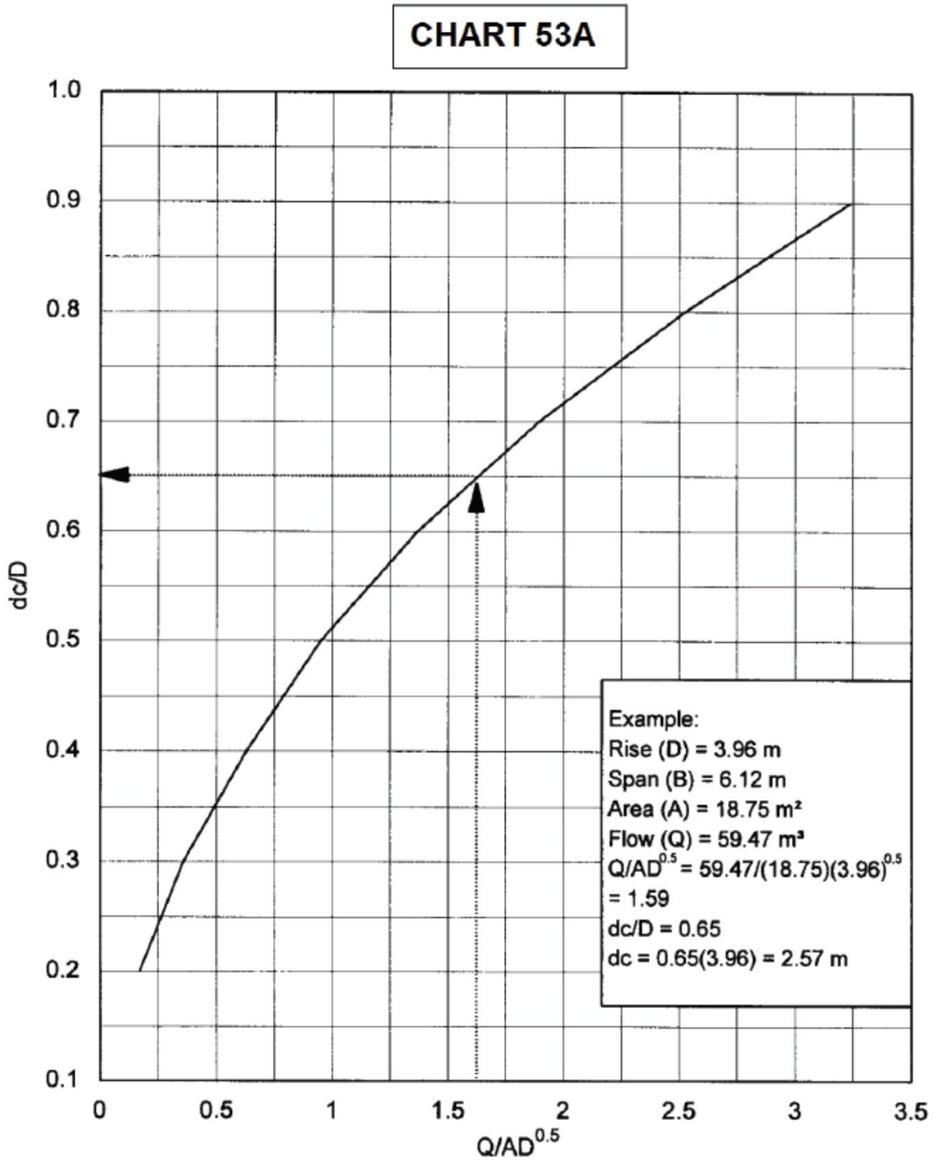
Inlet Control-Headwater Depth for Circular or Elliptical Structural Plate Corrugated Metal Conduits

الشكل 4-16: نظام المدخل – عمق عمود الماء للمجاري (العبارات) الدائرية أو البيضاوية المصنوعة من صفائح بنيوية معدنية مموجة



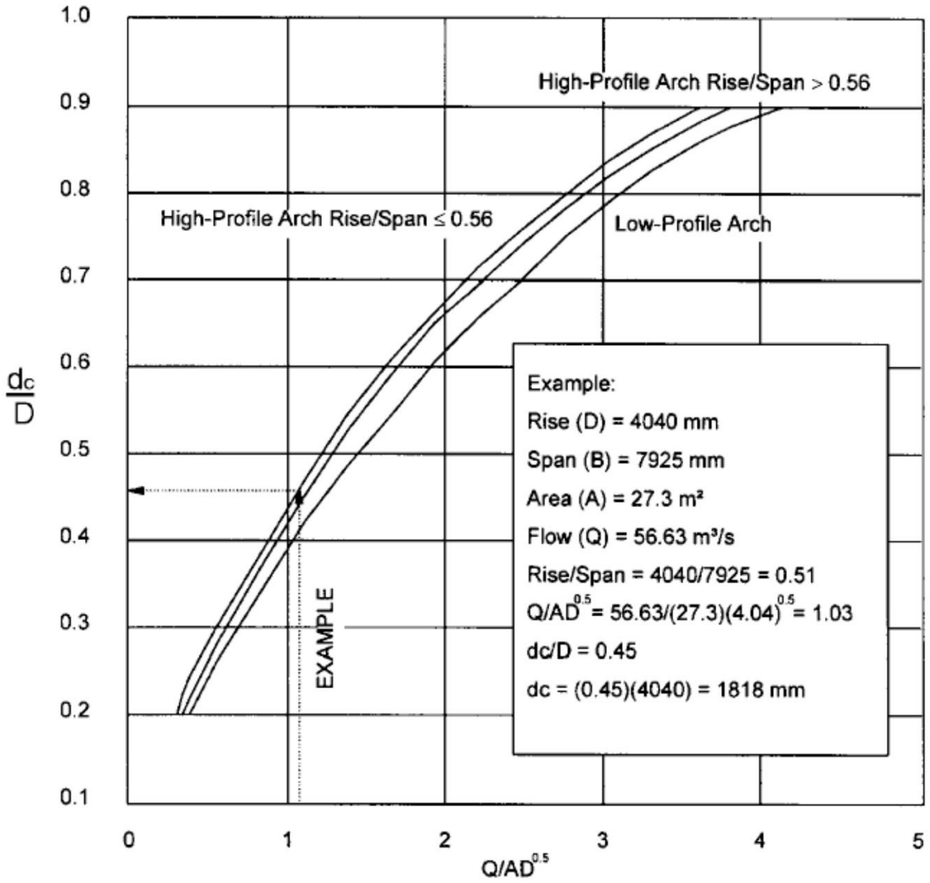
Inlet Control-Headwater Depth for High and Low Profile Structural Plate Corrugated Metal Arch

الشكل 4-17: نظام المدخل – عمق عمود الماء للعبارات القوسية العالية أو المنخفضة القمة والمصنوعة من صفائح بنيوية معدنية مموجة



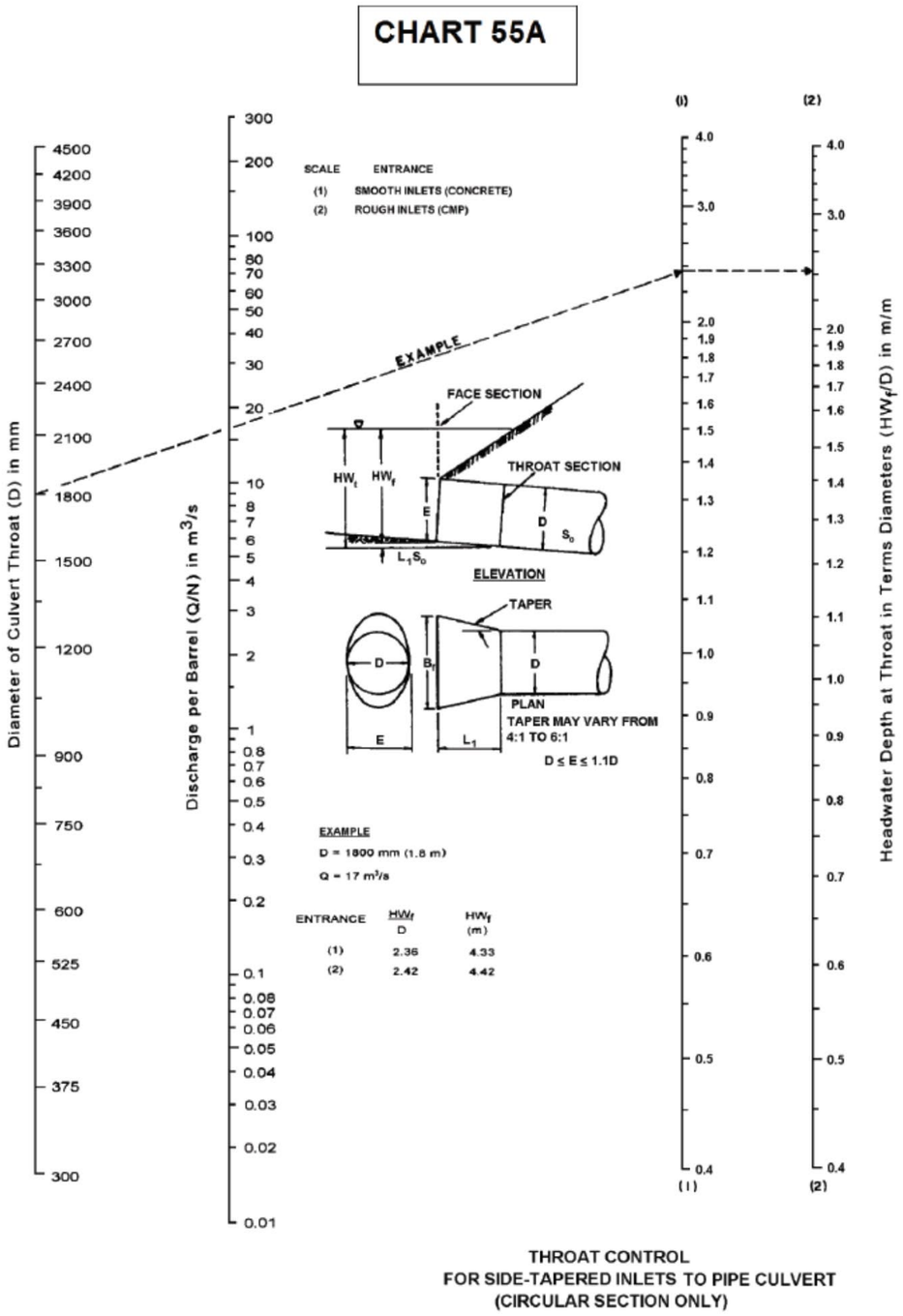
Dimensionless Critical Depth Chart for Structural Plate
Ellipse Long Axis Horizontal

الشكل 4-18: مخطط بياني للعمق الحرج للابعدي لعبارات بيضاوية محورها الأطول أفقي ومصنوعة من صفائح بنيوية معدنية مموجة



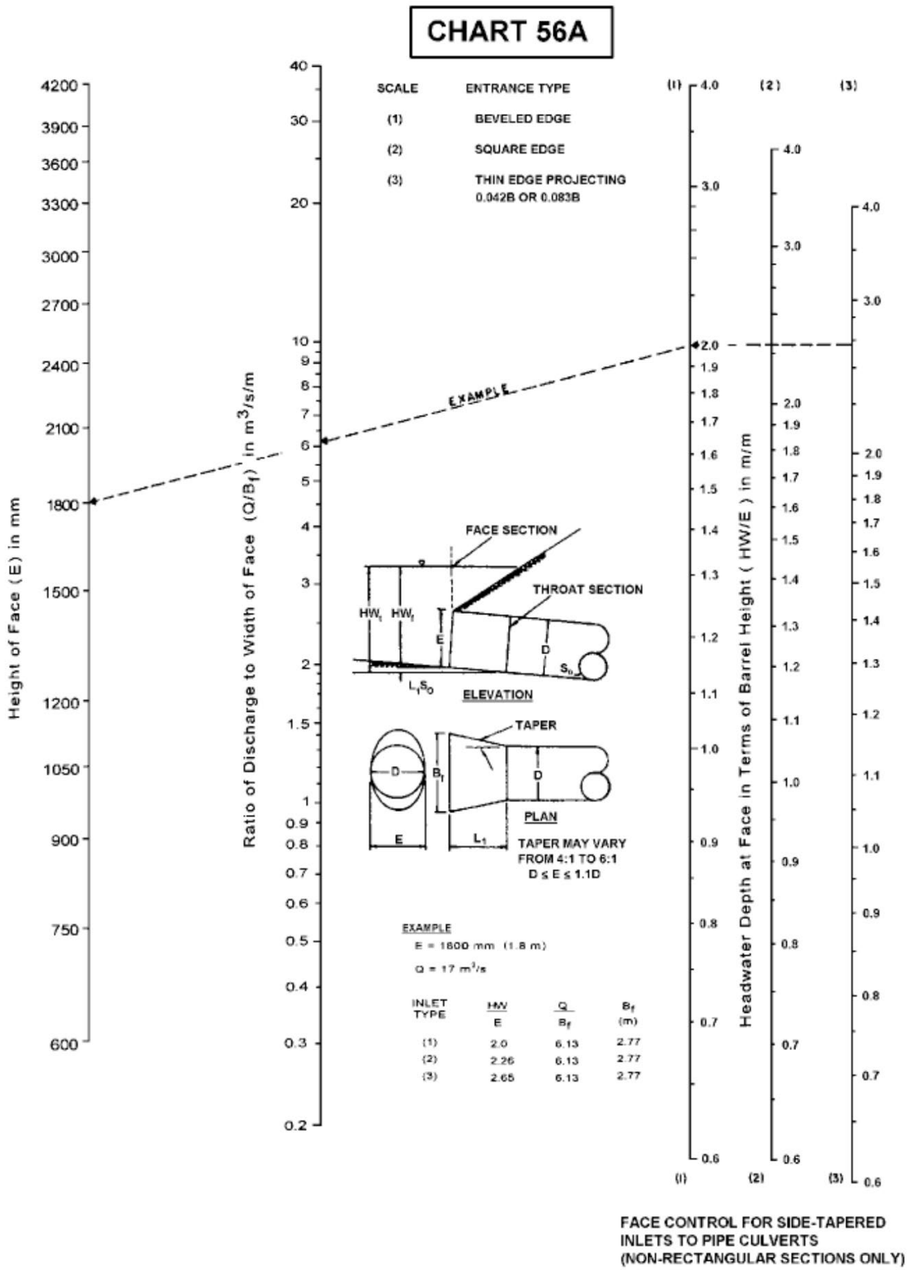
Dimensionless Critical Depth Chart for Structural Plate
Low- and High-Profile Arches

الشكل 4-19: مخطط بياني للعمق الحرج للابعدي لعبارات قوسية عالية أو منخفضة القمة ومصنوعة من صفائح بنيوية معدنية مموجة



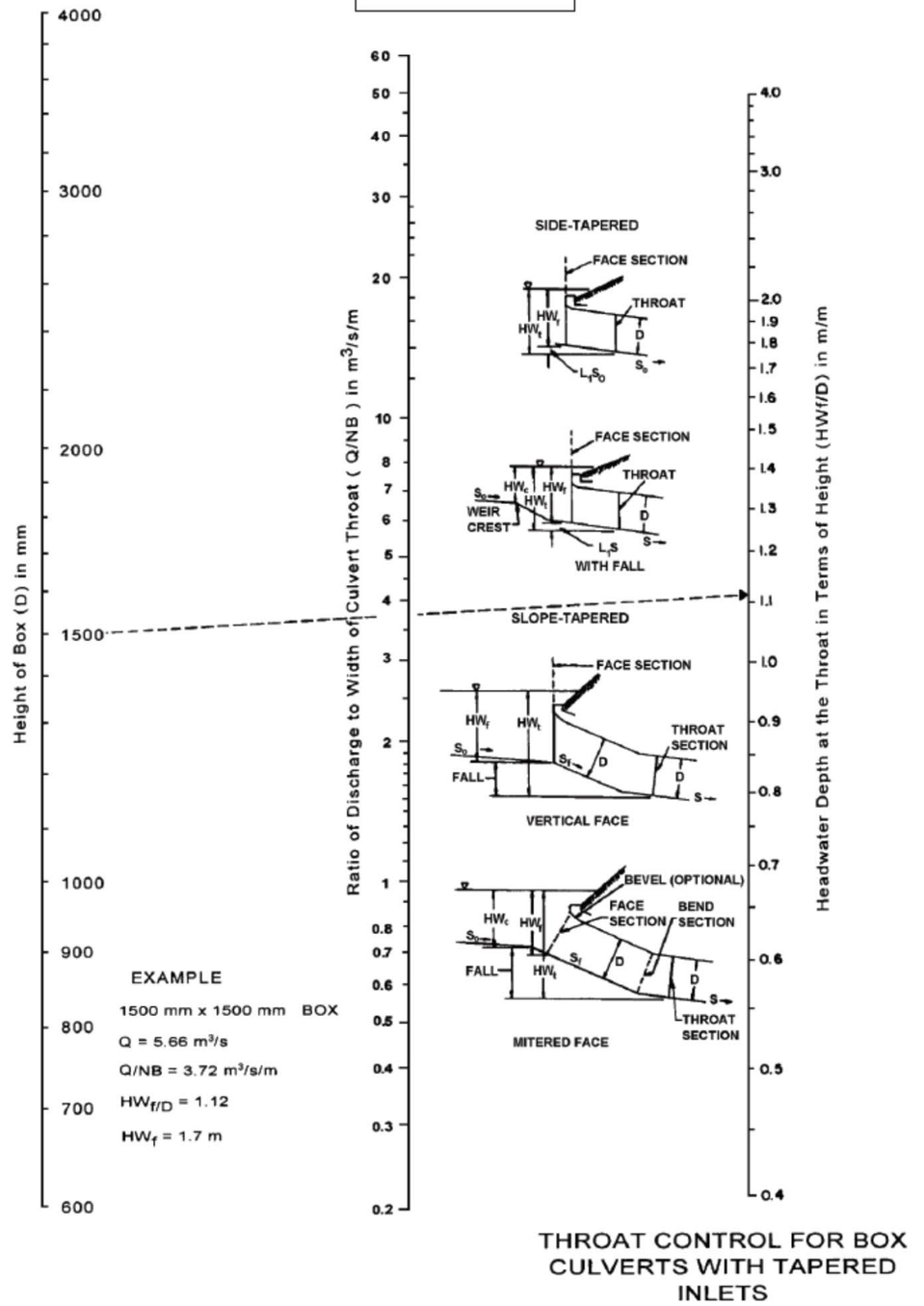
THROAT CONTROL
FOR SIDE-TAPERED INLETS TO PIPE CULVERT
(CIRCULAR SECTION ONLY)

الشكل 4-20: نظام المدخل (الحلق المُنَظّم) – للمداخل ذات الجوانب المستدقة أو المسلوبة تدريجيًا نحو أنبوب العبارة (للمقاطع الدائرية فقط)



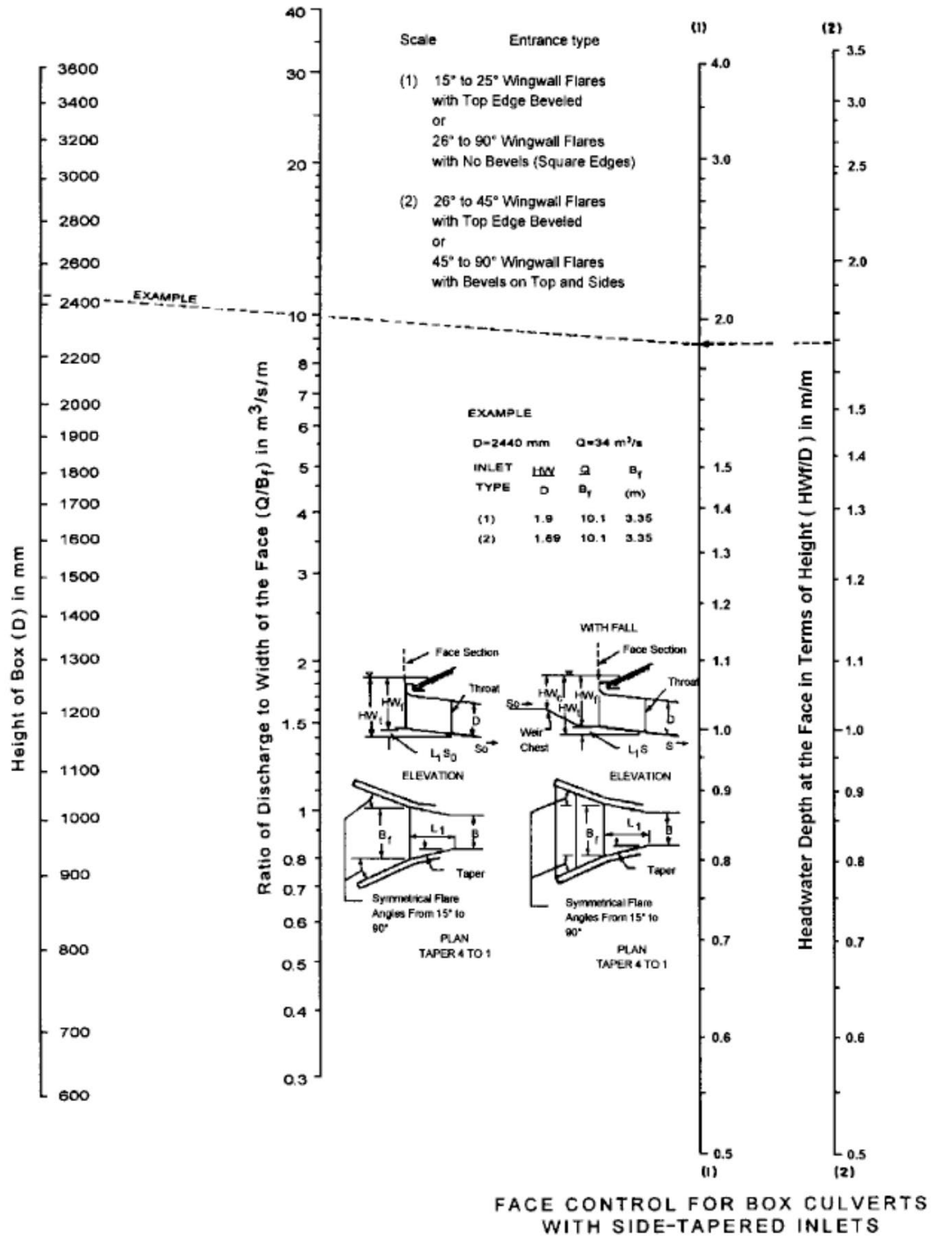
FACE CONTROL FOR SIDE-TAPERED
INLETS TO PIPE CULVERTS
(NON-RECTANGULAR SECTIONS ONLY)

الشكل 4-21: نظام المدخل (الواجهة المُنَظّمة) – للمداخل ذات الجوانب المستدقة أو المسلوبة تدريجيًا نحو أنبوب العبارة (للمقاطع غير المستطيلة فقط)



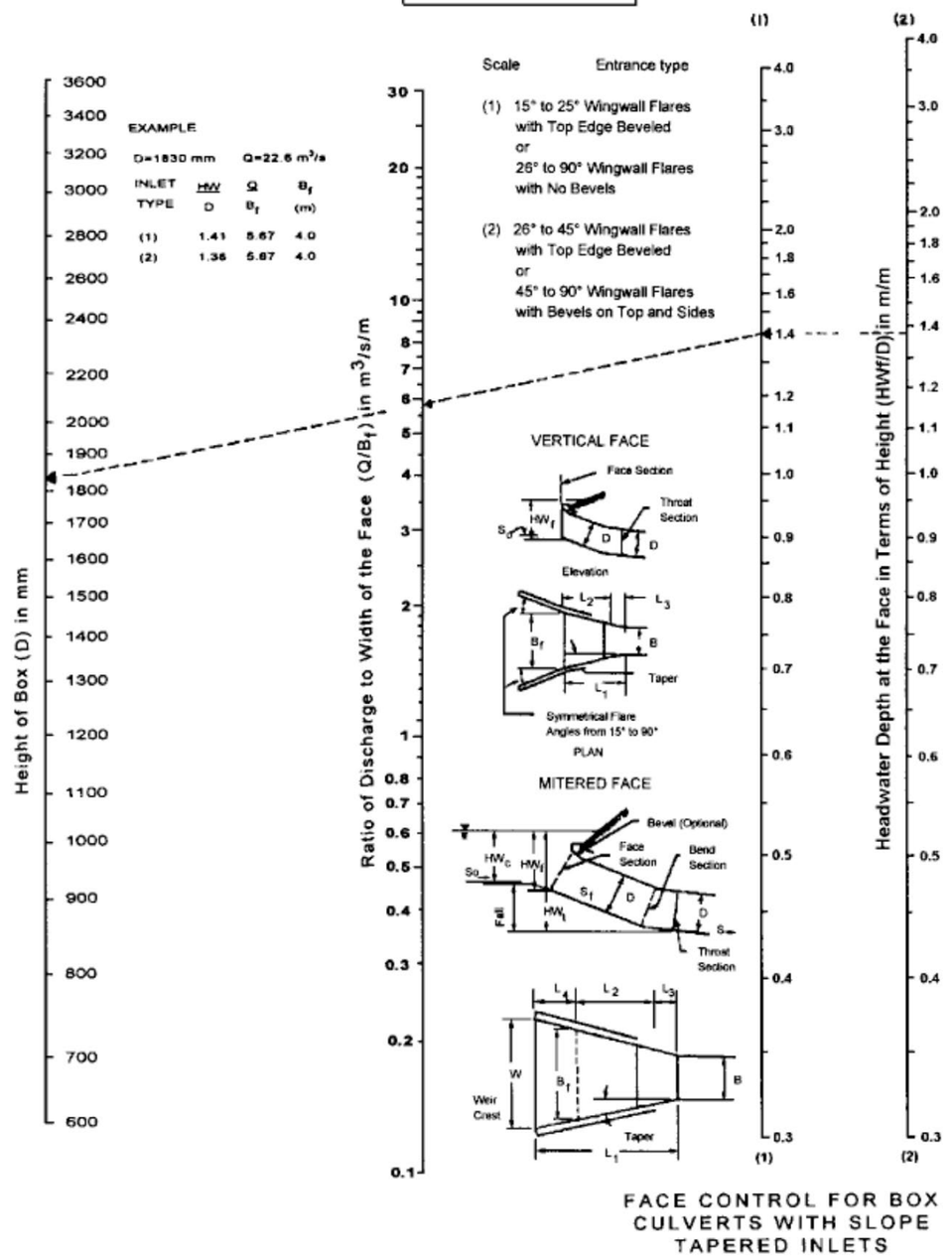
THROAT CONTROL FOR BOX CULVERTS WITH TAPERED INLETS

الشكل 4-22: نظام المدخل (الحلق المُنظَّم) لعبارات صندوقية بمداخل مستدقة أو مسلوبة



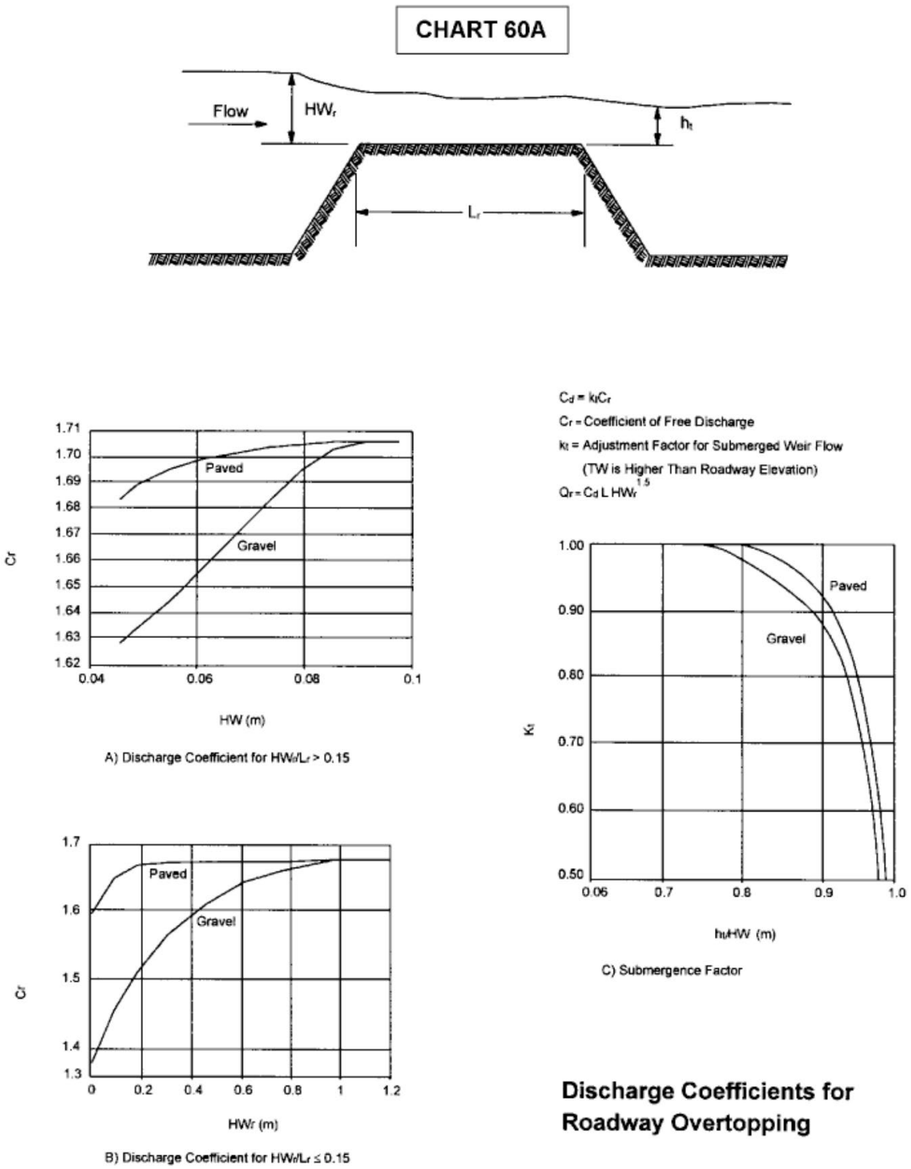
FACE CONTROL FOR BOX CULVERTS WITH SIDE-TAPERED INLETS

الشكل 4-23: نظام المدخل (الواجهة المُنَظَّمة) لعبارات صندوقية بمداخل مستدقة أو مسلوبة الجوانب



FACE CONTROL FOR BOX CULVERTS WITH SLOPE TAPERED INLETS

الشكل 4-24: نظام المدخل (الواجهة المُنَظّمة) لعبارات صندوقية بمداخل مستدقة أو مسلوبة الانحدار



الشكل 4-25: معاملات التدفق للفيض فوق الطريق

القسم الثالث
تصميم الجسور

إن الهـدف مـن إنشـاء الجسـور هـو تجـاوز المجـرى المـائي الـذي يعـترض مسـار المشـاة أو المركبـات أو كليهـما. ويختـص هـذا البـاب بدراسـة الجسـور عـلى الوديـان الجافـة المعرضـة لتدفقـات السـيول في مواسـم المطـر، ويطلـق عـلى تلـك الجسـور جسـور الأوديـة (WADI BRIDGES) والتـي تعـد مـن أهـم الوسـائل لتوفـير ممـر آمـن لعبـور ميـاه السـيول بالـوادي أو بالمجـرى المـائي كـما هـو موضـح في الشـكل 1-1. وتُحـدد فتحـة الجسـر بمـا يتناسـب مـع التدفـق التصميمـي مـع مراعـاة سرعـات الميـاه بمجـرى الـوادي وكذلـك عمـق الميـاه ونسـبة فتحـة الجسـر إلى الـوادي الطبيعـي. ومـن البدائـل للجسـور اسـتخدام العبّـارات والتـي تُفضّـل حـين تكـون أهميـة الطريـق تفـوق أهميـة الـوادي أو المجـرى المـائي، هـذا فضـلًا عـن مناسـبة العبّـارات للتدفقـات القليلـة والمتوسـطة.

الشكل 1-1: شكل يوضح مجرى السيل وتقاطعه مع موقع الجسر

وقد تم إعداد هذا القسم الخاص بالجسور؛ بهدف توفير المعلومات التقنية والإرشادات حول التصميم الهيدروليكي للجسور، مع تحديد البيانات المطلوبة لتخطيط وتصميم هذه الجسور هيدروليكيًا وفق أسس ومعايير موحدة، مع الأخذ في الحسبان المتغيّرات المختلفة التي تؤثر في عملية التصميم. ويتناول هذا الدليل شرحًا للتصميم الهيدروليكي للجسور.

1-1 مفاهيم عامة

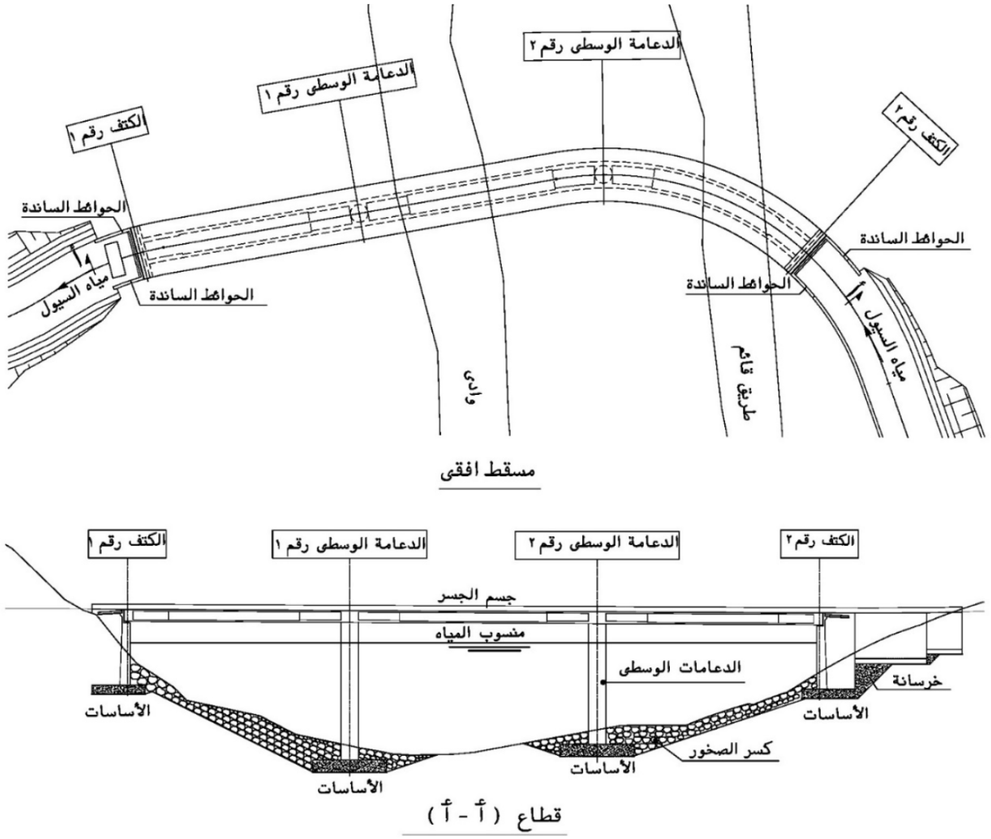
يعتمد الجسر من الناحية الهيدروليكية في الأساس على الحفاظ على مجرى وادي السيل نظرًا لتدفقاته الكبيرة التي قد تتسبب في انجراف الطريق الترابي إذا استُخدمت العبّارات بدلًا من الجسور. تُنشأ الجسور من مواد إنشائية مختلفة وبأشكال مختلفة. وتتكون الجسور من الأجزاء الأساسية الآتية، كما هو موضح في الشكل 2-1:

- سطح الجسر (DECK) وهو عبارة عن بلاطة الجسر بالإضافة إلى الكمرات الرئيسة والثانوية التي تحمل بلاطة الجسر.
- الدعامات الوسطى (الركائز الوسطية (PIERS والتي تسمى أحيانًا بالبغال والمسؤولة عن نقل أحمال أرضيات الجسر إلى الأساسات.
- الأكتاف (الركائز الطرفية (ABUTMENTS وهي الحوائط الساندة للأتربة على جانبي مداخل ومخارج الجسر.
- الأساسات (FOUNDATIONS) والتي تعدُّ العنصر الأساسي والمسؤول عن نقل وتوزيع الأحمال الكلية للجسر إلى تربة التأسيس أسفل سطح الأرض الطبيعي. وهناك نوعان من الأساسات إما أن تكون سطحية أو عميقة (على خوازيق مثلًا).

إن المتطلبات الهيدروليكية لتقاطعات مجاري السيول يجب أن تؤخذ في الحسبان أثناء تصميم الجسور. وهناك العديد من العوامل المؤثرة في الأداء الهيدروليكي للجسور ومنها:

- مكان وطول الجسر.
- مقدار تماثله أو انحرافه (SKEW) نسبة إلى محور مجرى السيل الأساسي.
- طول البحر (SPAN)، بالإضافة إلى مكان الدعامة الوسطى وتصميمها.
- تصميم الأساسات.
- مناسيب وشكل البنية الفوقية (SUPERSTRUCTURE).

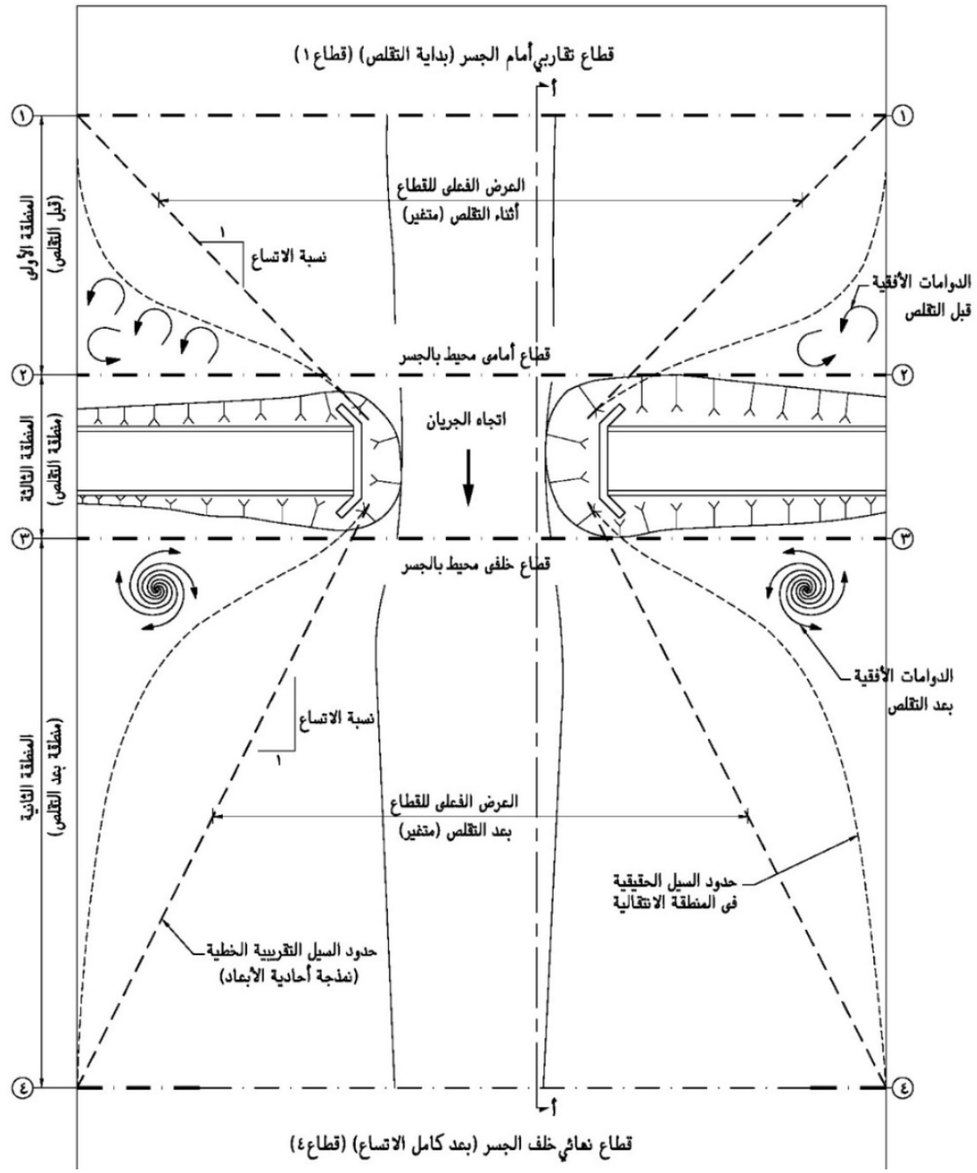
وفيما يلي شرح لبعض المفاهيم التي سوف تستخدم بكثرة خلال مرحلة التصميم الهيدروليكي للجسور.



الشكل 1-2: المسقط الأفقي والرأسي للجسر

1-1-1 ارتفاع المياه أمام الجسر (Bridge Heading-up)

يتسبب مرور مياه السيل خلال مجرى الوادي ثم انتقالها للمرور أسفل الجسر بقطاع أصغر في تقلص عرض المجرى المائي كما هو موضح بالشكل 3-1. ويوضح الشكل السابق خطوط الجريان (STREAMLINES) المتوقعة خلال مرور المياه من أمام الجسر وخلفه. ولا يسبب تقلص عرض المجرى المائي أسفل الجسر تغييرًا في مسار خطوط الجريان (STREAMLINES) عند منتصف الجسر، بل يظهر التغيير بوضوح قرب الأكتاف (ABUTMENTS). ويتسبب تقلص عرض المجرى المائي أسفل الجسر في فقد الكثير من الطاقة خاصة أثناء مرور المياه من منطقة التقلص أسفل الجسر وإلى القطاع الطبيعي للمجرى المائي (الأوسع) خلف الجسر. يتسبب هذا الفقد في الطاقة في ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر عن منسوب الجريان الطبيعي (NORMAL FLOW) خلف الجسر بمقدار ، ويسمى هذا الاختلاف في منسوب المياه بين أمام وخلف الجسر بارتفاع المياه (HEADING-UP) كما هو موضح بالشكل 4-1.



الشكل 1-3: خطوط الجريان عند الجسور فوق الأودية

ويجدر الإشارة إلى وجود ثلاثة أنواع من جريان المياه تحت الجسر (I، II، III)، وكذلك يمكن تقسيم النوع الثاني إلى نوعين A وB كما سيرد لاحقًا. ويمثل الخط المتقطع العلوي بكل القطاعات الموضحة في الشكل 1-4 سطح المياه في حالة الجريان الطبيعي (NORMAL DEPTH) قبل إنشاء الجسر (عمق المياه بها هو عمق الجريان الطبيعي)، والخط

المتصل فإنه يمثل سطح المياه الفعلي بعد إنشاء الجسر الذي يختلف من وضع لآخر حسب نوع الجريان، كما هو موضح في الشكل 1-4. أما الخط المتقطع السفلي بجميع القطاعات فإنه يمثل عمق المياه الحرج (CRITICAL DEPTH) بقطاع المجرى المائي.

يمكن تقسيم المجرى المائي بعد إنشاء الجسر إلى ثلاث مناطق كما هو موضح في شكل رقم (1-3): المنطقة الأولى هي منطقة ما قبل الجسر (عمق المياه الحرج بها يساوي y_{1c})، والمنطقة الثانية هي منطقة ما بعد الجسر (عمق المياه الحرج بها يساوي y_{4c})، وهاتان المنطقتان يكون قطاعهما هو قطاع المجرى في حالة الجريان المنتظم. أما المنطقة الثالثة والأخيرة فهي المنطقة أسفل الجسر (منطقة التقلص)، التي يكون فيها القطاع مستطيل الشكل (عمق المياه الحرج بها يساوي $2c$).

جريان من النوع I

خلال هذا النوع من الجريان يكون العمق الطبيعي o أعلى من العمق الحرج بالمناطق الثلاث السابق ذكرهم (الشكلان 1-3 و A 1-4)؛ ولذلك تم تصنيف هذا النوع كجريان تحت الحرج (SUBCRITICAL) وهو النوع هو الأكثر شيوعًا في الحياة العملية. سوف يتم شرح طريقة تقريبية لحساب مقدار الارتفاع في منسوب المياه أمام الجسر H_1^* لهذا النوع من الجريان خلال هذا القسم، وذلك للاطمئنان على أن منسوب المياه أمام الجسر لن يتجاوز المناسيب المسموح بها، التي قد تؤدي إلى غرق الجسر وما حوله.

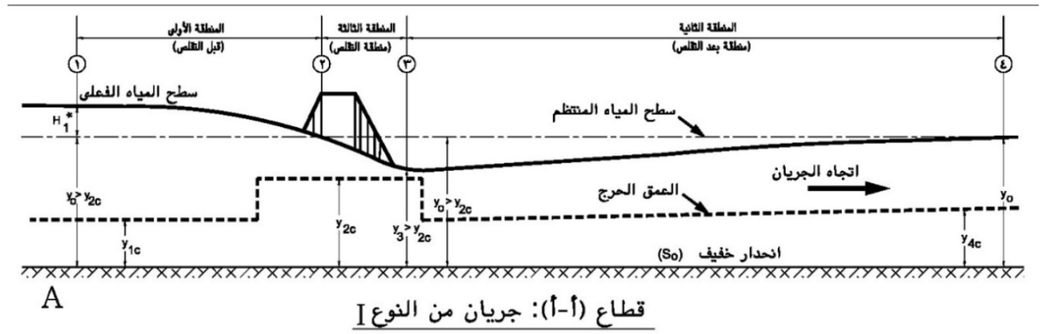
جريان من النوع IIA

في نوع الجريان (IIA) عمق الجريان الطبيعي بالمنطقتين الأولى والثانية ما زال أعلى من العمق الحرج، ولكن في المنطقة الثالثة (منطقة التقلص) فإن عمق الجريان يمر بعمق المياه الحرج (الشكل 4B-1). ونظرًا للوصول إلى العمق الحرج في منطقة التقلص، فإن ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر H_1^* لا يعتمد على مناسيب المياه وسرعاتها خلف الجسر (على الرغم من أن سطح المياه سيعود إلى عمق الجريان الطبيعي عند القطاع رقم 4)، بل يعتمد فقط على العمق الحرج ومكان حدوث هذا العمق، ومن ثم على أهمية عمل نمذجة هيدروليكية.

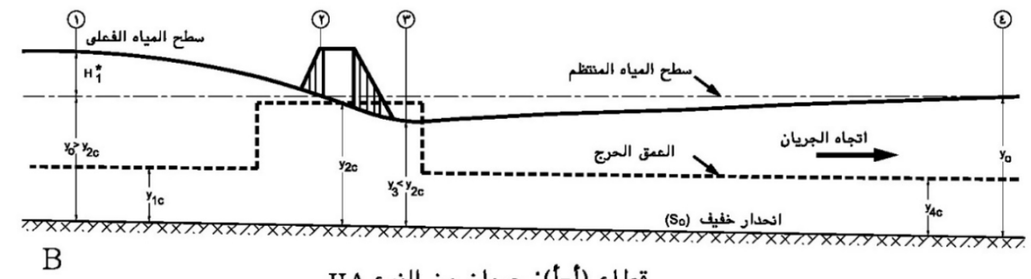
جريان من النوع IIB

يبدأ هذا النوع من الجريان بعمق جريان طبيعي أعلى من العمق الحرج بالقطاع رقم 1. ثم يبدأ عمق المياه بالمرور بالعمق الحرج بمنطقة التقلص (المنطقة الثالثة)، ويستمر في الهبوط أدنى من العمق الحرج بعد منطقة التقلص، ثم يعود إلى عمق الجريان الطبيعي في مسافة قصيرة من خلال قفزة هيدروليكية ضعيفة وبعدها يستمر في جريان طبيعي أعلى العمق الحرج وصولًا إلى القطاع رقم 4 (الشكل 4C-1). ويجب تلافي حدوث مثل هذا النوع من الجريان، ولذلك يجب - في التصاميم النهائية على الأقل - عمل نمذجة هيدروديناميكية لجريان المياه في الجسور؛ للتأكد من عدم حدوث هذا النوع من الجريان.

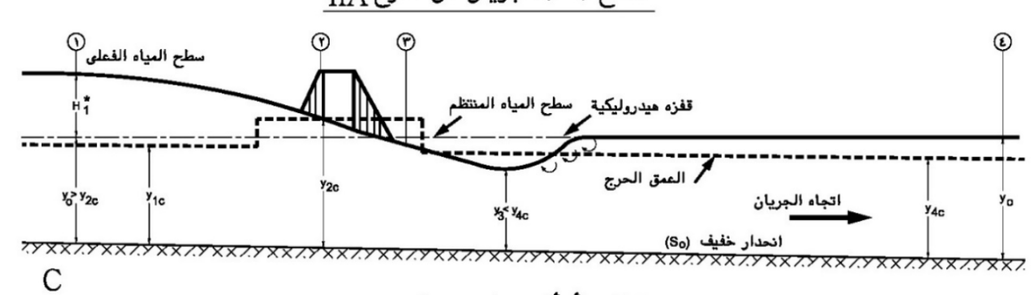
ويتم التعبير عن مقدار الارتفاع في منسوب المياه أمام الجسر H_1^* لنوعي الجريان IIA وIIB بتطبيق معادلة الطاقة الكلية (TOTAL ENERGY) بين القطاع رقم 1 والنقطة التي يمر بها عمق المياه بالعمق الحرج عند منطقة التقلص.



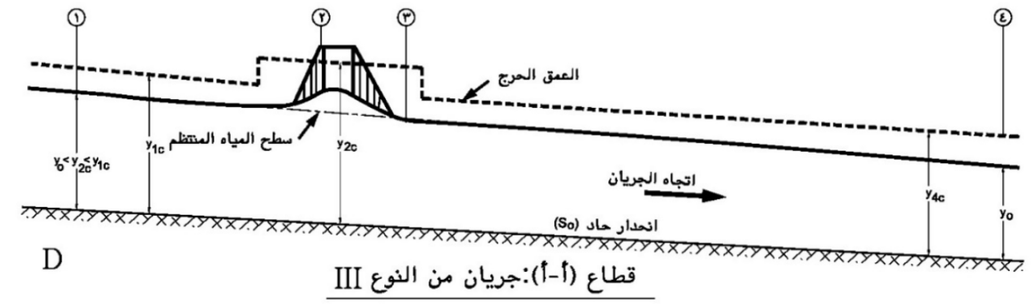
قطاع (أ-أ): جريان من النوع I



قطاع (أ-أ): جريان من النوع IIA



قطاع (أ-أ):جريان من النوع IIB



قطاع (أ-أ):جريان من النوع III

الشكل 14: أنواع الجريان عند الجسور وارتفاع منسوب المياه أمام الجسر عن خلفه (HEADING-UP)

جريان من النوع III

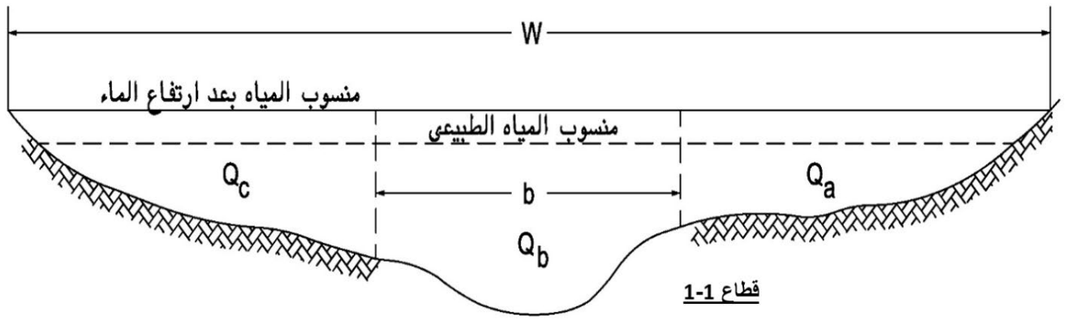
خلال هذا النوع من الجريان فإن عمق المياه الطبيعي بالمناطق الثلاث يكون أسفل العمق الحرج؛ ولذلك يسمى هذا النوع من الجريان بالجريان فوق الحرج. يحدث هذا النوع من الجريان في حالة الانحدار الحاد لقاع المجرى. من الناحية النظرية لا تكون هناك زيادة في منسوب المياه أمام الجسر H_1^* في هذا النوع من الجريان نظرًا لكونه جريانًا فوق الحرج (الشكل 1-4D).

2-1-1 وضع الجريان المنتظم (Uniform Flow)

يفترض في هذه الحسابات أن وضع الجريان الطبيعي هو الوضع الأصلي قبل إنشاء الجسر وفيه يكون سطح المياه موازيًا لقاع المجرى، ويكون عمق المياه ثابتًا ومساويًا لعمق المياه بافتراض الجريان الطبيعي (NORMAL DEPTH) (y_o) والموضح بالخط المتقطع في الشكل -41. ويُحسب عمق الجريان الطبيعي باستخدام أبعاد المجرى المائي عند قطاع رقم (1)، كما هو موضح بالشكل 5-1، وتفاصيل هذه الحسابات سيتم التعرض لها لاحقًا في هذا القسم. ويُقسّم الشكل 5-1 أجزاء التدفق الكلي أثناء السيل (Q) إلى ثلاثة أجزاء بمجرى الوادي الطبيعي أمام موقع الجسر. ويُرمز للجزء الأول بالرمز (QB)، وهو يمثل التدفق المار بمنتصف القطاع الأساسي لمجرى الوادي والمار أسفل الجسر من دون أي إعاقة (أثناء فترة السيل). أما الجزء الثاني ويُرمز له بالرمز (QA)، وهو التدفق المار على يمين قطاع مجرى الوادي الأساسي حتى حدود السيل، والجزء الثالث والأخير ويرمز له بالرمز (QC)، وهو التدفق المار على يسار قطاع مجرى الوادي الأساسي حتى حدود السيل، انظر الشكلين 3-1 و 5-1.

3-1-1 التقاطع العمودي المتماثل (Normal Crossing)

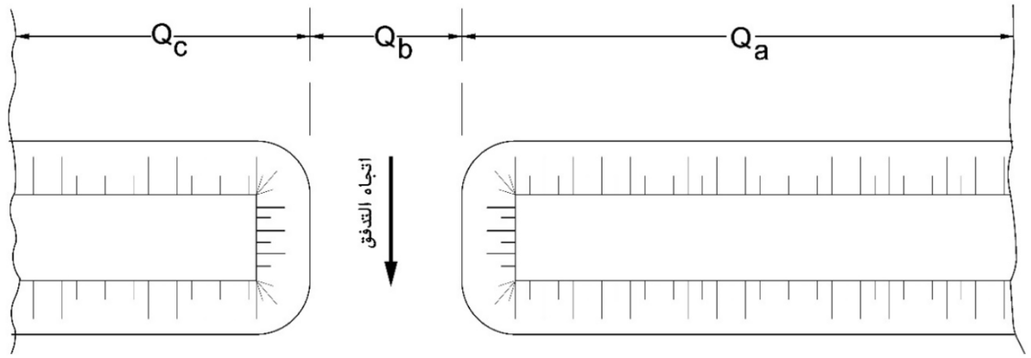
التقاطع العمودي المتماثل هو ذلك التقاطع الذي يتعامد فيه اتجاه التدفق بالمجرى على محور الجسر المقترح، بالإضافة إلى أن موقع الجسر والمكان المخصص لعبور المياه منه ينصف تقريبًا العرض الكلي لحدود السيل، كما هو موضح في الشكل 5-1.



الشكل 1-5: قطاع المجرى المائي عند قطاع رقم (1) أمام الجسر

4-1-1 التقاطع العمودي غير المتماثل (Eccentric Crossing)

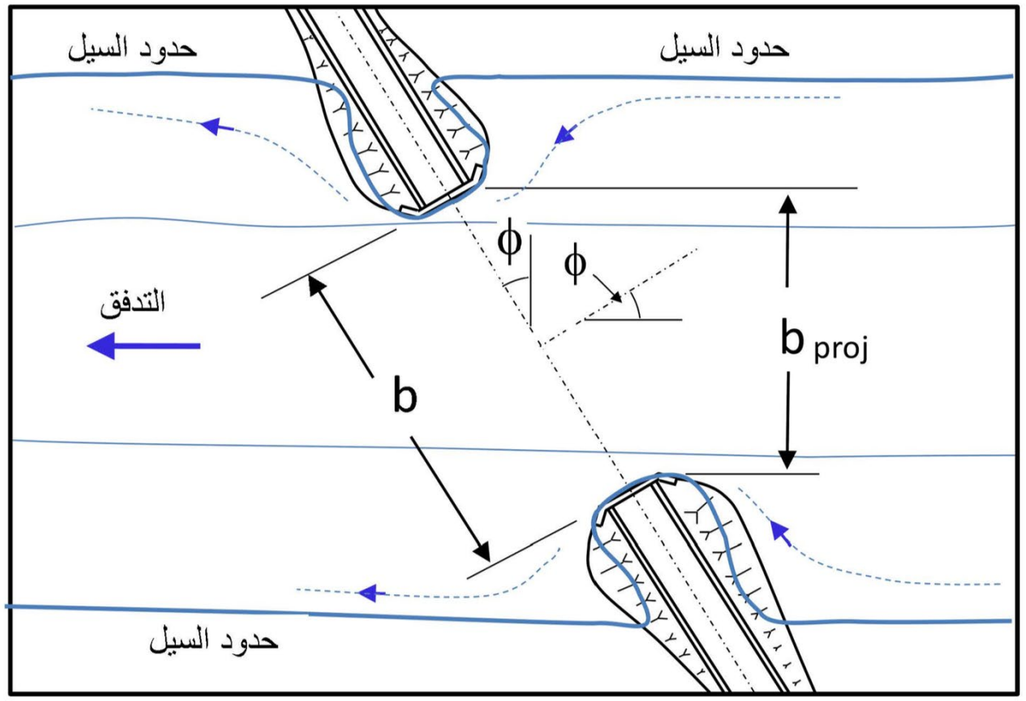
التقاطع العمودي غير المتماثل هو ذلك التقاطع الذي يتعامد فيه اتجاه التدفق بالمجرى على محور الجسر المقترح، ولكن موقع الجسر والمكان المخصص لعبور المياه منه لا ينصف العرض الكلي لحدود السيل، ولكنه يحيد يمينًا أو يسارًا، كما هو موضح في الشكل 6-1.



الشكل 1-6: شكل عام يوضح التقاطع العمودي غير المتماثل على مجرى السيل (ECCENTRIC CROSSING)

5-1-1 التقاطع المنحرف (Skewed Crossing)

التقاطع المنحرف هو التقاطع الذي لا يتعامد فيه اتجاه التدفق مع محور الجسر المقترح، ولكن يصنع زاوية مقدارها (f) وتختلف من موقع لآخر، كما هو موضح بالشكل 7-1.



الشكل 1-7: شكل عام يوضح التقاطع المنحرف لمجرى السيل (SKEWED CROSSING).

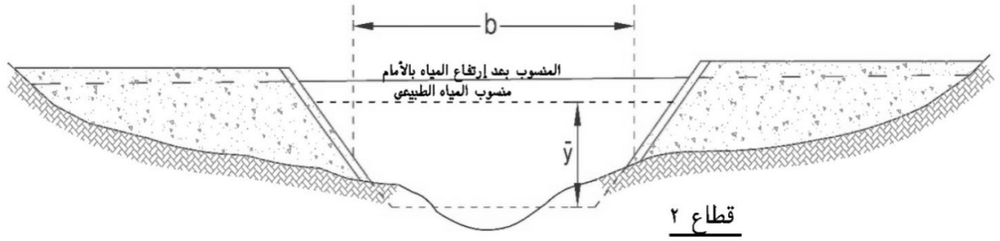
6-1-1 عرض التقلص (Constriction width)

يمكن التعبير عن عرض التقلص بأنه المسافة الأفقية بين أوجه الأكتاف (ABUTMENTS) عند منطقة التقلص (موقع الجسر). مع ملاحظة أن عرض التقلص في حالة التقاطعات العمودية المتماثلة وغير المتماثلة يساوي (B)، أما في حالة التقاطعات المنحرفة فإن عرض التقلص هو مسقط العرض على الأفقي الذي يساوي ($b\cos f$). ويتم تعريف زاوية الانحراف (f) بأنها الزاوية بين محور الجسر والاتجاه العمودي على اتجاه التدفق التي تساوي في الوقت ذاته الزاوية بين اتجاه التدفق والاتجاه العمودي على محور الجسر كما هو موضح بالشكل 7-1. وتُحسب قيمة عرض التقلص (B) في الوضع العمودي المتماثل عن طريق حساب مساحة المقطع المائي عند موقع الجسر (A_{2n}) وهو عند قطاع رقم (2) (الشكل 3-1 كما هو موضح بالشكل 8-1 (. ويُحسب عرض التقلص (B) في التقاطعات العمودية المتماثلة وغير المتماثلة من المعادلة الآتية:

$$b = \frac{A_{n2}}{y_o} \quad (3\text{-}1)$$

حيث إن:

A_{n2} : مساحة المقطع المائي أسفل عمق الجريان الطبيعي المتوسط (NORMAL DEPTH) () (عند قطاع رقم (2) أسفل الجسر).



الشكل 1-8: قطاع المجرى المائي عند قطاع رقم (2) أسفل الجسر

1-2 الحسبانات الهيدروليكية لتصميم الجسور (DESIGN CONSIDERATIONS)

1-1-2 التدفق التصميمي والتدفق الاختباري

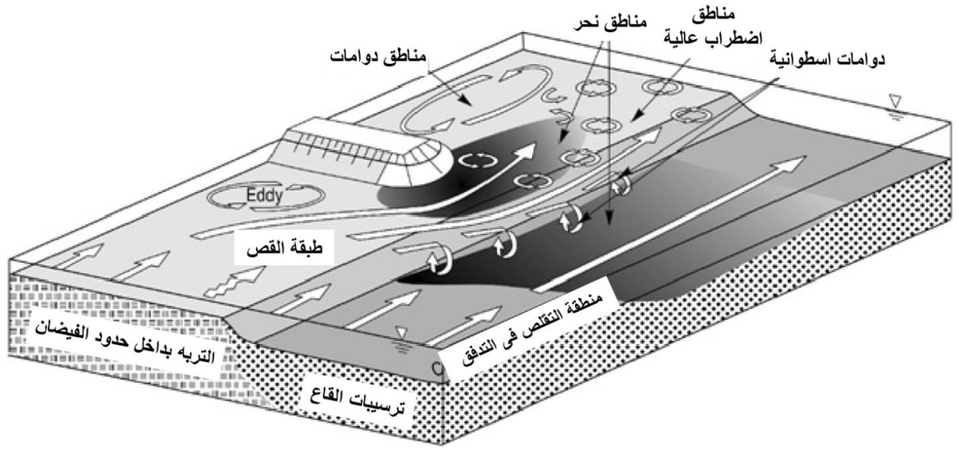
إن التدفق التصميمي للجسور هو لفترة تكرارية 100 سنة، مع العلم بأن التصميم يجب أن يُراجع على فترة سيل تكرارية 200 سنة لتحديد الآثار المترتبة على مرور التدفق ذي الفترة التكرارية 200 سنة من خلال الجسر المقترح. إن الهدف من هذا التحقق هو تحديد الأخطار المتوقعة على البشر وإتلاف الممتلكات أو انقطاع حركة المرور أو غيرها. كما يجب تصميم أساسات الجسر لتتحمل سيل ذي فترة تكرارية 500 سنة. ويجب تقييم التوسعات المتوقعة على المجرى المائي أو غيرها من التحسينات؛ من أجل التخفيف من حدة المخاطر المتوقعة التي تتمثل في:

- الخسائر البشرية.
- غرق المنشآت المهمة (على سبيل المثال، محطات توليد الطاقة الكهربائية الأساسية أو الفرعية، والمصانع الكيماوية ومصافي النفط والمياه أو محطات معالجة مياه الصرف الصحي).
- عزل المستشفيات أو غيرها من المؤسسات الداعمة للحياة (على سبيل المثال، الدفاع المدني والإسعاف ومحطات الإطفاء و/ أو غيرها من مراكز القيادات شبه العسكرية).
- غرق الجسور والمنشآت والمنازل المجاورة.

2-1-2 اعتبارات خاصة بالموقع

إن المعيار الأساسي والمستخدم في تصميم الجسور على تقاطعات مجاري الأودية، يجب أن يعتمد على خصائص الموقع التي تختلف من مكان لآخر ويجب أن تأخذ في الحسبان ومنها:

1. تغيّر مناسيب المياه أمام الجسر (HEADING-UP) والتي يجب ألا تؤثر بصورة ملحوظة في الوضع القائم قبل إنشاء الجسر.
2. السرعة المسموح بها للمياه خلال المنشأ التي لا تسبب أي دمار سواء للمنشأ (الجسر) أو لأي منشآت خلف الجسر (DOWNSTREAM) بوضع تأثير الدوامات في الحسبان (انظر الشكل 1-2). تختلف القيم المسموح بها للسرعة من موقع لآخر اعتماداً على الآتي:



الشكل 2-1 شكل الجريان في حدود السيل أسفل الجسر

- سرعة المياه في مجرى السيل قبل إنشاء الجسر.
- حبيبات التربة المكونة لقاع المجرى (BED MATERIAL).
- نوع التربة الموجودة بمكان الإنشاء (SOIL TYPES).
- نوع الأساسات (FOUNDATION TYPE).
- الخطورة المتوقعة من النحر والمشاكل الأخرى.

عادةً ما يصاحب إنشاء الجسور فوق مجاري السيول حدوث تقلص لعرض المجرى نتيجة وجود الدعامات الوسطية للجسر (PIERS) أو الأكتاف؛ ما يترتب عليه حدوث زيادة لسرعة الجريان بموقع الجسر؛ ولذلك وجب أن تكون هذه السرعات في الحدود المسموح بها لنوعية التربة الموجودة بقاع المجرى المائي في منطقة إنشاء الجسر. ويوضح جدول رقم 1-2 حدود هذه السرعات تبعًا لطبيعة التربة بموقع الجسر المراد إنشاؤه.

الجدول رقم 1-0: السرعات القصوى المسموح بها عند موقع إنشاء الجسور

مادة قاع مجرى السيل	السرعة الآمنة المسموح بها للتيار المائي عند موقع الجسر (متر/ثانية)
(طين وحصى) أو (رمل ناعم)	أقل من أو يساوي 0.5
رمل حرش	1.0-0.5
(حصى رفيع وطين) أو (طين متماسك)	1.5-1.0
حصى كبير أو تكوينات صخرية	2.5-1.5
حجارة كبيرة أو صخر	5.0-2.5

3. الحفاظ على توزيع السرعة وتوزيع التدفق بموقع الإنشاء اللذين يساعدان على تقليل الدمار المتوقع كنتيجة لتغيّر منسوب المياه (HEADING-UP) أمام الجسر أو بسبب زيادة السرعة بموقع الجسر.

4. تُصمّم الدعامات الوسطية والأكتاف (PIERS AND ABUTMENT) بحيث تقلل التشتت لحركة جريان مياه السيل وتقليل النحر المتوقع. يراعى تقليل عدد الدعامات الوسطية قدر الإمكان مع عدم وضع دعامات وسطية في المجاري المائية الصغيرة العرض. يجب أن تكون الدعامات الوسطية موازية لاتجاه جريان مياه السيل حتى لا تؤثر في زيادة أو ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر (HEADING-UP) ولا تؤثر كذلك في زيادة النحر، بالإضافة إلى أنه يجب أن يكون اتجاه الأكتاف موازيًا لاتجاه الدعامات الوسطية.

5. يجب ترك خلوص كافٍ (FREEBOARD) عند المنشأ والدعامات الوسطية لمرور أي عوالق تأتي مع السيل، فمن العوامل المهمة في تحديد ارتفاع الجسر فوق مستوى سطح الماء هو معرفة أقصى منسوب يمكن أن تصل إليه مياه السيول؛ وذلك لضمان عدم غمر الجسر بمياه السيول، وكذلك ضمان مرور أي عوالق أو رواسب متجمعة أمام الجسر دون أدنى ضرر على العناصر الإنشائية المختلفة للجسر. بالإضافة إلى أنه يجب عمل انحناءات ودورانات عند بداية ونهاية الدعامات الوسطية تقلل من أي تجمعات لأي عوالق أمام المنشأ. ويحدد جدول رقم 2-2 قيم الخلوص الواجب توافره وتركه بين منسوب سطح الماء بالمجرى المائي في الأمام وأدنى نقطة من الجسر. ومنسوب سطح المياه المقصود هو تلك المناظر للتدفق التصميمي.

الجدول رقم 2-0: الخلوص الواجب توافره بين سطح الماء في الأمام وأدنى نقطة من الجسر(Freeboard)

التدفق (م³/ثانية)	الخلوص (Freeboard) (سم)
أقل من 0.3	15
3.00- 0.31	45
30.0 -3.10	60
300 – 31	90
3000-301	120
أكبر من 3000	150

3-1-2 متطلبات الرفع المساحي للجسور

لا توجد قاعدة عامة لتحديد الرفع المساحي اللازم للقيام بالتحليل الهيدروليكي للجسور، إذ تعتمد حدود الرفع المساحي إلى حد كبير على حالة الموقع؛ ولذلك يجب أن يقوم المصمم الهيدروليكي بزيارة الموقع والاجتماع مع مسؤول الرفع المساحي لتحديد أماكن القطاعات المطلوبة وأي بيانات أخرى مطلوبة من الموقع. وفيما يلي إرشادات عامة يجب أخذها في الحسبان.

1. الطريق: يجب معرفة قطاع الطريق القائم والمقترح.

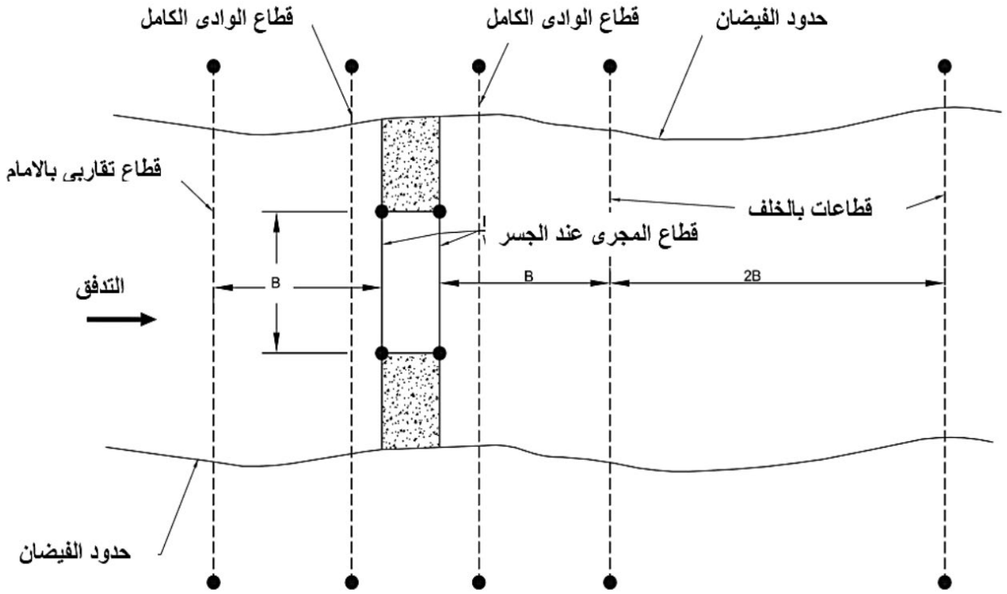
2. قطاعات عند مقدمة الجسر: القيام برفع مساحي للمجرى المائي أمام وخلف المنشأ عند التقاء الميل الجانبي للطريق مع الأرض الطبيعية. يجب أن يغطي عرض القطاع كامل المجرى شاملًا المجرى الأساسي وحدود الانتشار المحتمل للسيل بحسب الفترة التصميمية. وبالنسبة للأراضي المسطحة نسبيًا، يجب أن يغطي الرفع المساحي عرضًا يكافئ على الأقل عشرة أضعاف طول الجسر.

3. قطاعات المجرى المائي:

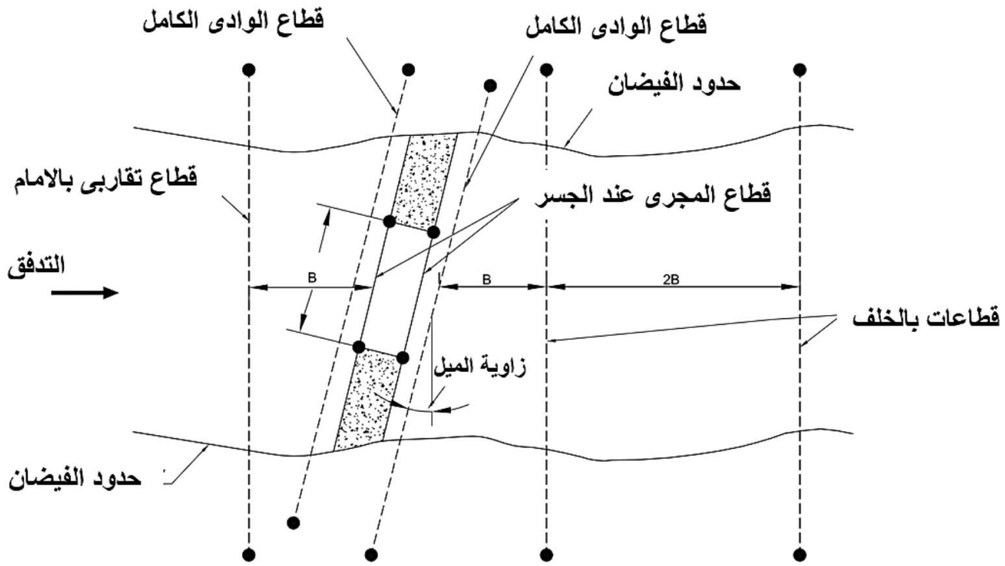
- لا بد أن تُؤخذ القطاعات عمودية على اتجاه التدفق، خاصة بالنسبة للقطاعات عند المنعطفات التي قد تواجه مشكلة اختلاف اتجاه التدفق في حدود السيل عن اتجاه المجرى المائي الأساسي.
- ينبغي تحديد حدود الغطاء النباتي مع تحديد كثافة ونوع الغطاء النباتي في المقاطع العرضية.
- في حالة وجود جسر ذي فتحة معيّنة (B)، فإن الرفع المساحي المطلوب للمجرى المائي أمام وخلف المنشأ يجب أن يتوافق مع الشكل 2-2 إلى الشكل 4-2 اعتمادًا على وجود انحناءات أو ميول. من الواضح من الشكل 2-2 أن الحد الأدنى للرفع المساحي بالنسبة للجسور النموذجية العمودية يساوي فتحة الجسر أمام المنشأ وثلاث مرات فتحة الجسر خلف المنشأ. تُحدد علامات مناسيب المياه القصوى من خلال السيول السابقة.

أما في حالة صيانة جسور قائمة بالموقع فيجب أخذ الأمور الآتية في الحسبان:

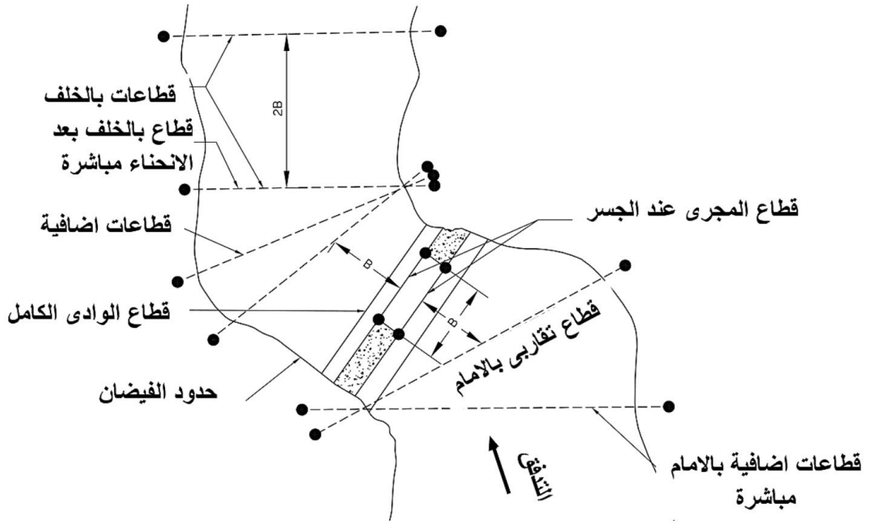
- الحصول على القيمة الأدنى من ثلاثة مناسيب لسطح الجسر (DECK) القائم والحصول على مناسيب المزاريب (وهو العنصر المسؤول عن تصريف تجمع مياه الأمطار بأعلى الجسر وتوصيلها إلى أسفل الجسر بطريقة آمنة) الموجودة عند كل ركن من أركان المنشأ (إن وجد).
- الحصول على مناسيب الأسطح العلوية والسفلية للأساسات.
- تحديد حفرة النحر وقطاعاتها أو على الأقل الرسم الكروكي لها.
- الحصول على قطاعات المجرى المائي أمام وخلف الجسر القائم. لا بد أن تحتوي هذه القطاعات على منسوب أسفل الكمرة عند كل انحناء مع تحديد الموقع والأبعاد ونوع مادة الأكتاف.
- القيام برفع عدد كافٍ من نقاط أرضية ثابتة بالمجرى المائي أمام وخلف الجسر للتحديد الدقيق لمناسيب المياه القصوى.



الشكل 2-2: الرفع المساحي المطلوب في حالة الجسور العمودية



الشكل 2-3: الرفع المساحي المطلوب في حالة الجسور المنحرفة



الشكل 2-4: الرفع المساحي المطلوب في حالة الجسور على أودية منحنية أو متعرجة (MEANDERING OR CURVED WADIS)

2-1-4 النمذجة الهيدروديناميكية للجسور

يجب إجراء التحليل الهيدروليكي للجسور باستخدام نموذج هيدروديناميكي أحادي الأبعاد على الأقل مثل HEC-RAS أو ISIS أوIREC أو11 MIKE . ويمكن استخدام حزمة برامج أخرى بناءً على إذن من الأمانة المختصة. في بعض الحالات يحتاج الأمر إلى استخدام نموذج هيدروديناميكي ثنائي الأبعاد مثل HEC-RAS أو FESWMS أو 2 IRMA ولاسيّما عندما تكون هناك تدفقات من فروع جانبية للمجرى المائي أو حين يكون الجسر على منحنى للوادي (CURVE OR MEANDERING) ومن الأمثلة على هذه الحالات:

- الجسور المنحرفة بزاوية ميل أكبر من 30 درجة.
- المجاري المائية المتعرجة (MEANDERING) أو الجسور الواقعة على مناطق الانحناءات (CURVES).
- الجسور المحاذية لوادٍ عريض بأكتاف قد تسبب انسدادًا مؤثرًا أو إعاقة.
- إن طلبت الجهات المنوطة بالمراجعة لذلك.

وفي الحالات الأكثر تعقيدًا قد نضطر إلى استخدام نموذج هيدروديناميكي ثلاثي الأبعاد. ويعدُّ بناء نماذج هيدروليكية مصغرة (PHYSICAL MODEL) للجسور مفيدًا في مثل هذه الأحيان وغالبًا ما يعدُّ مكملًا للنماذج الهيدروديناميكية.

1-3 التصميم الهيدروليكي للجسور

يتم التصميم الهيدروليكي لتقاطعات مجاري السيول عن طريق تجربة استخدام بدائل مختلفة لعدد الدعامات الوسطية المستخدمة وما يستتبعها من اختلاف في مساحة المقطع المائي الحر أسفل الجسر. ويتلخص التصميم الهيدروليكي للجسور في تحديد ما يلي:

- عدد فتحات الجسر المراد تنفيذه.
- حساب عرض الفتحة الواحدة من الجسر.
- حساب فاقد الطاقة الناتج من وجود الجسر بالمجرى المائي، أو بمعنى آخر حساب قيمة الزيادة المتوقعة في منسوب المياه أمام الجسر (H_1^*) (HEADING-UP) كما سيتم تفصيله لاحقًا.

في التصاميم النهائية للجسور يجب استخدام برنامج حاسوبي أحادي أو ثنائي الأبعاد حسب وضع الجسر ووجود أو عدم وجود انحناءات في مجرى الوادي. وتستخدم هذه البرامج الحاسوبية الحلول الرقمية لمعادلات الاستمرارية وبقاء كمية الحركة (CONTINUITY AND MOMENTUM EQUATIONS) وتأخذ في الحسبان الجريان غير المنتظم و/أو الجريان غير المستقر. وتوضح الخطوات التالية الطريقة التقريبية للحساب (دون استخدام برنامج للنمذجة) تعتمد على افتراض الجريان المنتظم وتضيف مقدارًا تقريبيًا لحساب ارتفاع المياه نتيجة لوجود الجسر، وذلك لتقدير ما سبق. وهذه الطريقة تستخدم في التصاميم الأولية فحسب.

1-1-3 الحسابات التقريبية لارتفاع المياه أمام الجسور

الخطوة رقم (1)

تتلخص الخطوة الأولى في رسم حدود السيل (FLOOD PLAIN BOUNDARIES) مع تحديد قيمة عمق الجريان الطبيعي بموقع الجسر قبل إنشاء الجسر (YO) (NORMAL DEPTH) وذلك للفترة التكرارية التصميمية والمذكورة سابقًا.

تُحسب مساحة المقطع المائي أسفل الجسر للقطاع رقم (2) أسفل عمق الجريان الطبيعي (YO) (NORMAL DEPTH) مع تقريب القطاع إلى أقرب شبه منحرف، ولتكن هذه المساحة تساوي (A_{n2}). ويُحسب عرض التقلص (B) من معادلة 1-3 وكذلك الطول الكلي المطلوب للجسر.

الخطوة رقم (2)

حساب معامل النقل (K) (CONVEYANCE COEFFICIENT)

معامل النقل هو معامل يقيس قدرة الوادي أو القناة على نقل التدفق. في حالة المجاري المائية غير المنتظمة يُقسّم القطاع أمام الجسر (قطاع رقم 1) إلى قطاعات فرعية (SUBSECTIONS) غير منتظمة مع تحديد معامل خشونة (N) مناسب لكل قطاع فرعي لحساب التدفق المتوقع من كل قطاع فرعي (Q) باستخدام معادلة مانينج (معادلة 2-3)،

انظر الشكل 1-3:

$$q = \frac{1}{n} AR^{\frac{2}{3}} \sqrt{S_o} \quad (3\text{-}2)$$

حيث إن:

A : مساحة المقطع المائي لكل قطاع فرعي (م2).

R: نصف القطر الهيدروليكي لكل قطاع فرعي الذي يساوي حاصل قسمة (A/P) حيث إن P هو المحيط المبتل للقطاع الفرعي غير شامل عمق المياه الفاصلة بين كل قطاع فرعي والآخر.

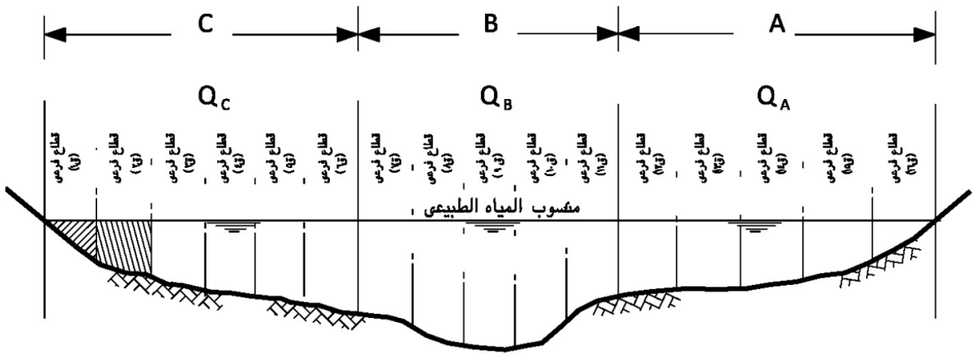
SO: انحدار قاع المجرى المائي بموقع الجسر.

وبمعلومية التدفق المتوقع من كل قطاع فرعي يُحسب معامل النقل لكل قطاع فرعي (K) من خلال استخدام معادلة 3-3، علمًا بأن معامل النقل هو وسيلة للتعبير عن توزيع التدفق على طول القطاع أمام الجسر. ويُحسب معامل النقل الإجمالي (K_{T1}) على طول قطاع رقم (1) باستخدام الجمع الجبري لمعاملات النقل لكل قطاع فرعي.

$$K = \frac{q}{\sqrt{S_o}} = \frac{a}{n} r^{\frac{2}{3}} \quad (3\text{-}3)$$

$$K_{T1} = \sum_{i=1}^{N} K_i \quad i = 1,....N \quad (3\text{-}4)$$

حيث إن (N) هو العدد الكلي للقطاعات الفرعية. وأثناء عمل التقسيم الفرعي للقطاع يُقسّم القطاع الكلي للمجرى (قطاع رقم (1) أمام الجسر) إلى ثلاثة أجزاء أساسية وهي (A, B, C)، ويرمز الجزء B إلى الجزء من القطاع المقابل عند الجسر أما الجزآن الآخران فيعبّران عن الجزأين على يمين ويسار فتحة الجسر.



الشكل 3-1: شكل عام يوضح قطاع رقم (1) وقطاعاته الفرعية أمام الجسر

حساب معامل الطاقة الحركية (KINETIC ENERGY COEFFICIENT) للقطاع الأول [α_1]

المقصود بالقطاع الأول هو القطاع أمام الجسر، وهو يمثل القطاع رقم (1) في الشكل 4-3؛ ففي حالة أن قطاع المجرى المائي قطاع منتظم فإن متوسط طاقة السرعة لوحدة الوزن (VELOCITY HEAD) يُحسّب بالطريقة التقليدية ($(Q/A_1)^2/2g$)،حيث (Q) هو التدفق الإجمالي المار بالقطاع الكلي، أما (A_1) فهي المساحة الإجمالية للقطاع رقم (1). ولكن نتيجة اختلاف السرعة عند كل قطاع فرعي بالقطاع رقم (1)، فإن استخدام المعادلة السابقة لحساب متوسط

طاقة السرعة لوحدة الوزن به نسبة خطأ. ولحساب القيمة الأدق فلا بد من ضرب متوسط طاقة السرعة لوحدة الوزن المحسوب من المعادلة السابقة في معامل يسمى معامل الطاقة الحركية $[\alpha_1]$، كما يلي:

$$\alpha_1 = \frac{\sum(q\,v^2)}{Q\,V_{n1}^{\ 2}} \quad (3\text{-}5)$$

حيث إن (Q) هو التدفق المار بكل قطاع فرعي و(v) هي السرعة بكل قطاع عرضي، أما (Q) فهو التدفق الكلي المار بالقطاع رقم (1) أمام الجسر ويُحسب من المعادلة 3-6، (V_{n1}) هي السرعة المتوسطة بالقطاع رقم (1) كاملًا وتساوي (Q/A_1) حيث إن (A_1) هي مساحة المقطع المائي الكلي لقطاع رقم (1) باستخدام عمق الجريان الطبيعي (NORMAL DEPTH) (معادلة 3-7). ويُستخدم جدول رقم 3-1 لحساب كل ما سبق.

الجدول 1-0: بيانات القطاعات الفرعية للقطاع رقم (1) أمام الجسر

رقم القطاع الفرعي		معامل الخشونة (n)	مساحة القطاع الفرعي (a) (م^2)	المحيط المبتل للقطاع الفرعي (P) (م)	نصف القطر الهيدروليكي (R) (م)	تدفق القطاع الفرعي (Q) (م^3/ث)	معامل النقل (K)	السرعة الفرعية (v) (م/ث)	qv^2
C	ق1								
	.....								
	ق6								
B	ق7								
	.....								
	ق11								
A	ق12								
	.....								
	ق16								
		$\square a_i = A_1$		$\square q_i = Q$		$\square K_i = K_{T1}$		$\square q_i v_i^{\ 2}$	

من الجدول السابق فإنه يمكن حساب ما يلي:

$$Q = \sum q_i = Q_A + Q_B + Q_C = K_{T1} \cdot \sqrt{S_o} \quad (3\text{-}6)$$

$$V_{n1} = \frac{Q}{A_1} = \frac{Q}{\sum a_i} \quad (3\text{-}7)$$

حساب نسبة فتحة الجسر (BRIDGE OPENING RATIO)

تُعّرف نسبة فتحة الجسر (M) على أنها نسبة تقلص عرض المجرى عند الجسر، وهي تساوي النسبة بين التدفق المار من خلال فتحة الجسر إلى التدفق الإجمالي المار بالمجرى. ويمكن أيضًا تعريف هذه القيمة على أنها النسبة بين معامل نقل التدفق (K) في الجزء الخاص بمكان الجسر (KB) إلى معامل نقل التدفق الإجمالي (K_{T1})، وهي تمثل النسب نفسها باستخدام التدفقات باعتبار ثبوت ميل القطاعات الفرعية كلها، ومن ثم تُحسب نسبة فتحة الجسر من المعادلة الآتية:

$$M = \frac{Q_B}{Q_A + Q_B + Q_C} = \frac{Q_B}{Q} \quad (3\text{-}8)$$

$$M = \frac{K_B}{K_A + K_B + K_C} = \frac{K_B}{K_{T1}} \quad (3\text{-}9)$$

حساب معامل الطاقة الحركية (KINETIC ENERGY COEFFICIENT) للقطاع الثاني $[\alpha_2]$

المقصود بالقطاع الثاني هو القطاع أسفل الجسر وهو القطاع رقم (2) في شكل 4-1.

يُستخدم معامل الطاقة الحركية $[\alpha_2]$ لتصحيح طاقة السرعة لوحدة الوزن نتيجة السرعة غير المنتظمة (NON UNIFORM VELOCITY) أسفل الجسر. يُحسب معامل الطاقة الحركية للقطاع الثاني $[\alpha_2]$ باستخدام القطاع رقم (2) وتقسيمه إلى قطاعات فرعية مع ملء جدول جديد مثلما تم مع القطاع الأول، وحينها تُستخدم المعادلة نفسها ولكن باستخدام بيانات القطاع رقم (2) كما يلي:

$$\alpha_2 = \frac{\sum(q\,v^2)}{Q\,V_{n2}^{\ 2}} \quad (3\text{-}10)$$

$$V_{n2} = \frac{Q}{A_{n2}} \quad (3\text{-}11)$$

حيث تم تعريف هذه المعاملات سابقًا ولكن الفرق أنها ترتبط بالقطاع رقم (2) ومساحة القطاع أسفل الجسر مباشرة A_{n2}.

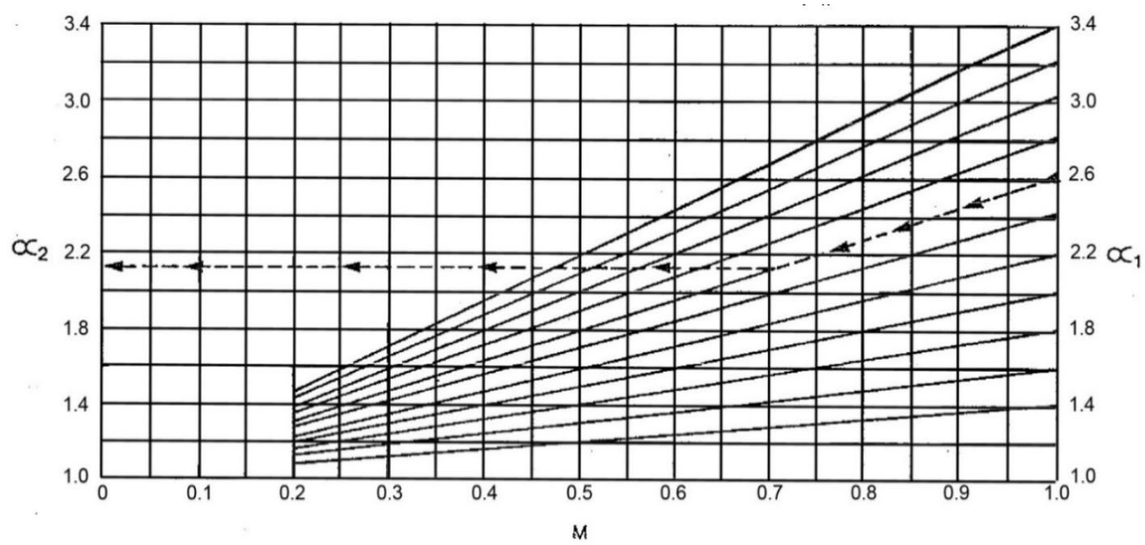
ولكن يُحسب معامل الطاقة الحركية للقطاع الثاني $[\alpha_2]$ باستخدام معامل الطاقة الحركية للقطاع الأول $[\alpha_1]$ مع نسبة فتحة الجسر (M) عن طريق الشكل 2-3.

الخطوة رقم (3)

يُحدد عدد مبدئي للدعامات الوسطية وأبعادها والمطلوب وجودها أسفل الجسر عن طريق فرض قيمة تقريبية لسرعة المياه أسفل الجسر في وجود الدعامات الوسطية (V_B^*) ومنها يُحدد عدد فتحات الجسر وعرض كل بحر للجسر كالتالي:

Assume $V_B^* = (1-2)V_{n1}$ (12-3)

$$A_{bridge} = \frac{Q}{V_B^*} = N^* \cdot Span \cdot Y \quad (13\text{-}3)$$



الشكل 3-29: تحديد قيمة معامل الطاقة الحركية للقطاع الثاني أسفل الجسر

حيث إن N* هو عدد الفتحات أسفل الجسر، و(SPAN) هو بحر الفتحة الواحدة الصافي، و(Y) هو عمق المياه أمام الجسر عند قطاع رقم (2). ويُفرض في البداية على أنه عمق الجريان المنتظم (NORMAL DEPTH) (YO) ومنه يُفرض عدد مناسب للفتحات وحساب البحر المناسب (SPAN) ثم حساب عرض الدعامات الوسطية المطلوب، ومنه يُصحّح عرض الفتحة النهائي المطلوب بحيث لا يزيد مجموع عروض الفتحات وسمك الدعامات الوسطية على العرض الكلي لقاع المجرى أسفل الجسر.

في حالة استخدام دعامات وسطية أسفل الجسر فلا بد من فرض مبدئي للسمك المطلوب للدعامات الوسطية، وذلك لتصحيح عرض الفتحة الصافي المطلوب للجسر.

في هذه الخطوة تُحسب قيمة ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر (BRIDGE HEADING-UP) بناءً على اختيار عدد وبحر فتحات الجسر الصافي، شاملاً عدد الدعامات الوسطية المستخدمة كما يلي:

$$H_1^* = K^* \alpha_2 \frac{V_2^2}{2g} + \alpha_1 \left[\left(\frac{A_{n2}}{A_4} \right)^2 - \left(\frac{A_{n2}}{A_1^*} \right)^2 \right] \frac{V_{n2}^2}{2g} \quad (3\text{-}14)$$

حيث أن:

H_1^* : ارتفاع منسوب المياه الإجمالي أمام الجسر (TOTAL HEADING-UP) (متر).

K^* : معامل ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر (TOTAL HEADING-UP COEFFICIENT).

a_1 , a_2 : معاملات الطاقة الحركية للقطاع رقم (1) ورقم (2).

A_{n2} : مساحة القطاع المائي باستخدام عمق الجريان المنتظم (NORMAL DEPTH) عند القطاع رقم (2) (م2) (أسفل الجسر)

V_{n2} : متوسط سرعة المياه عند القطاع رقم (2) (متر/ثانية) (أسفل الجسر).

A_4 : مساحة القطاع المائي باستخدام عمق الجريان المنتظم (NORMAL DEPTH) عند القطاع رقم (4) خلف الجسر (م2).

A_1^* : مساحة القطاع المائي عند القطاع رقم (1) بعد ارتفاع منسوب المياه النهائي فوق عمق الجريان الطبيعي (NORMAL DEPTH) (م2).

مما سبق يتضح أن طرفي المعادلة رقم 3-14 يعتمدان على قيمة ارتفاع المياه أمام الجسر (H_1^*)، حيث إن A_1^* تُحسب باستخدام H_1^* ومن ثم يتم حساب المعادلة 3-14 كما يلي:

تُحسب قيمة تقريبية لارتفاع منسوب المياه أمام الجسر باستخدام الجزء الأول من المعادلة السابقة كما يلي:

$$h_1^* = K^* \alpha_2 \frac{V_{n2}^2}{2g} \quad (3\text{-}15)$$

بعد حساب القيمة التقريبية لارتفاع منسوب المياه أمام الجسر (H_1^*) يُستخدم لحساب وحساب الجزء الثاني من المعادلة، ومن ثم حساب الارتفاع الكلي المتوقع للمياه أمام الجسر:

$$\alpha_1 \left[\left(\frac{A_{n2}}{A_4} \right)^2 - \left(\frac{A_{n2}}{A_1^*} \right)^2 \right] \frac{V_{n2}^2}{2g} \quad (3\text{-}16)$$

ولكن لحساب القيمة التقريبية لارتفاع منسوب المياه أمام الجسر ((بالمعادلة رقم 3-15 فإنها تعتمد على مجموعة من المتغيرات (K^* , V_{n2} , a $_2$). كل هذه المتغيرات معلومة في ما عدا قيمة المعامل (K^*) وهو المعامل الإجمالي لارتفاع منسوب المياه أمام الجسر الذي نتناوله في ما يلي.

الخطوة رقم (4):

في هذه الخطوة يُحسب معامل الارتفاع الإجمالي لمنسوب المياه أمام الجسر (TOTAL HEADING-UP COEFFICIENT (K^*) من المعادلة التالية:

$$K^* = K_b + \Delta K_P + \Delta K_e + \Delta K_s \quad (3\text{-}17)$$

حيث إن:

K^* : معامل ارتفاع منسوب المياه الإجمالي أمام الجسر.

K_b : المعامل الأساسي لارتفاع منسوب المياه أمام الجسر (BASE HEADING-UP COEFFICIENT).

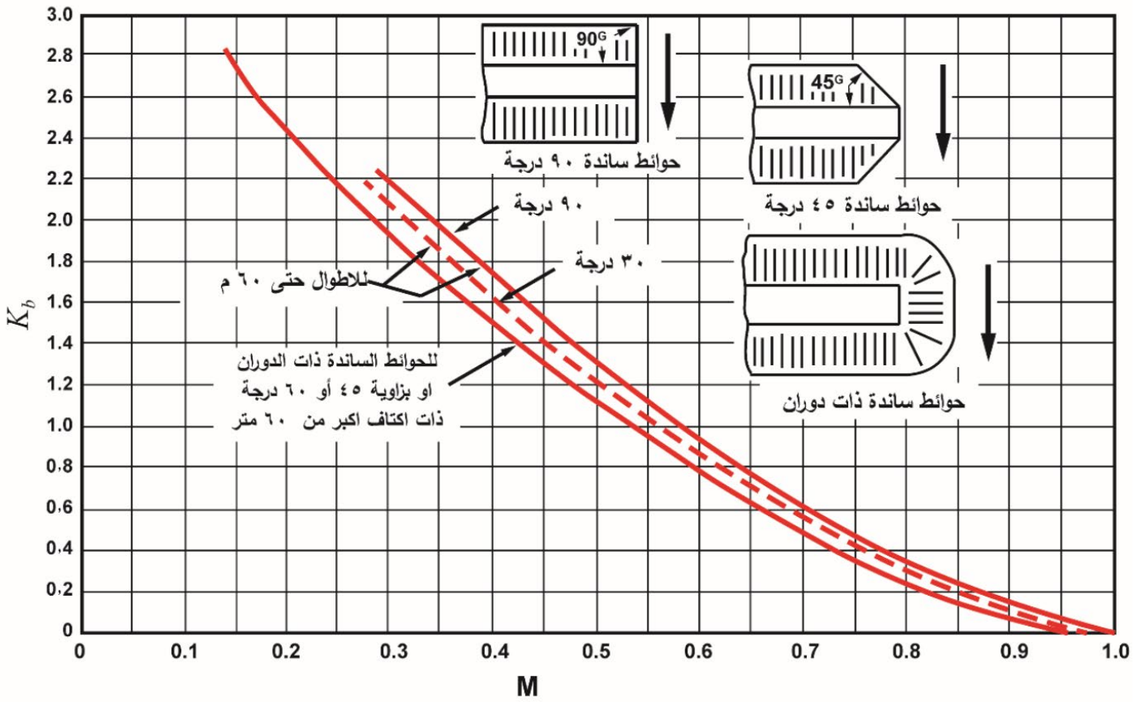
ΔK_P : معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة وجود الدعامات الوسطية.

ΔK_e : معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة التقاطع العمودي غير المتماثل (ECCENTRIC CROSSING).

ΔK_s : معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة التقاطع المنحرف (SKEWED CROSSING).

أ. حساب معامل ارتفاع منسوب المياه الأساسي (K_b)

إن معامل ارتفاع منسوب المياه الأساسي هو المعامل الذي يعتمد في حسابه على نسبة فتحة الجسر (M)، بالإضافة إلى شكل الأكتاف فقط بغض النظر عن العوامل الأخرى من وجود الدعامات الوسطية أو التقاطع العمودي غير المتماثل أو التقاطع المنحرف أو خلافه، ويتم تحديد هذا العامل باستخدام الشكل 3-3.



الشكل 3-3: حساب معامل ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر K_b

ب. حساب معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة وجود الدعامات الوسطية (ΔK_P)

يتسبب وجود الدعامات الوسطية في مسار مياه السيول في ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر بقدر معين، ولذلك كان لا بد من حساب نسبة الزيادة في معامل ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر نتيجة وجود هذه الدعامات الوسطية، وهو ما يُعبّر عنه بالقيمة (ΔK_P) ويُحسب من المعادلة التالية:

$$\Delta K_P = s \ \Delta K \quad (3\text{-}18)$$

يعتمد مقدار الزيادة في ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر نتيجة الدعامات الوسطية على عاملين أساسيين، وهما: نسبة مساحة الدعامات الوسطية العمودية على اتجاه مسار المياه إلى المساحة الإجمالية للقطاع أسفل الجسر وهو ما يُعبّر عنه بالرمز (J) والذي يُحسب من المعادلة:

$$J = \frac{A_P}{A_{n2}} \quad (3\text{-}19)$$

حيث إن:

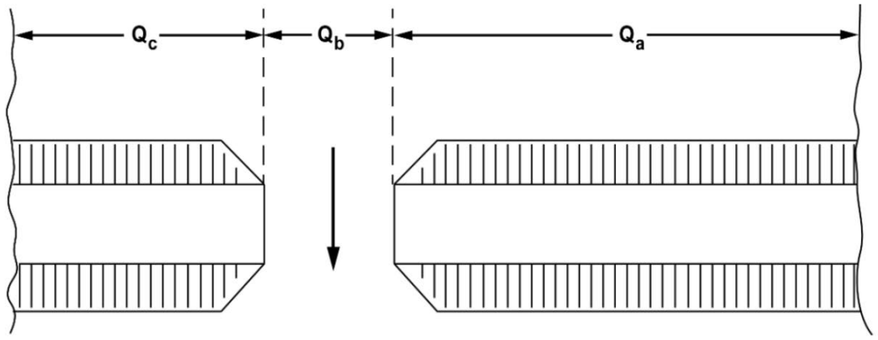
AP: المساحة الإجمالية المسقطة للدعامات الوسطية والعمودية على اتجاه الجريان (م2) سواء كان التقاطع عموديًا غير متماثل أو منحرفًا.

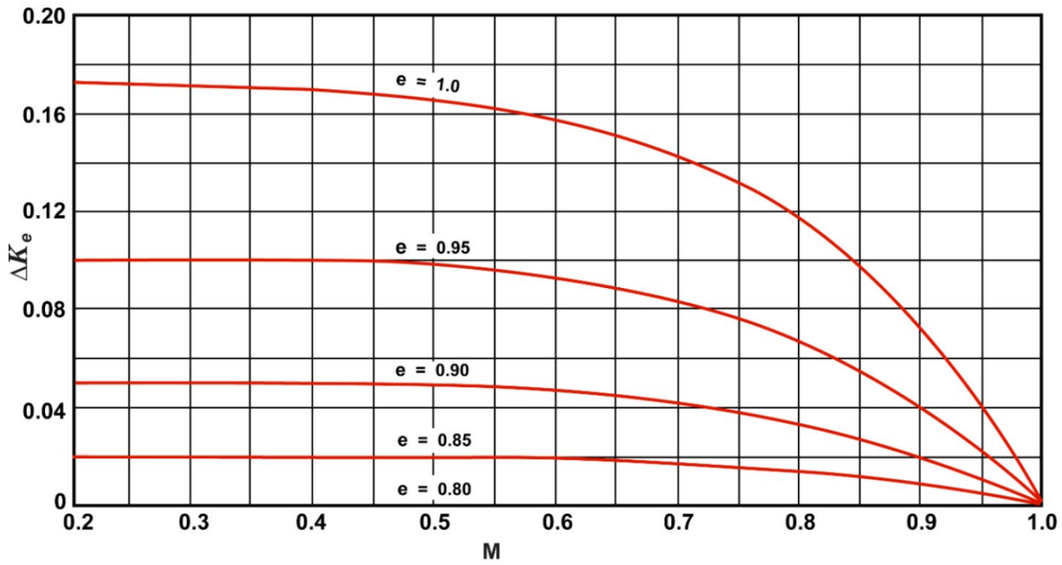
باستخدام الشكل 3-4 يمكن حساب قيمة (ΔK) بناءً على شكل الدعامات الوسطية وعددها وتوزيعها ولكن باعتبار أن نسبة فتحة الجسر تساوي الوحدة (M = 1.0). ويؤخذ تأثير تغيّر نسبة فتحة الجسر (M) عن طريق الضرب في معامل (S) الذي يُحدّد من الشكل 3-4 أيضًا. ومن المعادلة 3-18 يتم حساب ΔK_P .

ت. حساب معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة التقاطع العمودي غير المتماثل (ΔK_e)

في حالة إنشاء الجسر على تقاطع عمودي غير متماثل فإن نسبة التدفقات التي تصطدم بجانبي الجسر سوف تختلف عن بعضها بعضًا (QA ، QC) ولذلك كان من الضروري إضافة معامل إضافي يأخذ في الحسبان، تأثير التقاطعات العمودية غير المتماثلة عن طريق المعامل (ΔK_e) والذي يُحدّد باستخدام الشكل 3-5 ولكن لا بد من حساب قيمة الانحراف (ECCENTRICITY) (E)، (انظر الشكل 6-1) كما يلي:

$$e = \begin{cases} 1 - \dfrac{Q_C}{Q_a} & where \quad Q_C < Q_a \\ 1 - \dfrac{Q_a}{Q_C} & where \quad Q_C > Q_a \end{cases} \quad (3\text{-}20)$$

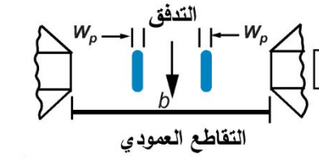




الشكل 3-5: تحديد معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة التقاطع العمودي غير المتماثل ΔK_e.

ث. حساب معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة التقاطع المنحرف على اتجاه التدفق (ΔK_s)

يتسبب مرور المياه أسفل الجسر في وجود زاوية ميل بين اتجاه التدفق ومحور الجسر الذي يمثل حالة من عدم التماثل (SKEW) ينتج عنها ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر. يُستخدم الشكل 3-6 لحساب معامل ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر نتيجة الميل (ΔK_s) بدلالة نسبة فتحة الجسر (M) وزاوية الانحراف بين اتجاه التدفق ومحور الجسر (M)، بالإضافة إلى اتجاه أكتاف الجسر (ABUTMENT). لاحظ أنه يمكن أن يكون معامل الميل بقيمة سالبة أو موجبة، ولكن وجود قيم سالبة لا يعني بالضرورة أن وجود الميل سوف يقلل ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر، ولكن في النهاية فإن هذه القيم سوف تضاف جبريًّا إلى قيم المعاملات الأخرى السابقة.



W_p : عرض الدعامة الوسطى العمودي على التدفق (م)

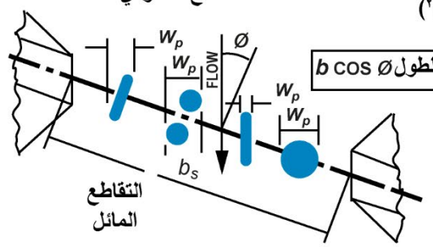
A_{n2} باستخدام الطول b

h_{n2} : ارتفاع الدعامة الوسطى المعرض للتدفق (م)

N : عدد الدعامات الوسطى

A_p : المساحة المسقطة للدعامة الوسطى عمودي على التدفق (م٢)

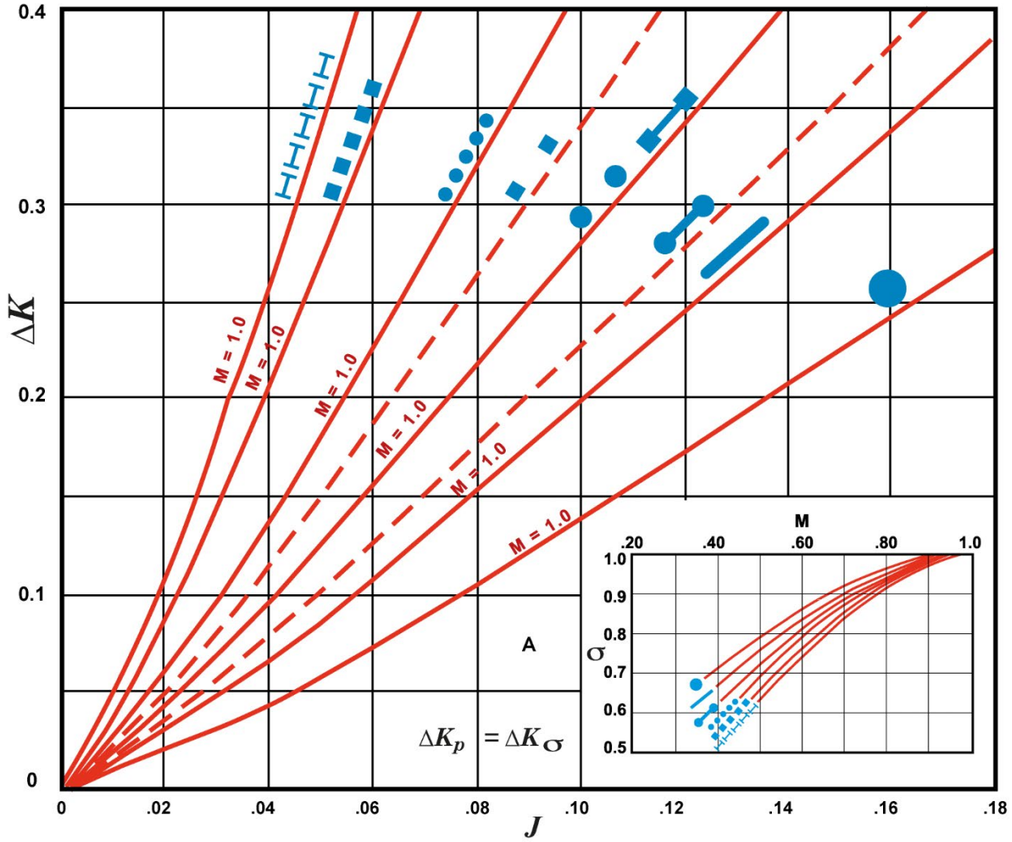
$$A_p = \sum_{1}^{N} W_p h_{n2}$$



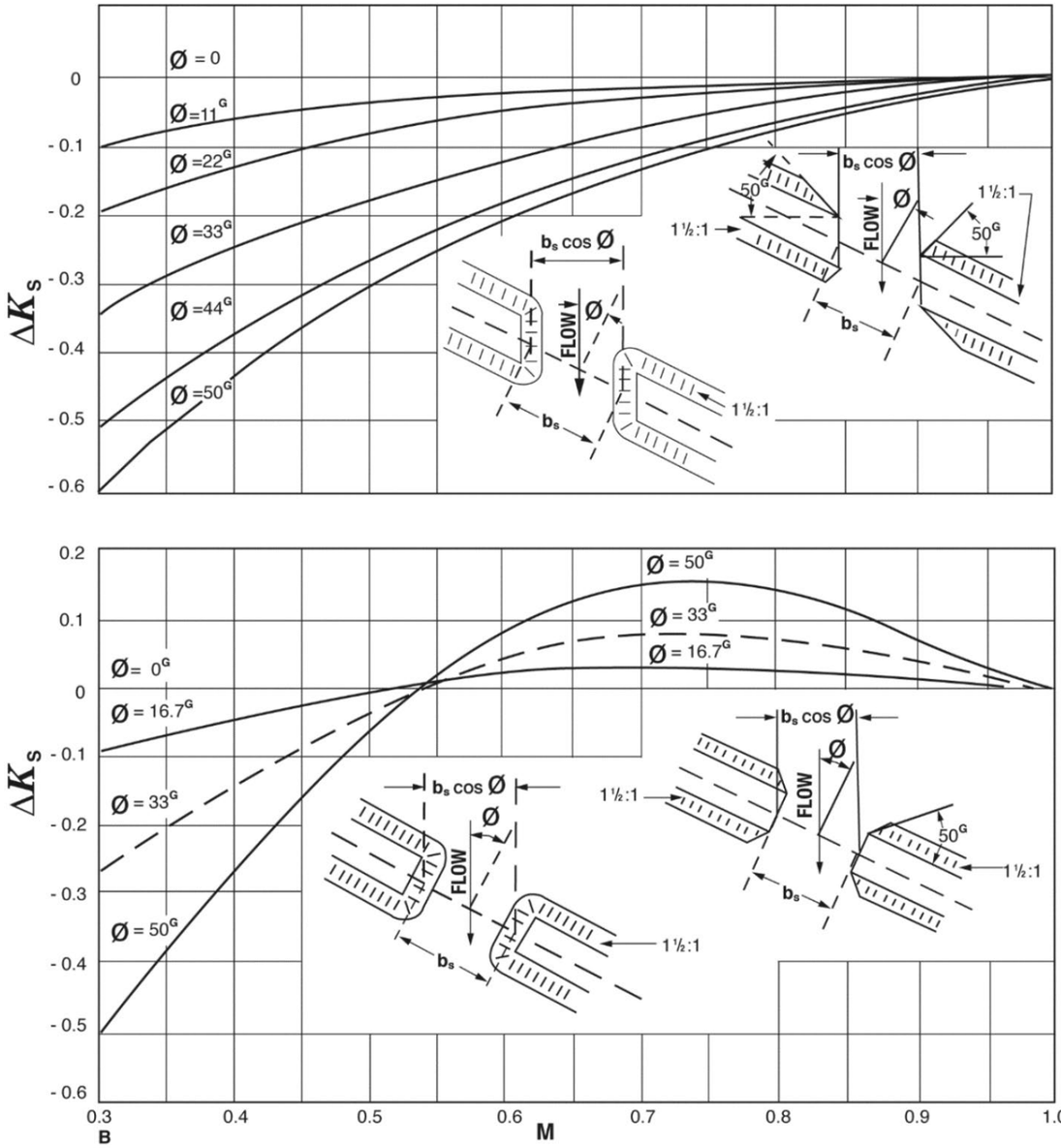
A_{n2} باستخدام الطول $b \cos Ø$

A_{n2} : مساحة القطاع المائي عند منطقة الاختناق باستخدام منسوب المياه الطبيعي (م٢). (يتم استخدام مسقط طول الجسر العمودي على التدفق للتقاطع المائل)

$$J = \frac{A_p}{A_{n2}}$$



الشكل 3-4: تحديد معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة وجود الدعامات الوسطية ΔK_P



الشكل 3-6: تحديد معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة التقاطع المنحرف ΔK_s .

3-2-1 حساب النحر للجسور

إن النحر عند الجسور هو حركة حبيبات التربة حول أكتاف والدعامات الوسطية للجسر، وهذا يمثل واحدًا من أهم ثلاثة عوامل لانهيار الجسور، حيث تشير الدراسات إلى أن النحر (بالإضافة إلى أسباب هيدروليكية أخرى) يتسبب في نحو 60% من انهيارات الجسور. وينقسم النحر إلى أنواع مختلفة أهمها:

- النحر الطبيعي الذي يتشكل بفضل عمليات النحر والترسيب المتتابعة على المدى الطويل (GENERAL, NATURAL SCOUR OR OVERALL DEGRADATION).
- النحر نتيجة تقلص القطاع (CONTRACTION SCOUR).
- النحر الموضعي (LOCAL SCOUR) عند أماكن محددة كالدعامات الوسطى (PIERS) والأكتاف (ABUTMENTS). والسبب الأساسي للنحر الموضعي السرعات الموضعية (المحلية) العالية، بالإضافة إلى عدم انتظام توزيع التدفقات مثل الدوامات.

وينظر عمومًا الخبراء إلى الآثار المترتبة على مكونات النحر الثلاثة مجتمعة (أي النحر الإجمالي = النحر الطبيعي + نحر التقلص + النحر الموضعي).

1. النحر الطبيعي

هو النحر الذي يحدث بغض النظر عن وجود أي منشأ صناعي. ويمكن استخدام معادلة LACEY أو BLENCH لتقدير مثل هذا النحر. ويمكن تقدير النحر الطبيعي باستخدام معادلة LACEY على النحو التالي:

$$y_{ms} = 0.47\left(\frac{Q}{f}\right)^{1/3} \quad (21\text{-}3)$$

حيث إن:

y_{ms} : هو عمق الجريان (بالمتر) مقاسًا من سطح المياه إلى عمق النحر.

Q : هي قيمة التدفق (م3/ث).

f :هو معامل LACEY ويُحسب من المعادلة 3-22 كما يلي:

$$f = 1.76(d_m)^{0.5} \quad (22\text{-}3)$$

حيث إن:

d_m : هو متوسط القطر المكافئ لحبيبات مادة القاع بالمليمتر (تساوي)، حيثهو متوسط قطر حبيبات قاع مجرى الوادي ويمكن تحديدها من الجدول رقم 2-3.

الجدول رقم 2-0: متوسط قطر الحبيبات لأنواع التربة المختلفة

نوع التربة	قطر الحبيبات (مم)
زلطية (Gravel)	2 إلى 75
رملية (Sand)	0.05 إلى 2.0
طمية (Silt)	0.002 إلى 0.05
طينية (Clay)	أقل من 0.002

2. نحر التقلص (Contraction scour)

هو نحر يحدث بسبب النقص في مساحة القطاع المائي سواء كان عن طريق تقلص طبيعي لقطاع المجرى أو نتيجة إنشاء الجسر. يؤدي تقلص قطاع المجرى المائي إلى زيادة السرعة المتوسطة للتدفق عند منطقة التقلص بالإضافة إلى زيادة إجهاد القص عند القاع خاصة عند منطقة التقلص، ومن ثم إلى زيادة قوى النحر مع حركة الكثير من حبيبات القاع عند هذه المنطقة عن غيرها. تؤدي الزيادة في حركة حبيبات القاع عند منطقة التقلص إلى انخفاض منسوب قاع المجرى في هذه المنطقة، الذي يؤدي بدوره إلى زيادة مساحة القطاع المائي للتدفق، ومن ثم انخفاض السرعة المتوسطة للتدفق وانخفاض قيمة إجهاد القص حتى الوصول إلى حالة اتزان (على سبيل المثال: حتى تتساوى كمية حبيبات القاع المنقولة من منطقة التقلص مع كمية حبيبات القاع المنقولة إلى هذه المنطقة). وتُحسب قيمة نحر التقلص باستخدام معادلة LAURSEN المعدلة كما يلي:

أ. نحر القاع بسبب المياه المحملة بالرسوبيات (LIVE-BED CONTRACTION SCOUR) (عندما تكون السرعة قبل منطقة التقلص V < السرعة الحرة V_c .

$$\frac{y_2}{y_1} = \left(\frac{Q}{Q_B}\right)^{6/7} \left(\frac{W_1}{W_2}\right)^{k_1} \quad (3\text{-}23)$$

حيث إن:

V_c : هي السرعة الحرجة التي بعدها تبدأ حبيبات القاع في الحركة، وتُحسب هذه السرعة من المعادلة الآتية:

$$V_c = 6.2\, y_1^{1/6}\, d_{50}^{1/3} \quad (3\text{-}24)$$

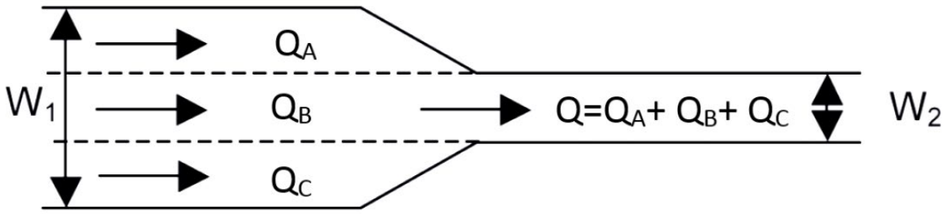
و y_1 : هو العمق المتوسط في القطاع قبل التقلص مباشرة بعد ارتفاع المياه (متر).

y_2 : هو العمق المتوسط في منطقة التقلص (متر).

W_1 : هو عرض قاع المجرى المائي قبل منطقة التقلص (متر).

W_2 : هو عرض القطاع المائي عند منطقة التقلص (متر).

k_1 : هو المعامل الذي يصف حركة حبيبات القاع ويتراوح ما بين 0.59 للحبيبات غير العالقة (NOSUSPENSION) إلى 0.69 لغالبية حبيبات القاع العالقة، Q_B و Q : هما التدفقان كما هو موضح بالشكل 7-3.



الشكل 3-7: المتغيّرات الأساسية لنحر التقلص لمعادلة LAURSEN.

ب. نحر القاع بسبب المياه الرائقة (غير المحملة بالرسوبيات) (CLEAR WATER CONTRACTION SCOUR) (عندما تكون السرعة قبل منطقة التقلص V < السرعة الحرجة V_c):

$$y_2 = 0.2058\left(\frac{Q}{d_m^{1/3}\, W_2}\right)^{6/7} \quad (3\text{-}25)$$

ويتم حساب عمق النحر عند وصول حالة الاتزان وتُحسب كالتالي:

$$y_s = y_2 - y_o \quad (3\text{-}26)$$

حيث إن:

y_o : هو عمق المياه الأصلي بمجرى الوادي عند موقع الجسر (متر).

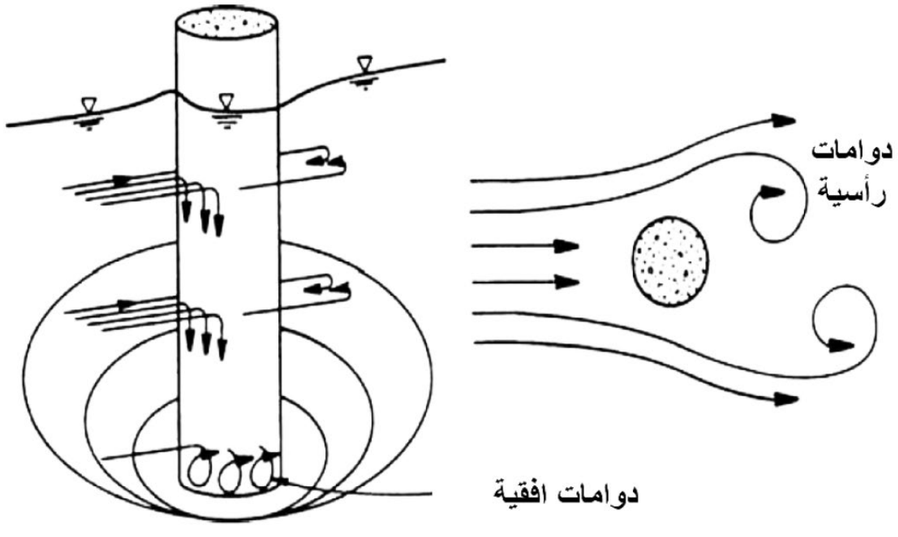
3. النحر الموضعي (Local scour)

أ. النحر الموضعي عند الدعامات الوسطى:

تعتمد قيمة النحر المتوقع عند الدعامات الوسطية للجسور على شكل هذه الدعامات وزاوية توجيهها. وعادةً ما يكون النحر الموضعي بالجسور إما حول الدعامات الوسطية للجسور (PIER SCOUR) أو حول الأكتاف (ABUTMENT SCOUR). وينشأ حول الدعامات الوسطية نوعان من الدوامات:

- دوامات أفقية على هيئة حدوة الحصان (HORSESHOE VORTEX) تتسبب في نقل حبيبات التربة من حول الدعامات الوسطية إلى خارج الجسر، بمعدل أكبر من معدل دخول الحبيبات المنقولة إلى داخل الجسر، وكلما زاد عمق النحر فإن قوة هذه الدوامات تقل حتى الوصول إلى حالة الاتزان، حيث يتساوى معدل نقل الحبيبات إلى داخل منطقة الجسر مع معدل خروج الحبيبات من منطقة الجسر نتيجة النحر.
- دوامات رأسية (WAKE VORTEX) وتساعد على زيادة عملية النحر كما هو موضح في الشكلين 3-8 و3-10.

وتتعدد العوامل المؤثرة في النحر حول الدعامات الوسطية ومنها السرعة وعمق المياه وزاوية الدخول، بالإضافة إلى مقطع الدعامة الوسطى (مستطيل - دائري - ....) وكذلك عرض وطول الدعامة.



الشكل 3-8: شكل عام للدوامات حول الدعامات الوسطية

لحساب عمق النحر الموضعي المتوقع حول الدعامات الوسطية، يمكن استخدام المعادلة التالية والمعتمدة على معادلة (COLORADO STATE UNIVERSITY):

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0\ K_1 K_2\ K_3 K_4 \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.65} Fr_1^{0.43} \quad (27\text{-}3)$$

حيث إن:

y_s : عمق النحر (متر).

y_1 : عمق المياه عند مدخل الجسر قبل الدعامات مباشرة بعد ارتفاع المياه (متر).

K_1 : معامل تصحيح يأخذ شكل مقدمة الدعامة الوسطى في الحسبان.

K_2 : معامل تصحيح يأخذ انحراف زاوية دخول الجريان في الحسبان.

K_3 : معامل تصحيح يأخذ وضع قاع المجرى حول الدعامة الوسطى في الحسبان.

K_4 : معامل تصحيح يأخذ القطر الوسيط لحبيبات التربة في قاع المجرى في الحسبان.

A : عرض الدعامة الوسطى في اتجاه الجريان (متر).

L : طول الدعامة الوسطى (متر).

وجدير بالذكر أنه ألغي المعامل K_4 من المعادلة، ولكن ما زالت البرامج الحاسوبية الأكثر شيوعًا مثل HEC-RAS (أو غيره من البرامج) في أحدث إصدارات تستخدم المعادلة في صورتها السابقة من دون تعديل، ولذلك سترد لاحقًا كما هي.

FR1 : هو رقم فرود ((FROUDE NUMBER عند مدخل الجسر قبل الدعامة الوسطى ويساوي:

$$Fr_1 = \frac{V_1^*}{\sqrt{g\, y_1}} \quad (28\text{-}3)$$

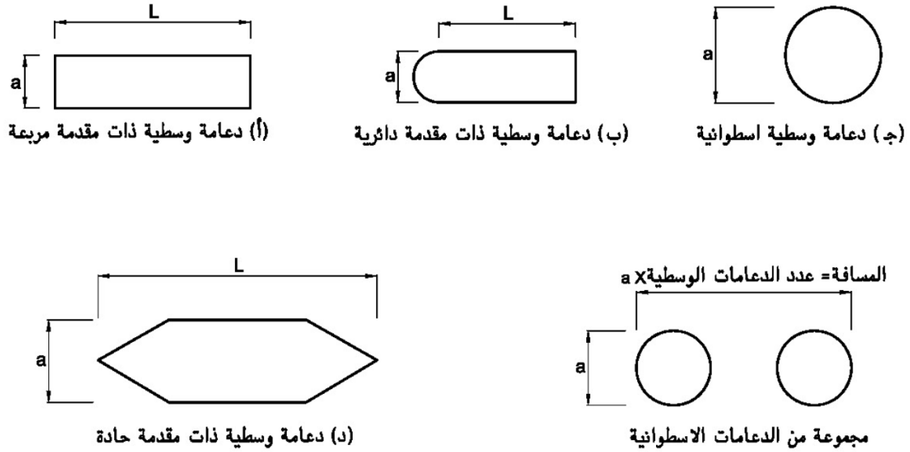
V_1^* : متوسط سرعة دخول المياه قبل الدعامة الوسطى مباشرة بعد ارتفاع المياه (م/ث).

G: عجلة الجاذبية الأرضية (9.81 م/ث2).

وبحكم التجربة وكتقدير مبدئي، يمكن اعتبار أن أقصى عمق نحر للدعامات الوسطى الموازية لاتجاه جريان الوادي يمكن حسابه كما يلي:

$$y_s \le 2.4\,a \quad for\ F_r \le 0.8$$
$$y_s \le 3.0\,a \quad for\ F_r > 0.8 \quad (3\text{-}29)$$

يأخذ معامل التصحيح (K_1) في الحسبان شكل مقدمة الدعامة الوسطى كما هو موضح بالشكل 3-9، ويُحدد من جدول رقم 3-3.



الشكل 3-9: الأشكال العامة للدعامات الوسطية.

الجدول رقم 3-0: معامل التصحيح (K_1) لأشكال مقدمات الدعامات الوسطية

شكل مقدمة الدعامة الوسطى	
(أ) دعامة وسطى ذات مقدمة مربعة	1.1
(ب) دعامة وسطى ذات مقدمة دائرية	1.0
(ج) دعامة وسطى على هيئة أسطوانة	1.0
(د) دعامة وسطى ذات مقدمة بزاوية حادة	0.9
(هـ) دعامة وسطى على هيئة مجموعة من الأسطوانات	1.0

يأخـذ معامـل التصحيـح (K_2) في الحسـبان انحـراف زاويـة دخـول الجريـان (q) وتُحسـب باسـتخدام المعادلـة التاليـة أو باسـتخدام جـدول رقـم 3-4:

$$K_2 = \left(Cos\ \theta + \frac{L}{a} Sin\theta \right)^{0.65} \quad (30\text{-}3)$$

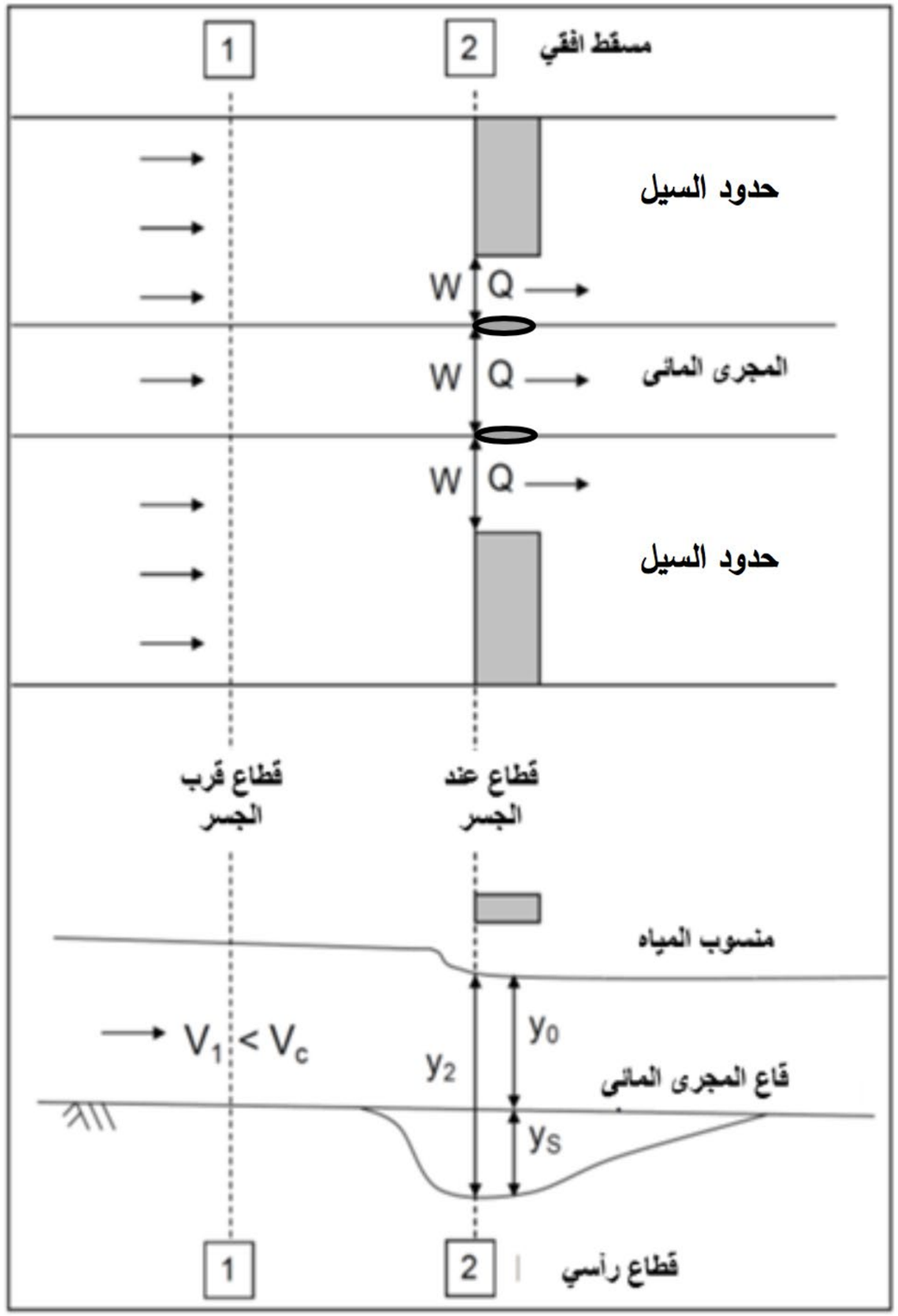
حيث إن:

L: هو الطول الفعال والحقيقي للدعامة الوسطى والمعرض لزاوية انحراف الجريان (م).

A: هو عرض الدعامة الوسطى (م).

q: هو زاوية ميل الجريان مع محور الدعامات الوسطية (درجة).

ويتـم حسـاب قيمـة K_2 مـن جـدول رقـم 3-4 وفي حالـة قيـم (L/A) أكـبر مـن 12 يتـم اسـتخدام القيـم المناظـرة للقيمـة $L/a = 12$.



الشكل 3-10: شكل عام لنحر القاع بسبب المياه الرائقة (غير المحملة بالرسوبيات)

الجدول رقم 4-0: معامل التصحيح (K_2) لانحراف زاوية دخول التدفق مع محور الدعامة الوسطى

الزاوية	$L/a=4$	$L/a=8$	$L/a=12$
0	1.0	1.0	1.0
15	1.5	2.0	2.5
30	2.0	2.75	3.5
45	2.3	3.3	4.3
90	2.5	3.9	5.0

ملاحظات مهمة

- يُحدد معامل التصحيح (K_1) للدعامات الوسطية من جدول رقم 3-3 عندما تكون زاوية انحراف دخول الجريان عند الدعامات الوسطية حتى 5 درجات. للزوايا الأكبر فإن معامل التصحيح (K_2) يكون هو المعامل الأكثر تأثيرًا مقارنة بمعامل التصحيح (K_1)، وعندئذ يؤخذ معامل التصحيح بقيمة الواحد الصحيح (K_1 =1.0).
- يجب أن يُطبق معامل التصحيح (K_2) فقط عندما يكون الطول الداخلي للدعامة الوسطى معرضًا لزاوية انحراف الجريان، وذلك لأن استخدام هذا المعامل يؤدي إلى تقدير مبالغ فيه لقيم النحر في الحالات الآتية:
  - عندما يكون جزء من الدعامة الوسطى معرضًا لزاوية انحراف الجريان.
  - وجود دعامة وسطى أخرى أو أحد أكتاف الجسر يسبب إعادة توجيه للتدفق في اتجاه موازٍ للدعامة الوسطية محل الدراسة.

ولهذه الحالات فإنه يجب عدم المبالغة عند حساب هذا المعامل لتقليل القيمة المتوقعة له وذلك باختيار الطول الفعال والحقيقي للدعامة الوسطى والمعرض لزاوية انحراف الجريان وذلك باستخدام المعادلة السابقة..

ويُحسب معامل التصحيح (K_3) من الجدول رقم 3-5 وذلك باعتبار حالة قاع المجرى حول الدعامة الوسطى.

الجدول رقم 5-0: قيم معامل التصحيح (K_3)

حالة قاع المجرى	ارتفاع الكثبان H) ((م)	K_3
نحر المياه الرائقة (غير المحملة بالرسوبيات) (Clear water scour)	غير متاح	1.1
قاع مسطح مع عدم وجود كثبان حول الدعامات الوسطية	غير متاح	1.1
كثبان صغيرة حول الدعامات الوسطية	$0.6 \leq H < 3$	1.1
كثبان متوسطة حول الدعامات الوسطية	$3.0 \leq H < 9.0$	1.1 إلى 1.2
كثبان كبيرة حول الدعامات الوسطية	$H \geq 9.0$	1.3

يتأثر معامل التصحيح (K_3) بدرجة استواء قاع المجرى حول الدعامة الوسطى، حيث يمكن أن تزيد القيم العظمى للنحر بـ 10 % عن المحسوب من المعادلة المستخدمة السابقة. وفي حالة الظروف غير الاعتيادية من وجود كثبان، فإن القيم العظمى للنحر قد تزيد نحو 30% عن القيم المحسوبة بالمعادلة، ولا يحدث إلا في حالة الأنهار الكبيرة. أما في حالة الأنهار الصغيرة التي تحتوي على تكتلات رملية فإنها تكون صغيرة الحجم، وعندئذ ستكون القيم العظمى للنحر أكبر بقيمة ما بين 10 إلى 20 % عن القيم المحسوبة من المعادلة السابقة.

أما بالنسبة لمعامل التصحيح (K4) الذي يأخذ وجود حصى كبير بقاع المجرى في الحسبان، فإنه يقلل عمق النحر المتوقع عندما يكون القطر الوسيط لحبيبات القاع بالمجرى (D50) أكبر من أو يساوي 2مم وقطر حبيبات القاع بالمجرى D95)) أكبر من أو يساوي 20مم. حُدّد هذا المعامل من الأبحاث الحديثة التي أثبتت أنه عندما تكون سرعة دخول المياه قبل الدعامة الوسطى (V_1) أقل من السرعة الحرجة (V_{c90}) بالنسبة لمتوسط قطر حبيبات القاع (D90) مع وجود تدرج في مقاس الحبيبات بالقاع، فإن مقاس الحبيبات (D90) سوف يحد من النحر المتوقع؛ ولذلك فقد تم استنتاج معامل التصحيح (K4) من خلال دراسة تم تطبيقها باستخدام نحو 384 قياسًا حقليًا للنحر لنحو 56 جسرًا في حسابات النحر المتوقع عند الدعامات الوسطية، ومن ثم يُحسب معامل التصحيح (K4) كما يلي:

$$\begin{aligned} &If \quad D_{50} < 2mm \;\; or \;\; D_{95} < 20mm, then \quad K_4 = 1.0 \\ &If \quad D_{50} \geq 2mm \;\; or \;\; D_{95} \geq 20mm, then: K_4 = 0.4(V_R)^{0.15} \\ &K_{4(\min.)} = 0.4, \quad \text{where :} \end{aligned} \tag{31-3}$$

$$V_R = \frac{V_1 - V_{icD_{50}}}{V_{cD_{50}} - V_{icD_{95}}} > 0.0 \tag{32-3}$$

حيث أن:

V_{icD_X} : سرعة اقتراب المياه (م/ث) اللازمة لبداية حدوث النحر حول الدعامات الوسطية لقطر حبيبات (DX) (م) والتي تُحسب من المعادلة الآتية:

$$V_{icD_X} = 0.645\left(\frac{D_X}{a}\right)^{0.053} V_{cD_x} \tag{33-3}$$

V_{icD_X} : هي السرعة الحرجة (م/ث) لبداية حركة حبيبات القاع ذات القطر (DX) (م) والتي تُحسب من المعادلة الآتية:

$$V_{cD_X} = K_u y_1^{1/6} D_x^{1/3} \tag{34-3}$$

حيث إن:

y_1 : هو عمق المياه أمام الدعامة الوسطى بدون عمق النحر (م).

V_1 : سرعة اقتراب المياه عند مدخل الدعامة الوسطى (م/ث).

D_x : قطر حبيبات القاع التي تحتوي على نسبة X في المئة حبيبات أكثر نعومة (FINER).

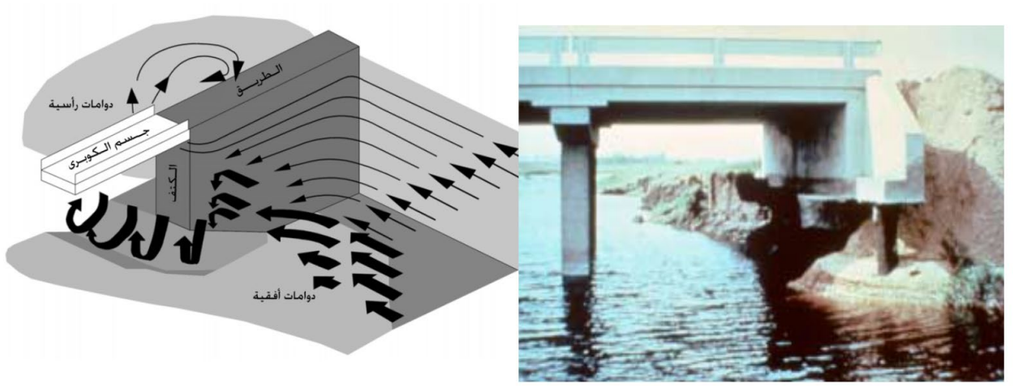
K_u : يساوي 6.19 (SI UNITS)، 11.17 (ENGLISH UNITS)

ب. النحر الموضعي عند الأكتاف:

بالإضافة إلى النحر حول الدعامات الوسطية يحدث النحر أيضًا عند أكتاف الجسور عندما تعترض الأكتاف مسار تدفق السيل. وهناك العديد من الأسباب التي قد تؤدي إلى انهيار الأكتاف أثناء السيل ومنها:

- حدوث غرق للأكتاف ومرور مياه السيل من فوقها ومن فوق الجسر الترابي على جانبي الجسر.
- حدوث نحر جزئي عند أحد أكتاف الجسر.

تتسبب إعاقة مسار السيل بواسطة الأكتاف في نشأة نوعي الدوامات نفسها عند الدعامات الوسطية، أي الدوامات الأفقية عند مدخل الأكتاف، وتبدأ من جوانب الأكتاف وتستمر على جانب الكتف وحتى مقدمته، بالإضافة إلى الدوامات الرأسية عند مخرج الأكتاف والنحر الحادث عندها كما هو موضح في الشكل 3-11. وتشبه الدوامات المتكونة عند الأكتاف شبهًا كبيرًا تلك المتكونة عند الدعامات الوسطية.



الشكل 3-11: الشكل العام للنحر حول أكتاف الجسر

ويُحسب النحر عند أكتاف الجسر (بالمتر) باستخدام معادلة HIRE كما يلي:

$$V_{cD_X} = K_u y_1^{1/6} D_x^{1/3} \quad (35\text{-}3)$$

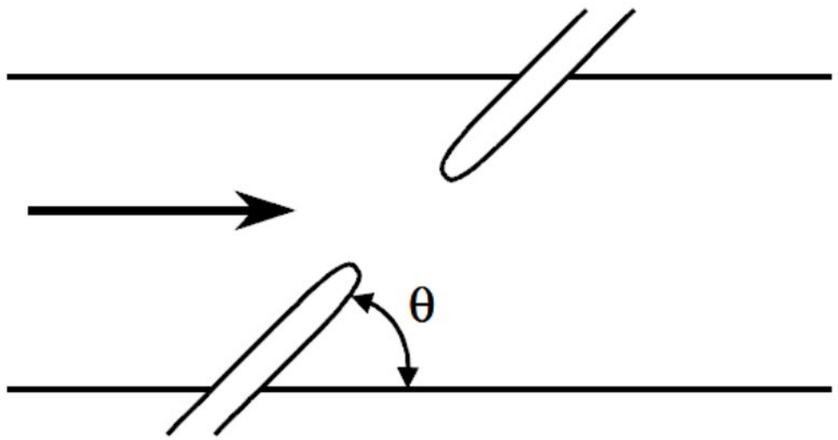
حيث إن:

y_1 : هو عمق التدفق عند الأكتاف بعد ارتفاع المياه بالأمام (بالمتر).

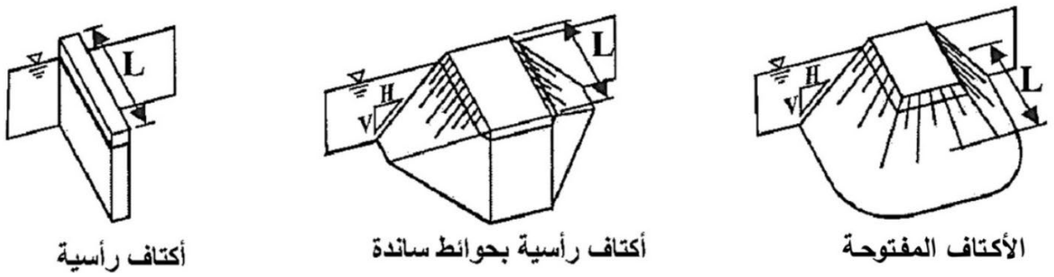
Fr_1 : هو FROUDE NUMBER أمام الأكتاف قبل الجسر بعد ارتفاع المياه بالأمام ويُحسب من المعادلة 3-28.

K_1 : هو معامل تصحيح لزاوية ميل الأكتاف ويُحسب من المعادلة الآتية $K_1 = \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.13}$ ويوضح الشكل 3-12 تعريف الزاوية θ.

K_2 : هو معامل الشكل للأكتاف ويساوي 0.55 للأكتاف من نوع الأكتاف المفتوحة (SPILL THROUGH)، أو 1.0 للجسور ذات الأكتاف الرأسية، أو 0.82 للجسور ذات الأكتاف الرأسية بحوائط ساندة كما هو موضح في الشكل 3-13.



الشكل 3-12: **زاوية ميل أكتاف الجسر مع اتجاه الجريان** θ.



الشكل 3-13: الأنواع المختلفة لأكتاف الجسور

وتُستخدم معادلة FROEHLICH لحساب النحر عند أكتاف الجسور كما يلي:

$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27 K_1 K_2 \left(\frac{L'}{y_a}\right)^{0.43} Fr^{0.61} + 1 \quad (36\text{-}3)$$

حيث إن:

K_1 : معامل تصحيح لزاوية ميل الأكتاف مع اتجاه الجريان ويُحسب من المعادلة الآتية $K_1 = \left(\frac{\theta}{90}\right)^{0.13}$.

K_2 : معامل الشكل لكتف الجسر وتُحدّد القيم الخاصة به بناءً على شكل الكتف كما تم شرحه سابقًا بمعادلة HIRE.

L' : طول الجريان الفعّال الذي يعترضه الكتف (متر)، ويمكن تقديره بمقارنة سرعات المياه في أجزاء المقطع وأخذ الطول الذي فيه تتسارع المياه، كما هو موضح في الشكل 14-3.

A_e : مساحة القطاع المائي الأمامي عند الاقتراب من أكتاف الجسر بعد ارتفاع المياه بالأمام (م2).

F_r : رقم فرود (FROUDE NUMBER) عند اقتراب الجريان من أمام الكتف، ويُحسب من المعادلة:

$$F_r = \frac{V_e}{\sqrt{g y_a}} \quad (37\text{-}3)$$

V_e : سرعة المياه عند اعتراض الأكتاف والتي تساوي $V_e = Q_e / A_e$ (م/ث).

Q_e : التدفق الذي يعترض أكتاف الجسر وهو الأكبر من (QA أو QC) (م3/ث) (انظر الشكل 7-3).

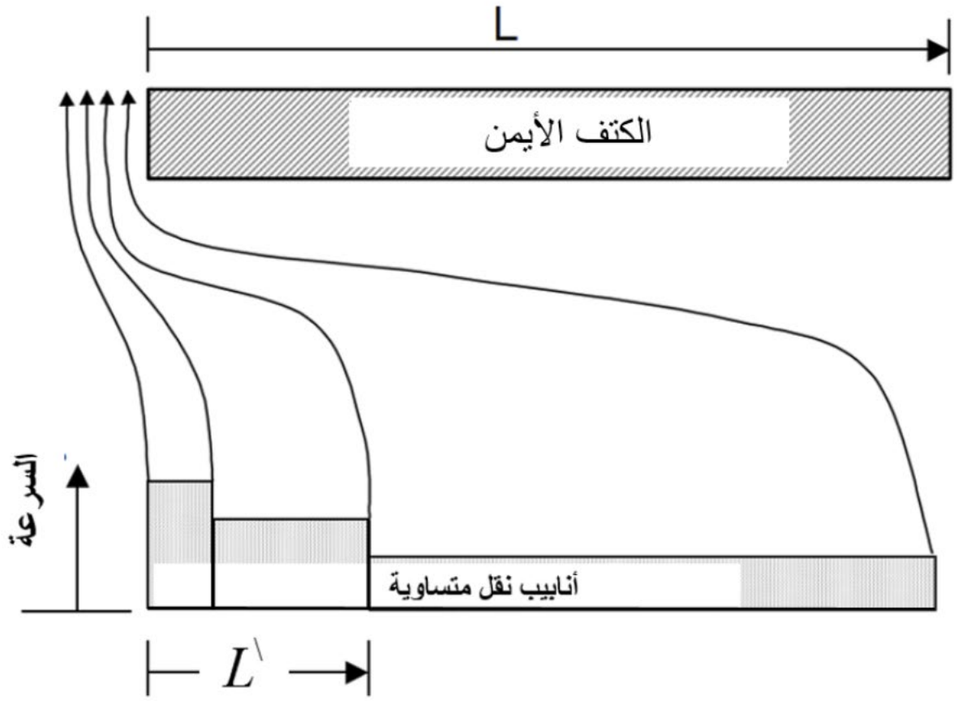
y_a : العمق المتوسط للتدفق والذي يساوي $y_a = A_e / L$ (متر).

L : طول الإسقاط للكتف في الاتجاه العمودي على اتجاه الجريان (متر).

y_s : عمق النحر (متر).

يجب ملاحظة أن معادلة FROEHLICH السابقة غير متناسقة، حيث إنه من المفروض أن قيمة النحر تساوي صفرًا عندما تؤول قيمة L' إلى صفر، ولكن المعادلة لا تحقق ذلك نظرًا لوجود واحد صحيح في الطرف الأيمن من المعادلة. وتُستخدم معادلة HIRE عندما تكون $(L/y_a) > 25$ بينما تستخدم معادلة FROEHLICH عندما تكون $(L/y_a) < 25$.

يُحسب النحر لفترة تكرارية تصميمية 100 سنة. أما الأساسات فيتم تصميمها عن طريق المهندسين الجيوتقنيين ومهندسي الإنشاءات لفترة تكرارية 100 سنة مع المراجعة على فترة تكرارية 500 سنة لضمان تحقيق الاتزان المطلوب للمنشأ.



الشكل 3-10: تعريف طول الكتف المُسقط والفعال.

ومن المهم مراعاة الآتي:

- يُنصح باستخدام شكل الأكتاف من النوع (SPILL THROUGH) (الشكلين 13-3 و 4-5) وذلك لتقليل النحر الموضعي عند الأكتاف على قدر الإمكان.
- يُحسب النحر الإجمالي كمجموع للنحر العام (الطبيعي) ونحر التقلص والنحر الموضعي.
- يفضل حساب النحر الموضعي عند الدعامات الوسطية والأكتاف باستخدام نموذج هيدروليكي مثل ما سبق ذكره الذي يستخدم معادلة CSU لحساب النحر الموضعي عند الدعامات الوسطية ومعادلة FROEHLICH أو HIRE لحساب النحر الموضعي عند الأكتاف.
- أما بالنسبة لنحر التقلص فيمكن حسابه باستخدام أي مما سبق ذكره من برامج اعتمادًا على حالات نحر المياه المحملة بالرسوبيات أو نحر المياه الرائقة على حسب الحالة المناسبة.
- لا تقوم البرامج عادةً بحساب النحر العام (الطبيعي)؛ ولذلك يجب حسابه خارج البرنامج واستخدام النتائج في حساب النحر الإجمالي.

1-4 الاحتياطات المطلوب توافرها للتخفيف من النحر الموضعي ولا سيّما للجسور القائمة

يجدر الإشارة أولًا إلى أن هذه الفقرة تستهدف أساسًا الجسور القائمة والمعرضة لنحر الأساسات والواجب حمايتها، أما للجسور المزمع إنشاؤها فلا يعتمد على الحماية لتخفيف النحر، بل يتم تخفيض منسوب قمة الأساسات تحت مستوى النحر الإجمالي للأساسات الضحلة، وفي الأساسات العميقة يتم خفض منسوب هامة الخوازيق (PILE CAP) إلى ما هو أدنى من منسوب مجموع النحر الطبيعي ونحر التقلص مع الأخذ في الحسبان عند تصميم الخوازيق أن الطول المناظر للنحر الموضعي كأنه طول حر (غير مُحاط بالتربة) (UNSUPPORTED LENGTH).

أولًا: لتخفيف النحر عند الدعامات الوسطية فيلزم عمل حماية بالأحجار (RIPRAP) حول منطقة النحر. ويُحسب متوسط حجم أحجار الحماية (D_{50}) حول الدعامات الوسطية من المعادلة الآتية:

$$D_{50} = \frac{0.692(KV)^2}{(S_s - 1)2g} \quad (38\text{-}3)$$

حيث إن:

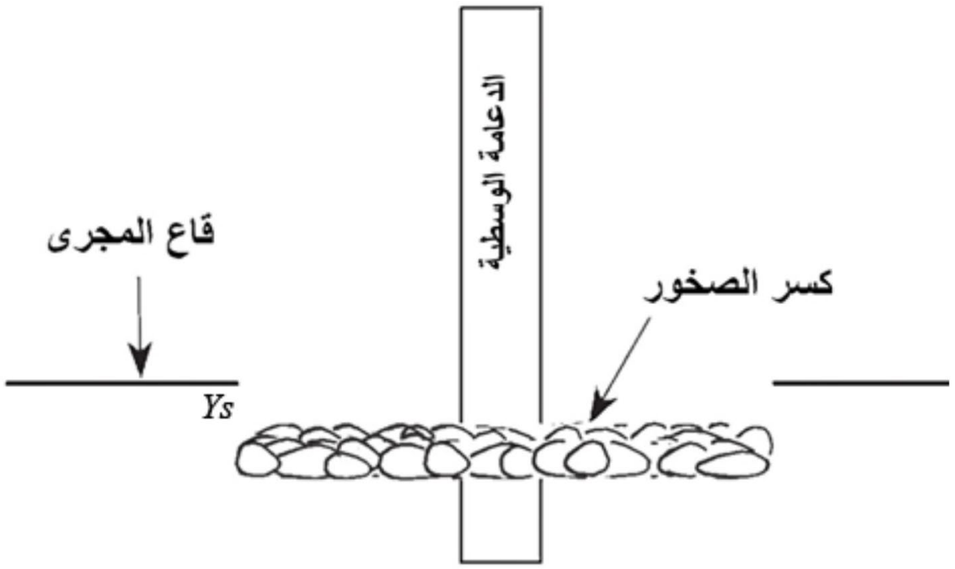
D_{50} : القطر الوسيط لأحجار الحماية المطلوبة (م).

K : معامل لشكل الدعامة الوسطى (يؤخذ 1.5 لمقدمات الدعامات الوسطية الدائرية الشكل، ويؤخذ 1.7 لمقدمات الدعامات الوسطية المستطيلة الشكل).

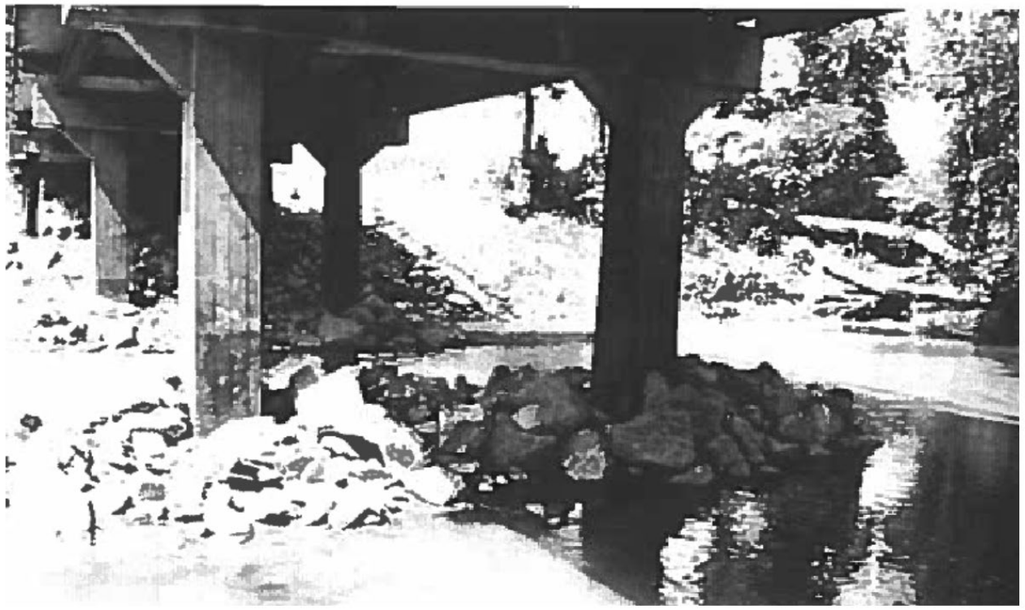
V: سرعة دخول المياه حول الدعامات الوسطية (م/ث).

SS : الكثافة النوعية لمادة الحماية (2.65 للأحجار).

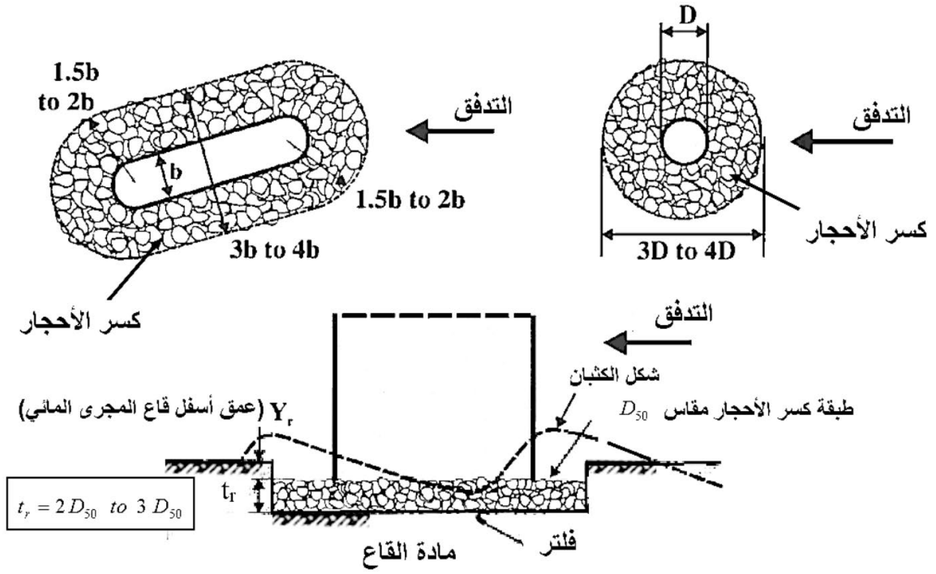
وتُحسب سرعة دخول المياه حول الدعامات الوسطية (V) باستخدام سرعة دخول المياه قبل الدعامات الوسطية ثم ضربها في معامل من 1.5 إلى 2.0. وفي معظم حالات التصميم يؤخذ هذا المعامل 1.5. تُوضع طبقة الحماية أمام مقدمة الدعامات الوسطية بمسافة لا تقل عن ضعف عرض الدعامة الوسطى. أما بالنسبة لوضع طبقة الحماية بالنسبة لقاع المجرى حول الدعامة الوسطى فيتم وضع هذه الطبقة أسفل قاع المجرى بمسافة تساوي قيمة عمق النحر المتوقع والمحسوب سابقًا كما هو في الشكلين 4-1 و 4-2. يُوضع كسر الأحجار لحماية النحر عند الدعامات الوسطية للجسور كما هو موضح الشكل 4-3. وتتعدد المعادلات التي يمكن استخدامها في حساب القطر الوسيط لأحجار الحماية.



الشكل 4-1: الشكل العام لوضع طبقة الحماية حول الدعامات الوسطية للجسر



الشكل 4-2: شكل عام لحماية الدعامات الوسطية للجسور من النحر



الشكل 4-3: الترتيبات الوقائية لحماية الدعامات الوسطية للجسور من النحر

ثانيًا: أما بالنسبة لأعمال حماية أكتاف الجسر من النحر المتوقع، فإنه يُوصى باستخدام كسر الأحجار (RIPRAP) لحماية الأكتاف باستخدام المعادلة التالية بناءً على رقم فرود.

$$\frac{D_{50}}{y_2} = \frac{K_s}{(S_S - 1)}\left(F_r^2\right)^n \quad (3\text{-}39)$$

حيث إن:

D_{50} : القطر الوسيط لكسر أحجار الحماية المطلوبة (م).

y_2 : متوسط عمق المياه في منطقة التقلص (م).

S_S : الكثافة النوعية لمادة طبقة الحماية، وفي حالة استخدام مادة الحماية من الأحجار (SS = 2.65).

F_r : رقم فرود عند منطقة التقلص ويُحسب من المعادلة التالية:

$$F_r = \frac{V_2}{\sqrt{g\, y_2}} \quad (3\text{-}40)$$

حيث إن:

V_2 : السرعة المتوسطة بمنطقة التقلص (م/ث) وتُحسب كما يلي:

$$V_2 = \begin{cases} \frac{Q}{A_2} & for \quad \frac{L_s}{y_2} < 5.0 \\ \frac{Q_{2f}}{A_{2f}} & for \quad \frac{L_s}{y_2} > 5.0 \end{cases} \quad (3\text{-}41)$$

حيث إن:

L_s : هي المسافة بين نهاية الأكتاف وحتى حافة المجرى الرئيس (م) كما هو موضح في الشكل 4-4.

Q : التدفق التصميمي الكلي (م3/ث).

A : مساحة المقطع المائي عند منطقة التقلص (م2).

Q_{2f} : التدفق المار بمنطقة السيل خلال المسافة (انظر الشكل 4-4).

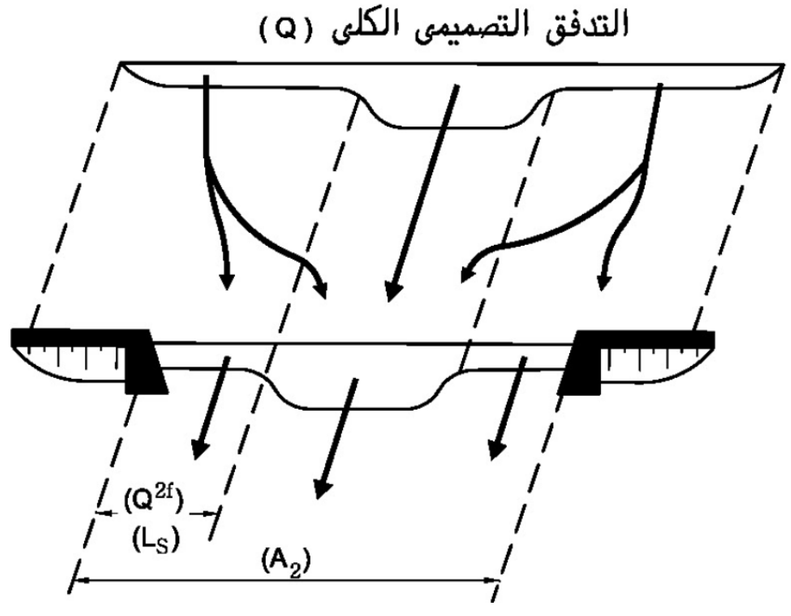
A_{2f} : مساحة المقطع المائي بمنطقة السيل خلال المسافة (انظر الشكل 4-4).

n : هو معامل يعتمد على رقم فرود، ويُحدد من الجدول رقم 1-4.

K_s : هو معامل يعتمد على نوع الأكتاف، ويُحدد من الجدول رقم 1-4.

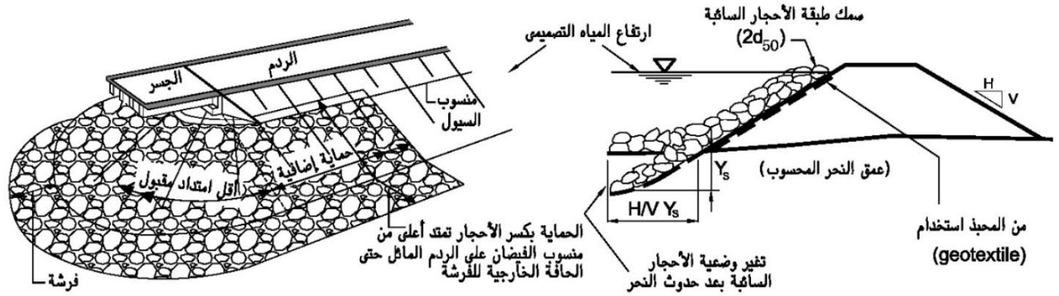
الجدول رقم 1-0: معاملات الاتزان المختلفة لأنواع الأكتاف المختلفة

نوع أكتاف الجسور	$F_r \leq 0.8$		$F_r > 0.8$	
	n	K_s	n	K_s
أكتاف مفتوحة (انظر الشكل 3-12)	1.0	0.89	0.14	0.61
أكتاف رأسية بحوائط أو بدون (انظر الشكل 3-12)		1.02		0.69



الشكل 4-4: الخصائص المختلفة لنحر أكتاف الجسور

يجب ألا يقل سمك طبقة الحماية لأكتاف الجسور عن $1.5D_g$ في حالة استخدامها أسفل سطح المياه، ويوضح الشكل 4-5 أعمال الحماية المطلوبة لأكتاف الجسور.



الشكل 4–5: الترتيب الوقائي لحماية أكتاف الجسور من النحر

الشكل 4-5: الترتيب الوقائي لحماية أكتاف الجسور من النحر

مثال توضيحي رقم (1):

للتقاطع الموضح في الشكل 4-6 وبفرض البيانات المتوفرة التالية:

منسوب المياه للجريان المنتظم بالقطاع المائي هو (20).

الانحدار الطولي للمجرى المائي (SO) هو 30 سم/كم (أي 0.0003 م/م).

القطاع العرضي للمجرى المائي متغيّر المناسيب وبمعاملات خشونة/مانينج (N) كما هو موضح بالشكل.

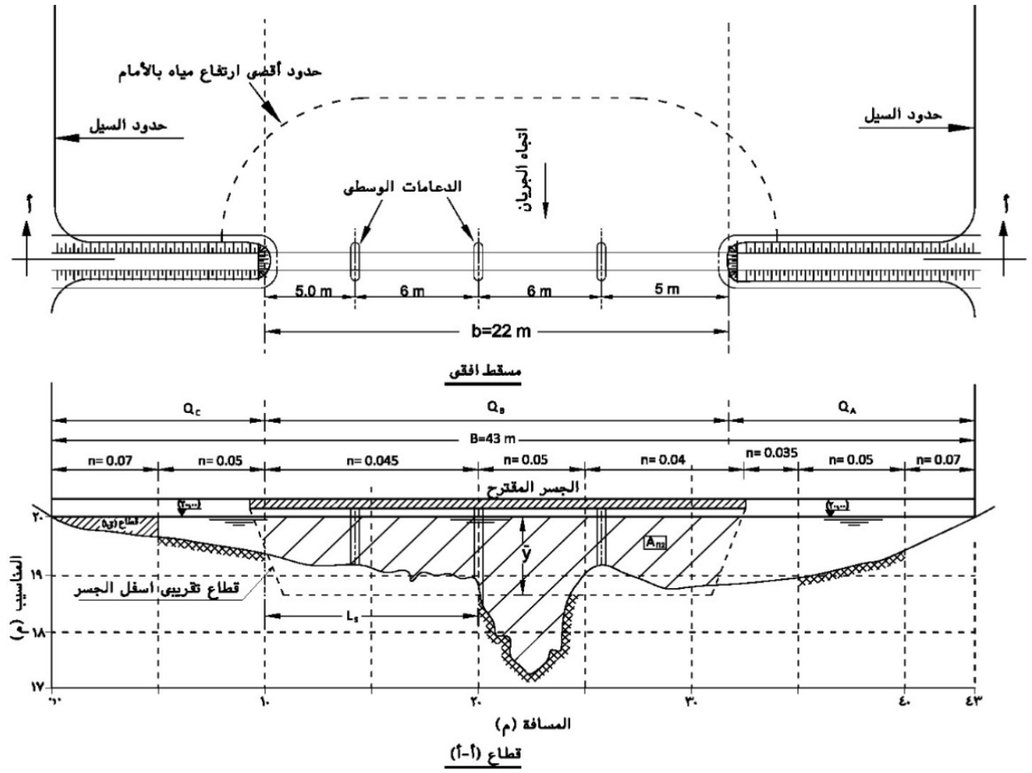
عرض التقلص المتاح عند موقع الجسر (B) يساوي 22 مترًا.

بفرض أن المجرى المائي مستقيم على كامل مجراه وقطاعه العرضي تقريبًا ثابت، وأن الجسر المقترح عمودي على اتجاه المجرى.

- بفرض أن عدد الدعامات الوسطى المقترحة للجسر هي 3 دعامات بقطاعات ثابتة (عرض 1.0 متر).
- بفرض أن متوسط قطر حبيبات قاع مجرى الوادي (D 50) تساوي 0.7 مم.

والمطلوب الآتي:

1. حساب تقريبي للزيادة في ارتفاع المياه الناشئة أمام الجسر نتيجة وجود الجسر السابق، وذلك عن طريق:
   - حساب معامل النقل (K) عند القطاع رقم 1 (أمام الجسر).
   - حساب التدفق الإجمالي (Q) المتوقع بالمجرى المائي.
   - حساب معامل الطاقة الحركية (a_1) بالقطاع رقم 1.
   - حساب نسبة فتحة الجسر (M).
2. حساب النحر الكلي حول الدعامات والأكتاف مع تحديد الحماية المطلوبة.



الشكل 4-6: شكل توضيحي لبيانات المثال رقم (1)

خطوات الحل:

لحساب معامل النقل (K) للقطاع رقم 1 فإنه قد تم تقسيم قطاع المجرى المائي عند القطاع رقم (1) إلى مجموعة من القطاعات الفرعية كما هو موضح بجدول رقم 2-4. من خلال هذا الجدول تُحسب مساحة كل قطاع فرعي بناءً على الشكل المتغيّر للقطاع، ثم يُحسب المحيط المبتل لكل قطاع فرعي ومنه يُحسب نصف القطر الهيدروليكي. وبعد ذلك تستخدم المعادلتان 2-3و3-3 لحساب التدفق وسرعة المياه المتوقع بكل قطاع فرعي، على الترتيب. من جدول رقم 2-4 تُلخص النتائج كما يلي:

معامل التوصيل الكلي للقطاع رقم (1) كما يلي:

$$K_{T1} = \sum_{i=1}^{N} k_i = 945.93$$

التدفق الكلي المار بالمجرى المائي (Q) كما يلي:

$$Q = \sum_{i=1}^{N} q_i = 16.38 \ m^3 / \sec.$$

المساحة الكلية للمجرى المائي (A1) والسرعة المتوسطة للمياه بالمجرى (V1) باستخدام المعادلة رقم 3-7 للقطاع رقم (1) كما يلي:

$$A_1 = \sum_{i=1}^{N} a_i = 39.32 \ m^2 \qquad V_1 = \frac{Q}{A_1} = 0.417 \ \ m / \sec.$$

- يُحسب معامل الطاقة الحركية (a_1) باستخدام المعادلة رقم 3-5 كما يلي:

$$\alpha_1 = \frac{\sum_{i=1}^{N} qv^2}{QV_1^2} = \frac{3.659}{16.38(0.417^2)} = 1.28$$

- تُحسب نسبة فتحة الجسر (M) باستخدام المعادلة 3-8 والبيانات من جدول رقم 3-7 كما يلي:

$$M = \frac{Q_B}{Q} = \frac{1.20 + 1.93 + 5.80 + 2.41 + 1.49}{16.38} = 0.78$$

الجدول 2-0: بيانات القطاعات الفرعية للقطاع رقم (1) بالمثال رقم (1).

	رقم القطاع الفرعي	المسافة (م)		المحيط المبتل (م)	مساحة القطاع الفرعي (م²)	نصف القطر الهيدروليكي (م)	معامل الخشونة (مانيج)	معامل التوصيل (K)	التدفق بالقطاع الفرعي (q) (م³/ث)	السرعة بالقطاع الفرعي (v) (م/ث)	qv^2
	من	إلى									
C	ق1	0	5	5	1.19	0.24	0.07	6.54	0.11	0.1	0.001
	ق2	5	10	5	2.43	0.49	0.05	29.99	0.52	0.21	0.024
B	ق1	10	15	5	4.02	0.80	0.05	69.46	1.20	0.3	0.108
	ق2	15	20	5	5.00	1.00	0.045	111.27	1.93	0.39	0.286
	ق3	20	25	5	10.32	2.06	0.05	334.70	5.80	0.56	1.829
	ق4	25	30	5	5.33	1.07	0.04	138.92	2.41	0.45	0.491
	ق5	30	32	2	2.77	1.39	0.04	86.24	1.49	0.54	0.433
A	ق1	32	35	3	2.97	0.99	0.035	84.41	1.46	0.49	0.354
	ق2	35	40	5	4.30	0.86	0.05	77.72	1.35	0.31	0.132
	ق3	40	43	3	0.98	0.33	0.07	6.67	0.12	0.12	0.002
	المجموع				39.32			945.93	16.38		3.659

- يمكن الدخول بمعامل الطاقة الحركية (K^*) ونسبة فتحة الجسر (M) على الشكل 2-3 لحساب معامل الطاقة الحركية للقطاع رقم (2) أسفل الجسر كما يلي:

$$\alpha_2 = 1.30$$

- يُحسب معامل ارتفاع منسوب المياه أمام الجسر (TOTAL HEADING-UP COEFFICIENT) من المعادلة رقم 3-17. وبما أنه لا يوجد تقاطع غير متماثل أو تقاطع منحرف، فإنه يمكن إهمال كل من العاملين (ΔK_e ,ΔK_s)، ومن ثم فإن:

$$K^* = K_b + \Delta K_P$$

- يُحسب معامل ارتفاع منسوب المياه (KB) باستخدام الشكل 3-3 بمعلومية النسبة (M) وشكل الحوائط الساندة ذات الدوران:

$$K_b = 0.3$$

- يُحسب معامل ارتفاع منسوب المياه الإضافي نتيجة الدعامات الوسطى (ΔK_P) كالتالي:

$$\Delta K_P = \sigma \Delta K$$

- مساحة القطاع المائي باستخدام منسوب المياه للجريان الطبيعي أسفل الجسر مباشرة (AN2) هي:

$$A_{n2} = 26.42 \ m^2$$

- المساحة الإجمالية للدعامات الوسطى في اتجاه الجريان أسفل الجسر (AP) تساوي حاصل ضرب الارتفاع الكلي للدعامات أسفل منسوب المياه في وضع الجريان المنتظم في عرض كل دعامة كما يلي:

$$A_p = 2.88(1.0) = 2.88 \ m^2$$

ومن ثم يُحسب المعامل (J) من المعادلة رقم 3-19 كما يلي:

$$J = \frac{A_P}{A_{n2}} = \frac{2.88}{26.42} = 0.109$$

باستخدام المعامل (J) وبفرض أن نسبة فتحة الجسر (M) تساوي الوحدة يُحسب ΔK ، σ من الشكل 3-4 والتعويض كما يلي:

$$\Delta K_P = \sigma(\Delta K) = 0.91(0.22) = 0.20$$

- معامل ارتفاع منسوب المياه الكلي أمام الجسر K^* يساوي:

$$K^* = 0.3 + 0.20 = 0.50$$

- تُحسب سرعة المياه بالمجرى المائي أسفل الجسر (V_{n2}) كالتالي:

$$V_{n2} = \frac{Q}{A_{n2}} = \frac{16.38}{26.42} = 0.62 \ \ m/\sec.$$

$$\frac{V_{n2}^{\ 2}}{2g} = \frac{0.62^2}{2(9.81)} = 0.02 \ m.$$

وباستخدام المعادلة رقم 3-15 تُحسب قيمة تقريبية لارتفاع منسوب المياه أمام الجسر:

$$h_1^* = K^* \alpha_2 \frac{V_{n2}^2}{2g} = 0.50(1.3)(0.02) = 0.013m$$

وبالتعويض في المعادلة رقم 3-16 تُحسب قيمة الزيادة في ارتفاع المياه عن السابق (H_1^*). حيث إن (A4) تساوي مساحة المقطع المائي خلف الجسر عندما يعود للوضع الطبيعي، ويساوي المساحة الكلية نفسها للقطاع رقم (1) وهي 39.32 م2.

أما بالنسبة لمساحة المقطع المائي (A_1^*) فتُحسب عند القطاع رقم (1) أمام الجسر - ولكن بعد ارتفاع منسوب المياه بمقدار h_1^* وهي تساوي 39.94 م2.

$$\alpha_1\left[\left(\frac{A_{n2}}{A_4}\right)^2 - \left(\frac{A_{n2}}{A_1^*}\right)^2\right]\frac{V_{n2}^{\ 2}}{2g} = 1.30\left[\left(\frac{26.42}{39.32}\right)^2 - \left(\frac{26.42}{39.94}\right)^2\right]0.02 = 0.00035 \ m$$

ولذلك فإن الزيادة في الارتفاع الكلي للمياه أمام الجسر تساوي (H_1^*):

$$H_1^* = 0.013 + 0.00035 = 0.0131 \ m$$

حسابات النحر

ويُحسب متوسط عمق الجريان الطبيعي (y_o) أسفل الجسر كالتالي:

$$y_o = \frac{A_{n2}}{b} = \frac{26.42}{22} = 1.20 \ m$$

وبما أن المساحة الكلية للمجرى المائي عند القطاع رقم (1) (A1) تساوي (39.32 متر) والطول الكلي لقطاع المجرى (B) يساوي 43 مترًا، ومن ثم يمكن حساب متوسط عمق الجريان المنتظم (y_o) بمجرى الوادي قبل إنشاء الجسر خلال القطاع رقم (1) كما يلي:

$$y_O = \frac{A_1}{B} = \frac{39.32}{43} = 0.914 \ m$$

يُحسب عمق المياه النهائي أمام الجسر مباشرة (Y1) كالتالي:

$$y_1 = y_o + H_1^* = 0.927 \ m$$

وتُحسب السرعة خلال القطاع رقم (1) (V_1^*) بعد ارتفاع المياه أمام الجسر باستخدام المساحة الكلية للقطاع المائي المتوقعة (A_1^*) والتي تم حسابها سابقًا بنحو 39.94 م2، ومنها يُحسب رقم فرود (Fr_1) عند القطاع نفسه قبل الجسر كما يلي:

$$V_1^* = \frac{Q}{A_1^*} = \frac{16.38}{39.94} = 0.41 \ m/s$$

$$Fr_1 = \frac{V_1^*}{\sqrt{g\, y_1}} = \frac{0.41}{\sqrt{9.81(0.927)}} = 0.136$$

أولًا: حساب النحر الطبيعي

يُحسب النحر الطبيعي (YNAT. (بمجرى الوادي من خلال استخدام المعادلة رقم 3-21. بما أن متوسط قطر حبيبات مادة قاع الوادي (D 50) يساوي 0.7مم، فمن الممكن حساب النحر الطبيعي كالتالي: $d_m = 1.25\, d_{50} = 1.25(0.7) = 0.88 \ mm$

$$f = 1.76(d_m)^{0.5} = 1.76(0.88^{0.5}) = 1.65$$

$$y_{ms} = 0.47\left(\frac{Q}{f}\right)^{(1/3)} = 0.47\left(\frac{16.38}{1.65}\right)^{1/3} = 1.01 \ m$$

$$y_{nat.} = y_{ms} - y_1 = 1.01 - 0.914 = 0.10 \ m$$

ثانيًا: حساب النحر نتيجة تقلص قطاع الوادي

تُحسب أولًا قيمة السرعة الحرجة لتحريك حبيبات قاع الوادي (VC) من المعادلة رقم 3-24 لتحديد نوع نحر التقلص:

$$V_C = 6.2\ y_1^{(1/6)}\ d_{50}^{(1/3)}$$

$$V_C = 6.2\,(0.914^{(1/6)}\,(0.7/1000)^{(1/3)} = 0.542 \ m/s$$

بما أن سرعة دخول المياه قبل الجسر (V_1^*) وتساوي 0.41 متر/ثانية وهي أقل من السرعة الحرجة، فإن نحر القاع سيكون بسبب المياه الرائقة (غير المحملة بالرسوبيات) (CLEAR WATER CONTRACTION SCOUR) ويمكن حسابه من المعادلة رقم 3-23 كما يلي:

$$y_2 = 0.2058\left(\frac{Q}{d_m^{1/3} W_2}\right)^{6/7}$$

حيث Q تمثل التدفق الكلي المار بمجرى الوادي الذي يساوي 16.38 م3/ ثانية، أما (W2) فتمثل عرض القطاع المائي عند منطقة التقلص (عند الجسر) الذي يساوي 22 مترًا. ومن ثم فإن نحر التقلص (YS) يُحسب كما يلي:

$$y_2 = 0.2058\left(\frac{13.68}{22(0.88^{1/3})}\right)^{6/7}$$

$$y_2 = 1.193\ m$$

$$y_s = y_2 - y_o = 1.193 - 0.914 = 0.28\ m$$

ثالثا: حساب النحر حول الدعامات الوسطى

يتم حساب النحر حول الدعامات الوسطى باستخدام المعادلة رقم 3-27 كالتالي: $\frac{y_s}{y_1} = 2.0\ K_1\ K_2\ K_3\ K_4 \left(\frac{a}{y_1}\right)^{0.65} Fr_1^{0.43}$

بما أن شكل مقدمة الدعامة الوسطى دائرية الشكل، فإن المعامل (K_1) يساوي "واحدًا صحيحًا» (انظر جدول رقم 3-3). بما أن زاوية ميل الجريان مع اتجاه الدعامات الوسطى تساوي صفرًا (اتجاه الجريان موازٍ لاتجاه الدعامات) فإن المعامل (K_2) يساوي واحدًا صحيحًا (انظر جدول رقم 3-4). وبفرض أن قاع المجرى حول الدعامات مسطح مع عدم وجود كثبان حول الدعامات، فإن المعامل (K_3) يساوي 1.1 (انظر جدول رقم 3-5). وبما أن متوسط قطر حبيبات قاع المجرى تساوي 0.7 مم (من بيانات المثال) والتي تعدُّ أقل من 2.0 مم، فإنه بناءً على المعادلة رقم 3-31 فإن المعامل (K_4) يتم أخذه بقيمة واحد صحيح (للحسابات المتحفظة الآمنة يتم أخذ هذا العامل بواحد صحيح). مما سبق يُحسب النحر المتوقع حول الدعامات الوسطى كالتالي، باعتبار عرض الدعامات الوسطى (a) يساوي مترًا واحدًا:

$$\frac{y_s}{y_1} = 2.0\ (1.1)\left(\frac{1.0}{0.927}\right)^{0.65}\ (0.136)^{0.43}$$

$$y_s = 0.91 m$$

رابعًا: حساب النحر حول الأكتاف

باستخدام معادلة (FROEHLICH) (المعادلة رقم 3-36):

$$\frac{y_s}{y_a} = 2.27 K_1\ K_2 \left(\frac{L^{\setminus}}{y_a}\right)^{0.43} Fr^{0.61} + 1$$

بما أن أكتاف الجسر عمودية على اتجاه الجريان ()، فإن المعامل (K_1) يساوي واحدًا صحيحًا (انظر الشكل 3-12). وبما أن أكتاف الجسر في هذا المثال من نوع الأكتاف المفتوحة (انظر الشكل 3-13، فإن المعامل (K_2) يؤخذ مساويًا 0.55. ومن الشكل 4-6 فإن طول الإسقاط للكتف في الاتجاه العمودي على اتجاه الجريان (L) - سواء الكتف اليمنى أو اليسرى - يساوي نحو 10.5 متر. أما بالنسبة لطول الردم الفعّال المعترض للتدفق فيمكن اعتبارها نحو 6 أمتار (انظر الشكل 3-14). أما بالنسبة لحساب قيمة (YA) تُحسب باستخدام المعادلة رقم 3-37 وتتطلب مسبقًا حساب الآتي:

مساحة القطاع المائي الأمامي (AE) عند الاقتراب من أكتاف الجسر ويمكن اعتبارها هي مساحة القطاع المائي عند القطاع رقم (1) (A_1^*) بعد ارتفاع المياه والتي تساوي 39.94 م2. أما بالنسبة للتدفق المعترّض بواسطة أكتاف الجسر (Q_e) فتؤخذ القيمة الأكبر من (Q_A أو Q_C) من الحسابات الموضحة بجدول رقم 2-4، ومما سبق فإن حسابات النحر حول الأكتاف باستخدام معادلة (FROEHLICH) هي كما يلي:

$$L = 10.5\ m\ ,\ \ L^{\setminus} = 6.0\ m\ ,$$

$$A_e = 39.94\ m^2$$

$$Q_e = Max.(Q_A\ or\ Q_C) = Max.(2.92\ or\ 0.63) = 2.92\ m^3/\sec.$$

$$y_a = \frac{A_e}{L} = \frac{39.94}{10.5} = 3.80\ m$$

$$V_e = \frac{Q_e}{A_e} = \frac{2.92}{39.94} = 0.073\ m/\sec.$$

$$Fr = \frac{V_e}{\sqrt{g\, y_a}} = \frac{0.073}{\sqrt{9.81(3.80)}} = 0.012$$

$$\therefore \frac{y_s}{y_a} = 1.10$$

$$y_s = 3.80\ (1.10) = 4.18\ m$$

1. باستخدام معادلة (HIRE) (المعادلة رقم 3-35):

$$y_{sb} = 4 y_1\ Fr_1^{0.33}\ \frac{K_1}{0.55} K_2$$

المعاملات K_1 و K_2 هما المعاملان المحسوبان سابقًا بمعادلة (FROEHLICH)، ورقم فرود (Fr_1) كما هو محسوب سابقًا قبل الجسر مباشرة الذي يساوي 0.136، ومن ثم يُحسب النحر عند الأكتاف باستخدام معادلة (HIRE) كما يلي:

$$y_{sb} = 4\,(0.927)\,(0.136^{0.33})\,\frac{(0.55)}{0.55} = 1.92\ m$$

بما أن قيمة (L / y_a) تساوي 2.76 والتي تعدُّ أقل من 25، فإن معادلة (FROEHLICH) هي الصحيحة للاستخدام لحساب النحر حول أكتاف الجسر. ولتقليل قيمة النحر الكبير حول أكتاف الجسر فيمكن زيادة العرض الكلي لفتحة الجسر لتقليل سرعة دخول المياه وتقليل الزيادة في ارتفاع المياه أمام الجسر.

حساب الاحتياطات المطلوبة لتخفيف النحر الموضعي (المحلي) لو كان هذا الجسر جسرًا قائمًا:

أولاً: لحساب الاحتياطات المطلوبة لتخفيف النحر الموضعي حول الدعامات الوسطى، فإنه يمكن حساب أقل قطر وسيط مطلوب لكسر الأحجار من المعادلة رقم 3-38: $D_{50} = \frac{0.692(KV)^2}{(S_S - 1)2g}$

نظرًا لمقدمات الدعامات الوسطى الدائرية الشكل، فإن المعامل K يساوي 1.5، وباستخدام كسر الأحجار فإن الكثافة النوعية (S_s) تساوي 2.65. ولحساب السرعة (V) فإنه تُحسب سرعة دخول المياه قبل الدعامات مباشرة (V_1^*) (بعد ارتفاع منسوب المياه بالأمام) والمحسوبة سابقًا (0.41 م/ث) ثم ضربها بمعامل يتراوح بين 1.5 إلى 2.0 (وليكن 1.7) . وبذلك يكون أقل قطر كسر أحجار وسيط مطلوب (D_{50}) كما يلي. وبالنسبة للترتيب الوقائي لهذه الأحجار حول الدعامات برجاء الرجوع للشكل 3-4:

$$V = 1.7(V_1^*) = 0.70\ m/s$$

$$D_{50} = \frac{0.692(1.5\,x0.7)^2}{(2.65-1)2g} = 0.0234 m$$

ثانيًا: لحساب الاحتياطات المطلوبة لتخفيف النحر الموضعي حول أكتاف الجسر، فإنه يمكن حساب أقل قطر كسر أحجار وسيط مطلوب من المعادلة رقم 3-39.

متوسط عمق المياه عند منطقة التقلص (Y2) يكافئ عمق المياه أمام الجسر والمحسوب سابقًا (Y1) بقيمة 0.927 متر.

المسافة بين نهاية أكتاف الجسر ونهاية حافة مجرى الوادي (LS) تساوي 10 أمتار (انظر الشكل 5-4 ومن ثم:

$$L_s / y_2 = 10 / 0.927 = 10.8 > 5.0$$

ومن ثم يمكن حساب السرعة المتوسطة (V2) بمنطقة التقلص كالتالي:

$$V_2 = \frac{Q_{2f}}{A_{2f}}$$

ومن الجدول رقم 3-7، واعتمادًا على القطاعين الفرعيين المعنيين ق1 و ق2 بالجزء B، فإن: -

$$Q_{2f} = 3.13\ m^3/\sec.\ ,\ A_{2f} = 9.02\ m^2$$

$$\therefore V_2 = 0.35\ m/\sec.$$

يتم حساب رقم فرود (F_r) كما يلي:

$$F_r = \frac{V_2}{\sqrt{g\, y_2}} = \frac{0.35}{\sqrt{9.81(0.927)}} = 0.12 < 0.80$$

- وبما أن نوع أكتاف الجسر في هذا المثال من النوع الأكتاف المفتوحة، ومن ثم يمكن تحديد معاملات المعادلة رقم 3-39 من الجدول رقم 3-6 كما يلي: $n = 1.0, \quad K_s = 0.89$

- المعادلة النهائية لحساب القطر الوسيط لأحجار الحماية المطلوبة كما يلي:

$$\frac{D_{50}}{y_2} = \frac{0.89}{(S_S - 1)}\left(F_r^2\right)^1$$

$$\frac{D_{50}}{3.07} = \frac{0.89}{(2.65 - 1)}\left(0.12^2\right)^1$$

$$D_{50} = 0.0077\ m$$

يتضح مما سبق صغر المقاس المطلوب لكسر أحجار الحماية المطلوب للحماية، وذلك منطقي نظرًا لصغر سرعات المياه السابقة التي تتراوح في حدود 0.5 متر/ث ويمكن أن تتحملها مواد قاع الوادي.

ونزيد حالة افتراضية بفرض أن الانحدار الطولي للوادي هو 0.03 م/م في المثال السابق؛ لبيان أهمية الاحتياطات اللازمة لحماية الدعامات الوسطى وأكتاف الجسر. فإذا أعيدت الحسابات السابقة نحصل على النتائج التالية:

- التدفق الكلي المار بالمجرى المائي (Q) كما يلي:

$$Q = \sum_{i=1}^{N} q_i = 163.84\ m^3/\text{sec}.$$

- مساحة القطاع المائي باستخدام منسوب المياه للجريان الطبيعي أسفل الجسر مباشرة (AN2) ثابتة وتساوي $A_{n2} = 26.42\ m^2$

- الزيادة في الارتفاع الكلي للمياه أمام الجسر تساوي (H_1^*):

$$H_1^* = 2.16\ m$$

- يُحسب عمق المياه النهائي أمام الجسر مباشرة (Y1) كالتالي:

- مساحة المقطع المائي (A_1^*)عند القطاع رقم (1) أمام الجسر بعد ارتفاع منسوب المياه تساوي 83.18 م2.

$$y_1 = y_o + H_1^* = 3.07\ m$$

- السرعة خلال القطاع رقم (1) (V_1^*) بعد ارتفاع المياه أمام الجسر ورقم فرود (Fr_1) عند القطاع نفسه قبل الجسر يمكن حسابهما كما يلي:

$$V_1^* = \frac{Q}{A_1^*} = \frac{163.84}{83.18} = 1.97\ m/s$$

$$Fr_1 = \frac{V_1^*}{\sqrt{g\, y_1}} = \frac{1.97}{\sqrt{9.81(3.07)}} = 0.359$$

أولًا: حساب الاحتياطات المطلوبة لتخفيف النحر الموضعي حول الدعامات الوسطية

$$D_{50} = \frac{0.692(KV)^2}{(S_S - 1)2g}$$

$$V = 1.7(V_1^*) = 3.35\ m/s$$

$$D_{50} = \frac{0.692(1.5x3.35)^2}{(2.65-1)2g} = 0.419m$$

ثانيًا: لحساب الاحتياطات المطلوبة لتخفيف النحر الموضعي حول أكتاف الجسر

متوسط عمق المياه عند منطقة التقلص (Y2) يكافئ عمق المياه أمام الجسر والمحسوب سابقًا (Y1) بقيمة 3.07 متر.

المسافة بين نهاية أكتاف الجسر ونهاية حافة مجرى الوادي (LS) تساوي 10 أمتار (انظر الشكل 5-4)، ومن ثم:

$$L_s / y_2 = 10/3.07 = 3.26 < 5.0$$

ومن ثم يمكن حساب السرعة المتوسطة (V2) كالتالي:

$$V_2 = \frac{Q}{A_2} = \frac{163.84}{26.42} = 6.20\ \ m/s$$

يتم حساب رقم فرود (F_r) كما يلي:

$$F_r = \frac{V_2}{\sqrt{g\, y_2}} = \frac{6.20}{\sqrt{9.81(3.07)}} = 1.13 > 0.80$$

وبما أن نوع أكتاف الجسر في هذا المثال من النوع الأكتاف المفتوحة، ومن ثم يمكن تحديد معاملات المعادلة رقم 3-39 من الجدول رقم 3-6 كما يلي: $n = 0.14, \quad K_s = 0.61$

المعادلة النهائية لحساب القطر الوسيط لأحجار الحماية المطلوبة كما يلي:

$$\frac{D_{50}}{y_2} = \frac{0.61}{(S_S - 1)}\left(F_r^2\right)^{0.14}$$

$$\frac{D_{50}}{3.07} = \frac{0.61}{(2.65-1)}\left(1.13^2\right)^{0.14}$$

$$D_{50} = 1.17\ m$$

ويتم اختيار قطر الأحجار الفعلي بحيث يكون أكبر من أو يساوي من القيمة المحسوبة سابقًا سواء للدعامات الوسطى أو الأكتاف حسب المقاسات المتوفرة بمنطقة الدراسة، ثم يتم تحديد الترتيب الوقائي لحماية الأكتاف بالرجوع إلى الشكل -54.

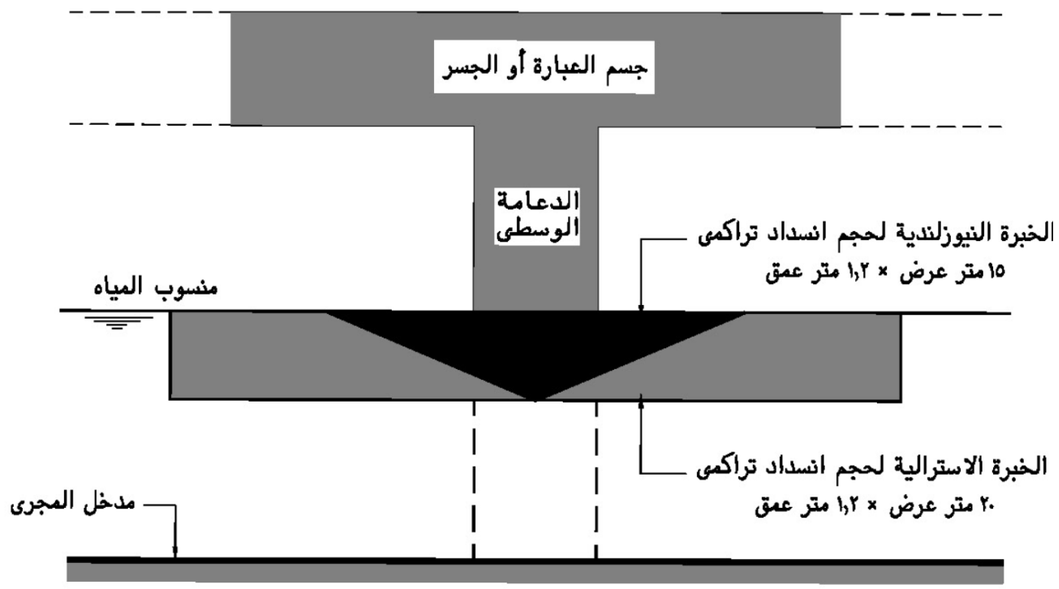
1-5 مقاومة انسداد المجرى المائي تحت الجسر بسبب العوالق

إن تدفق العوالق (DEBRIS) هو بمثابة سيل يتكون من خليط من الماء والصخور أو العوالق الخشبية، ويندفع بسرعة عالية إلى أسفل المجاري المائية شديدة الانحدار، ويصل انحدارها إلى ٪45-25. في المواقع التي تكون عرضة لتدفقات العوالق من هذا القبيل، يجب على المصمم إجراء تقييم لمخاطر انسداد الجسر بمنطقة الدراسة. في هذا التقييم، يجب على المصمم دراسة ظروف الموقع والتعرف على أنواع العوالق وكمياتها ومخاطر الانسداد في موقع الجسر. إذا كان انحدار المجرى المائي عند موقع الجسر يتجاوز ٪5، فإن المصمم يجب أن يبحث عن دلائل على حمل السيل لعوالق في الجانب الأمامي من موقع الجسر المقترح. ويمكن أن تشمل علامات العوالق السابقة وجود الفروع المكسورة و/أو الشوكات (الأعتاب) عند مستويات أعلى بكثير من مستويات السيول الاعتيادية. ومن المهم عقد

لقاءات مع من يقطنون بالقرب من مكان الموقع والمسؤولين المحليين عن التشغيل والصيانة. ويجب ملاحظة أن عدم العثور على دلائل العوالق خلال الزيارة الاستطلاعية لا يعني عدم وجود تدفق للعوالق. ووفقًا لما سبق، وعلى أساس حجم العوالق المتوقع، فعلى المصمم التفكير في توفير طرق للتحكم في تدفق العوالق من خلال منشآت/أحواض كاسحة للعوالق أو حاجزة لها. ويمكن للمصمم أن يرجع إلى إصدارات إدارة الطرق السريعة الفيدرالية أو أي دراسات حديثة للوصول إلى معلومات إضافية.

إن التهديد المتوقع للجسور نتيجة تدفقات العوالق يمكن وصفه من خلال عمليتين أساسيتين؛ الأولى هي انسداد جزئي أو كامل للمجرى المائي، يتسبب في ارتفاع المياه فوق أرضية الجسر (DECK OVERTOPPING) وانجراف للتربة بالقرب من ضفاف الجسر، والثانية تلف أو تدمير العناصر الإنشائية. في العملية الأولى، فإن اندفاع التدفق في مقطع متقلص نتيجة للانسداد بسبب العوالق يؤدي إلى سرعة كبيرة وإلى أعماق نحر أكبر، ويمكن أن تكشف أساسات الجسر وتتلفها والتي بدورها تؤدي إلى انهيار كامل للجسر. في العملية الثانية، فإن العوالق الكثيرة إلى جانب السرعات العالية في مناطق ضيقة، قد يؤدي إلى تحميل ثابت و/أو ديناميكي كبير على الدعامات الوسطية وعلى أرضية الجسر، وسوف تؤدي إلى زعزعة استقرار الهيكل الإنشائي بأكمله.

في حالة التدفقات الكبيرة الملحوظة في الوديان التي تحتوي على كمية كبيرة من العوالق العائمة، فإنه يجب إجراء تقييم للانسداد الجزئي أو الكلي للجسور الكبيرة عن طريق استخدام معامل الانسداد، هناك الكثير من الأبحاث حول حجم أو أبعاد منطقة الانسداد التي يجب أن تطبق في هذه الطريقة. ومع ذلك، فمن الممكن أن نقترح أن يقوم المصمم بتحديد حجم الانسداد الذي يسمح بتراكم عوالق من 20 مترًا عرضًا × 1.2 متر عمقًا كما هو مبين في الشكل 5-1، وذلك وفقًا للخبرة الأسترالية أو النيوزيلندية في هذا الصدد.



الشكل 5-1: الطرق التقليدية للتعبير عن العوالق العائمة عند الدعامات الوسطية للجسور

وهناك أنواع مختلفة من تدابير مكافحة العوالق المتاحة لحماية الهياكل الإنشائية للجسر. بعض من منشآت التحكم في العوالق موضح في الباب الأول والتي تتعلق بالعبّارات، ويمكن أيضًا أن تستخدم مع الجسور. ومن أكثر تدابير مكافحة العوالق شيوعًا هي:

- إنشاء «زعانف العوالق» وهي جدران تُقام في المجرى المائي أمام الجسر وتعمل بمثابة جذع شجرة كبير بفروعها. ويكون طولها موازيًا لاتجاه الجريان بالمجرى المائي. وتساعد هذه الآلية في نقل ووصول العوالق خلال فتحة الجسر دون وقوع حوادث بسبب حجزها، ويوصف هذا النوع من التدابير أيضًا على أنه «تمديد لمقدمة الدعامات الوسطية» (انظر الشكل 2-5).
- إنشاء «أحواض العوالق والرواسب» في المجرى المائي وهي منشآت يتم وضعها عند قطاعات وأماكن محددة من المجرى المائي، بحيث تشكل حوضًا يعيق الجريان المائي ويقوم بتوفير مساحة حجز وتخزين للرواسب وكذلك العوالق العائمة، ولكن هذه المنشآت مكلفة في الإنشاء والصيانة.
- إضافة منشآت «توجيه العوالق» وهي توضع أمام الدعامات الوسطية للجسور بهدف تحويل وتوجيه العوالق من خلال فتحات الجسر. وهي عادة ما تكون على شكل «V" في المسقط الأفقي مع وجود رأس توجيه أمامي (انظر الشكل 3-5).

الشكل 5-2: الطرق التقليدية للتعبير **عن العوالق العائمة عند الدعامات الوسطية للجسور**

الشكل 5-3: منشآت توجيه العوالق

ومن الممكن أيضًا دون اللجوء إلى منشآت إضافية لتقليل تأثير ارتطام العوالق أو حجزها، أخذ بعض الاعتبارات الهيكلية التي يمكن تنفيذها في تصميم هيكل الجسر المقترح، الأول: توفير الخلوص الكافي المطلوب (FREEBOARD)، والمسؤول عن إتاحة مسافة إضافية بين مستوى سطح الماء الأقصى وأكثر وتر (عصب) انخفاضًا في الجسر. والثاني يرتبط بنوع الدعامات الوسطية، موقعها وأطوال بحور الجسر. من الناحية المثالية، ينبغي أن تكون الدعامات الوسطية من نوع الركائز الصلبة ومصطفة بطريقة تتماشى مع اتجاه الجريان. وينبغي أيضًا أن تكون الدعامات الوسطية متباعدة بحيث تؤدي إلى تقليل احتمال تراكم العوالق إلى أدنى حد ممكن. أما الاعتبار الثالث فيكمن في استخدام تصميم خاص للبنية الفوقية، مثل تصميم أرضية الجسر بحيث تقلل تراكم العوالق على جسم الجسر عندما ترتفع المياه أثناء السيل فوق سطح الأرضية. وإذا ما كان حوض التصريف (CATCHMENT AREA) ينتج عنه عوالق قليلة، فليست هناك حاجة إلى إضافة هامش أمان للمعايير المقترحة أعلاه.

مراجع الجزء الأول

ABU DHABI CITY MUNICIPALITY (ADM) - INTERNAL ROADS & INFRASTRUCTURE - STORM WATER & SUB-SOIL DRAINAGE SYSTEMS MANUAL - V6 2015

DUBAI MUNICIPALITY - SEWERAGE, DRAINAGE & IRRIGATION MASTER PLAN (DS185) DRAFT DRAINAGE DESIGN CRITERIA - V2 2013

DUBAI MUNICIPALITY (DM) - (DS185) SEWERAGE, DRAINAGE & IRRIGATION MASTER PLAN- DRAFT DRAINAGE DESIGN CRITERIA - V2 2013

FHWA - HYDRAULIC DESIGN OF HIGHWAY CULVERTS - 3RD EDITION 2012

FHWA - URBAN DRAINAGE DESIGN MANUAL (HEC-22) - 3RD EDITION 2009

MUNICIPALITY OF ABU DHABI - STORM WATER & SUB-SOIL DRAINAGE SYSTEMS MANUAL - V6 2015

TEXAS DOT - HYDRAULIC DESIGN MANUAL 2016

الجزء الثاني

دليل التصميم الإنشائي للجسور والعبارات

المحتويات

قائمة بالمصطلحات المستخدمة باللغتين العربية والإنجليزية 2-5

1- المقدمة 2-10

1-1 الغاية من المواصفات والنطاق 2-10

2-1 محددات التصميم 2-10

2- الأحمال 2-21

1-2 عام 2-12

2-2 الأحمال الدائمة (Permanent Loads) 2-12

3-2 الأحمال الحية (أحمال المرور) (Live Loads) 2-12

4-2 الأحمال الوقتية (الأحمال المتغيرة) (Transient Loads) 2-15

5-2 الأحمال الناتجة عن تأثيرات الزلازل 2-17

3- المنشآت الخرسانية 2-02

1-3 عام 2-20

2-3 خصائص المواد 2-20

3-3 متطلبات الديمومة (Durability Requirements) 2-20

4-3 حدود التشرخ (Crack Control) 2-27

5-3 تفاصيل حديد التسليح 2-27

6-3 الكمرات الخرسانية سابقة الصب، سابقة الإجهاد (Precast Prestressed Concrete Girders) .. 2-28

7-3 الجسور الخرسانية لاحقة الشد (Post-tensioned Concrete Bridges) 2-29

8-3 الكمرات الصندوقية القطاعية (Precast Segmental Box Girders) 2-30

4- الأساسات 2-53

1-4 عام 2-35

2-4 الأساسات الضحلة (Shallow Foundations) 2-35

3-4 الأساسات العميقة (Deep Foundations) 2-35

5- الركائز الطرفية والوسطية (Abutments and Piers) 2-83

1-5 عام 2-38

2-5 الركائز الطرفية وجدران الأجنحة (Abutments and Wing Walls) 2-38

3-5 الركائز الوسطية (Piers) 2-39

6- الفواصل (Expansion Joints) 2-24

1-6 عام 2-42

2-6 متطلبات التصميم 2-42

3-6 فاصل الحشوات الأسفلتية (Asphaltic Plug Joints) 2-43
4-6 فواصل الحشوات المضغوطة (Closed-Cell Compression Seal) 2-43
5-6 فواصل التكتيم الشريحي (Strip Seal) 2-44
6-6 فواصل التمدد الفولاذية (Steel Finger Joints) 2-44
7-6 فواصل التمدد الخلوية (Modular Expansion Joints) 2-44

7- أجهزة الاستناد (Bearings) 2-54
1-7 عام 2-45
2-7 متطلبات التصميم والتركيب 2-45

8- العبارات (Culverts) 2-84
1-8 عام 2-48
2-8 العبارات الصندوقية الخرسانية المسلحة 2-48

9- جسور المشاة (Pedestrian Bridges) 2-05
1-9 عام 2-50
2-9 حمل الحمل الحي التصميمية 2-50

01- مراجع الجزء الثاني 2-25

قائمة بالمصطلحات المستخدمة باللغتين العربية والإنجليزية	
Abutments	الركائز الطرفية
Access openings	فتحات وصول
Accessibility	الوصول
Approach slabs	بلاطات الاقتراب
Anchor bolts	براغي التثبيت
Anchorages	مراسي التثبيت
Asphaltic plug joints	فاصل الحشوات الأسفلتية
Back wall	الجدار الخلفي
Battered piles	الخوازيق المائلة
Bearing plates	ألواح الارتكاز
Bearings	أجهزة الاستناد
Beveled plate	لوح ارتكاز مشطوف
Blinding	خرسانة النظافة
Blisters	الأغلفة
Block-outs	البلوكات الخارجية
Bundled bars	الأسياخ المحزومة
Camber	التحدب
Cantilever bridges	الجسور الكابولية
Casing	التغليف
Chloride intrusion rate	معدل اختراق الكلوريدات
Clear cover	الغطاء الخرساني الصافي
Closed-cell compression seal	فواصل الحشوات المضغوطة
Closure joint	فاصل الإغلاق
Combined footings	الأساسات المشتركة
Concrete ramps	منحدرات خرسانية
Concrete shear keys	خوابير القص من الخرسانة
Construction joints	فواصل التنفيذ
Crack control	حدود التشرخ
Creep	الزحف
Critical eccentricity	اللامركزية الحرجة

قائمة بالمصطلحات المستخدمة باللغتين العربية والإنجليزية	
Culverts	العبارات
Debonded strands	أسلاك الجدائل غير المتماسكة
Deck overhang	كوابيل المنشأ العلوي
Deck slab	بلاطة ظهر الجسر
Deep foundations	الأساسات العميقة
Deflections	الترخيمات
Deformations	التشكلات
Design 3-second gust wind speed	سرعة الرياح التصميمية لثلاث ثوانٍ
Design lane load	حمل المسرب التصميمي
Design response spectrum	طيف الاستجابة التصميمي
Design tandem	المحاور المزدوجة المترادفة التصميمية
Design truck	العربة التصميمية
Design vehicular live load	الحمل الحي التصميمي الخاص بالعربات
Development length	طول التماسك
Deviation	الانحراف
Deviation saddles	سروج الانحراف
Diaphragms	العوارض العرضية
Differential settlement	الهبوط المتفاوت
Drilled piles	الخوازيق المحفورة
Driven piles	الخوازيق المدقوقة
Ducts	قنوات الكابلات
Durability	الديمومة
Dynamic load allowance	الزيادة الناتجة عن التحميل الديناميكي
Early thermal cracking	حدود التشرخ الحراري
Earth pressure	ضغط التربة الجانبي
Elastic seismic response coefficient	معامل الاستجابة الزلزالية المرن
Environmental classification	التصنيف البيئي
Expansion joints	الفواصل
HLMR bearings	أجهزة الاستناد عالية التحميل ومتعددة الدوران
Hold downs	وسائط تثبيت رأسي

قائمة بالمصطلحات المستخدمة باللغتين العربية والإنجليزية	
Hollow section piers	الركائز ذات القطاعات المفرغة
Initial offset	ترحيل ابتدائي
Intermediate diaphragms	عوارض عرضية وسطية
Live loads	الأحمال الحية
Locked-in erection stresses	إجهادات التركيب المحبوسة
Longitudinal open joint	فاصل طولي مفتوح
Long-term prestress losses	فواقد (ضياعات) سبق الإجهاد طويلة المدى
Marine structures	المنشآت البحرية
Metal rocker or roller bearing	جهاز الاستناد المعدني المتأرجح أو الدوراني
Minimum reinforcement	حدود التسليح الدنيا
Modular expansion joints	فواصل التمدد الخلوية
Monopile	العمود المرتكز على خازوق واحد
Multimode spectral method	طريقة السلوك المتعدد الطيفي
Overlapping	تراكب
Pedestrian bridges	جسور المشاة
Permanent loads	الأحمال الدائمة
Pier cap	الكمرة العلوية
Piers	الركائز الوسطية
Pier segment	القطعة فوق الركيزة
Pile caps	هامات الخوازيق
Plain elastomeric pad	الوسادة المرنة المستوية
Plastic hinges	مفاصل لدنة
Post-tensioning	الشد اللاحق
Pot bearing	جهاز الاستناد الوعائي
Precast	سبق الصب
Precast segmental box girders	الكمرات الصندوقية القطاعية
Precast skewed culverts	العبارات المنحرفة سابقة الصب
Prestressing	سبق الإجهاد
Prestressing jack	مضخة الشد
Redundancy	التكرار

قائمة بالمصطلحات المستخدمة باللغتين العربية والإنجليزية	
Relative humidity	الرطوبة النسبية
Representative cores	قلوب ممثلة
Seat width	عرض جلسة الاستناد
Self-weight	الحمل الذاتى
Shallow foundations	الأساسات الضحلة
Shrinkage	الانكماش
Slotted bearing plates	ألواح ارتكاز ذات شق فتحة
Spherical bearing	جهاز الاستناد الكروي
Splices	الوصلات
Spread footings	الأساسات المنفردة
Standard hooks	الخطافات القياسية
Steel finger joints	فواصل التمدد الفولاذية
Steel-reinforced elastomeric bearings	أجهزة الاستناد من المطاط المسلح بالفولاذ
Stirrups	الكانات
Strip footings	الأساسات الشرائحية المستمرة
Strip seal	فواصل التكتيم الشريحي
Sub-structure	المنشأ السفلي
Superimposed dead load	الأحمال الدائمة الإضافية
Super-structure	المنشأ العلوي
Sustainability	الاستدامة
Temperature gradient	فرق درجات الحرارة
Ties	الأساور
Transient loads	الأحمال الوقتية (الأحمال المتغيرة)
Uniform temperature	درجات الحرارة المنتظمة
Wearing course	الخرسانة الأسفلتية
Wing walls	جدران الأجنحة

الفصل الأول
المقدمة

1- المقدمة

1-1 الهدف من المواصفات والنطاق

يتم تصميم منشآت الطرق من الجسور والعبارات والممرات السفلية ومعابر المشاة وفقا لأحدث إصدار من مواصفات التصميم الأمريكية (AASHTO LRFD Bridge Design Specifications) الصادرة عن الجمعية الأمريكية لموظفي النقل والطرق السريعة (AASHTO) (النسخة الثامنة (8th edition 2017) عند التحديث الأول لهذا الدليل). خلال هذا الدليل يرمز لمواصفات التصميم ب(AASHTO LRFD BDS).

على وجه العموم هذا الدليل لا يكرر ما جاء في مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، ولكنه يعدل بعض الأحكام لما يناسب بيئة المملكة مثل أحمال الرياح وأحمال الزلازل وغيرها. وحيثما تعرض مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بدائل للتصميم يحدد الاختيار المفضل للمملكة. كما أنه يحدد الممارسات المذكورة في مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) ولكنها لا تناسب المملكة.

2-1 محددات التصميم

بالإضافة إلى محددات التصميم المذكورة في بند 2-5 من مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) يتم إعطاء البنود التالية أهمية خاصة:

1-2-1 الديمومة (Durability)

نظرًا للظروف المناخية الخاصة بمنطقة الخليج بصفة عامة والمملكة العربية السعودية بصفة خاصة تم تخصيص بند 3-3 من هذا الدليل لتوضيح متطلبات الديمومة لجميع العناصر الإنشائية لمنشآت الجسور.

2-2-1 قابلية الصيانة والفحص

يجب مراعاة تسهيل الوصول لمختلف عناصر المنشأ مثل أجهزة الاستناد والفواصل للفحص والصيانة الدورية والتغيير (إذا لزم الأمر).

3-2-1 الاستدامة (Sustainability)

يجب أن يتم تصميم وتنفيذ منشآت الجسور بحيث تحقق الاستخدام الأمثل للموارد الطبيعية ومصادر الطاقة كما يجب أن يكون لها أقل تأثير ممكن على البيئة المحيطة.

4-2-1 الجماليات (Aesthetics)

يجب أن تتم معالجة المنشآت بحيث تتناغم مع النواحى الجمالية للبيئة المحيطة ، كما يجب أن يراعى سهولة تنفيذها وصيانتها. كما يجب أن يكون لكل منشأ خصوصيته المتميزة، ولكن في حالة وجود مجموعة من المنشآت على محور الطريق يراعى أن تكون النواحى الجمالية لها متناغمة مع بعضها بعضًا.

الفصل الثالث
الأحمال

2- الأحمال

1-2 عام

بالنسبة لعوامل التحميل وتراكيب الأحمال يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 3-4 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS).
بالنسبة للأحمال الدائمة والأحمال الحية وكافة أنواع الأحمال المتغيرة، فإنه يتم الرجوع إلى جميع أجزاء الباب الثالث (بند 3-5 إلى بند 3-15) بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى التعديلات والإضافات الموضحة في البنود التالية.

2-2 الأحمال الدائمة (PERMANENT LOADS)

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 3-5 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.
في حالة عدم وجود معلومات دقيقة فإنه يمكن استخدام الكثافات التالية:

- الخرسانة المسلحة أو سابقة الإجهاد 25 كن/م^3.
- الخرسانة العادية 23 كن/م^3.
- الخرسانة الأسفلتية (Wearing course) (تستخدم كطبقة تغطية فوق بلاطة سطح الجسر) 22 كن/م^3.

3-2 الأحمال الحية (أحمال المرور) (LIVE LOADS).

1-3-2 الحمل الحي التصميمى الخاص بالعربات (Design Vehicular Live Load).

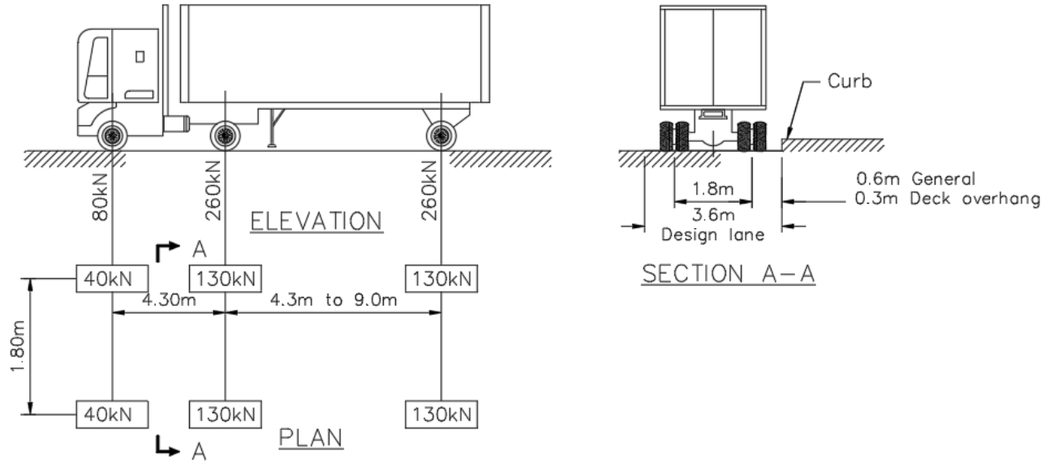
يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 3-6 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.
يجب أن يتكون التحميل الحي الخاص بالعربات على طرق الجسور أو المنشآت العرضية، الذي يرمز إليه HL-MOMRA، من تركيب:

- العربة التصميمية (Design truck) أو المحاور المزدوجة المترادفة التصميمية (Design tandem).
  حمل المسرب التصميمي (Design lane load). لتحديد عرض المسرب التصميمي يتم الرجوع لبند 3-6-1-1 من مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS).

يجب شغل كل مسرب تصميمي (Design Lane) إما بواسطة العربة التصميمية أو المحاور المزدوجة المترادفة التصميمية، بالترافق مع حمل المسرب إذا كان ذلك ملائماً. كما يجب افتراض أن الأحمال تشغل مسافة مقدارها 3.0 م بشكل عرضي ضمن المسرب التصميمي.

العربة التصميمية (Design Truck)

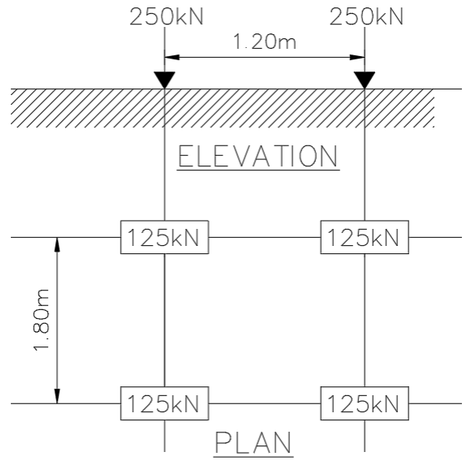
يجب أن تكون الأوزان والتباعدات للمحاور والعجلات الخاصة بالعربة التصميمية كما هو محدد في الشكل (2-1)، ويجب أخذ الزيادة الناتجة عن التحميل الديناميكي (Dynamic load allowance, IM) في الحسبان كما هو محدد في الفقرة الخاصة بها في مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) (بند 3-6-2). كما يجب أن يتغير التباعد بين محوري الحمل 260 كيلو نيوتن ما بين 4.30 و 9.0 م وذلك لتوليد تأثيرات قصوى للقوى المؤثرة.



شكل (2-1): خصائص العربة التصميمية.

المحاور المزدوجة المترادفة التصميمية (Design Tandem)

يجب أن تتكون المحاور المزدوجة المترادفة التصميمية من زوج من المحاور بحمل 250 كيلو نيوتن وتباعد 1.20 م كل على حدة، كما هو موضح بالشكل (2-2). ويجب أخذ الزيادة الناتجة عن التحميل الديناميكي في الجسبان كما هو محدد في الفقرة الخاصة بها في مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) (بند 3-6-2).



شكل (2-2): خصائص المحاور المزدوجة المترادفة التصميمية

حمل المسرب التصميمي (Design Lane Load)

يجب أن يتكون حمل المسرب التصميمي من حمل 20 كن/م موزع بانتظام في الاتجاه الطولي. كما يجب افتراض حمل المسرب التصميمي موزعًا بانتظام على عرض 3.0 م. ويجب ألا تخضع تأثيرات القوى من حمل المسرب التصميمي للزيادة الناتجة عن التحميل الديناميكي.

2-3-2 تطبيق الأحمال الحية التصميمية الخاصة بالعربات

باستثناء ما هو محدد، فإنه يجب أن تؤخذ تأثيرات القوى القصوى بالقيمة الأكبر مما يلي:

- تأثير حمل المحاور المزدوجة المترادفة التصميمي متراكبًا مع حمل المسرب التصميمي.
- تأثير حمل عربة تصميمية واحدة مع تباعد المحاور المتغير، متراكبًا مع تأثير حمل المسرب التصميمي.
- 90٪ من تأثير عربتين تصميميتين بتباعد أدنى مقداره 15.0 م بين محور القيادة لإحدى العربات ومحور المؤخرة للعربة الأخرى، متراكبًا مع 90٪ من تأثير حمل المسرب التصميمي، من أجل العزم السالب بين نقاط الانحناء المعاكس تحت الحمل المنتظم على جميع الفتحات، ورد الفعل عند الركائز الوسطية الداخلية فقط. كما يجب أن تؤخذ المسافة بين محاور الأحمال 260 كيلو نيوتن بمقدار 4.30 م. ويجب أن توضع العربتان التصميميتان على فتحتين متجاورتين لتوليد تأثيرات القوى العليا.

يجب إهمال المحاور التي لا تساهم في إعطاء تأثير القوة القصوى المأخوذ في الحسبان.

يجب وضع المسارب التصميمية والعرض المحمل بمقدار 3.0 م في كل مسرب؛ وذلك لإعطاء تأثير القوة القصوى. كما يجب وضع العربة التصميمية أو المحاور المزدوجة المترادفة بشكل عرضي بحيث يكون بعد أي حمل عجلة لا يقل عن:

- من أجل تصميم كوابيل سطح الجسر: 300 مم من وجه البردورة أو الحاجز (الدرابزين).
- من أجل تصميم جميع المكونات الأخرى: 600 مم من طرف المسرب التصميمي.

ما لم يتم التحديد، فإنه يجب تحميل أطوال المسارب التصميمية، أو الأجزاء التي تساهم منها في إعطاء تأثير القوة القصوى المعتبر بحمل المسرب التصميمي.

3-3-2 التحميل الاختياري الخاص بتقييم الترخيم الناتج عن الحمل الحي

إذا قامت الجهة المالكة بطلب معايير الترخيم الاختياري الناتج عن الحمل الحي كما هو محدد سابقًا، فيجب أن تؤخذ قيمة الترخيم الأكبر من:

- الترخيم الناتج عن العربة التصميمية بمفردها.
- الترخيم الناتج عن 25٪ من العربة التصميمية المأخوذة بالتلازم مع حمل المسرب التصميمي.

4-3-2 أحمال كوابيل المنشأ العلوي (Deck Overhang Design)

بالنسبة للكوابيل التي لا تتعدى فيها المسافة بين محور الكمرة الخارجية والسطح الداخلي لحاجز الحماية ذي الاستمرارية الإنشائية 1.8م، يسمح باستبدال الصف الخارجي للعجلات بحمل مستمر قيمته 30 كن/م على مسافة 0.30م من السطح الداخلي لحاجز الحماية.

4-2 الأحمال الوقتية (الأحمال المتغيرة) (SDAOL TNEISNART)

1-4-2 أحمال الرياح

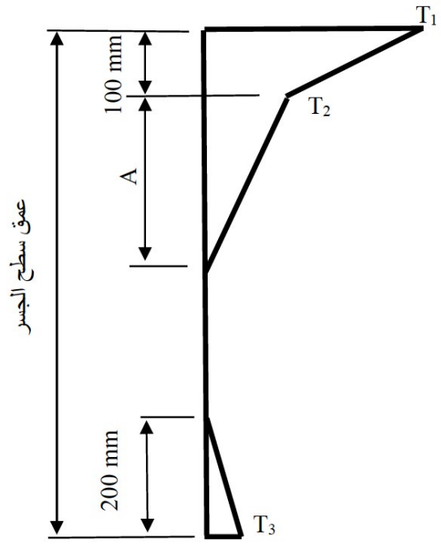
يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 3-8 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.
يتم استخدام سرعة الرياح التصميمية لثلاث ثوانٍ (Design 3-second gust wind speed V)
طبقًا لكود البناء السعودي في أحدث إصدار له (Figure 1609.3(1) SBC 201-CR-2018 عند التحديث الأول لهذا الدليل).

2-4-2 أحمال درجات الحرارة المنتظمة (Uniform Temperature)

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 3-12-2 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية:
يمكن حساب التغير الحراري التصميمي المترافق مع تغيرات منتظمة لدرجات الحرارة للمنشآت الخرسانية على أساس درجة حرارة عليا لمنطقة الإنشاء بقيمة 60°م، ودرجة حرارة دنيا بقيمة صفر°م، وبفرض أن درجة الحرارة وقت الإنشاء تساوي 30°م، ومن ثم يتم التصميم لمدى 30°±م.
أما في حالة المنشآت المعدنية، تعدل قيمة درجة الحرارة العليا لمنطقة الإنشاء لتصبح 70°م، ومن ثم يتم التصميم لمدى 40°+م و30°-م.

3-4-2 أحمال فرق درجات الحرارة (Temperature Gradient)

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 3-12-3 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.
يتم التصميم لحالة فرق درجات الحرارة في الاتجاه الرأسي لسطح الجسر طبقًا للتوزيع بالشكل (2-3).



شكل (2-3): التوزيع الرأسي التصميمي لفرق درجات الحرارة لأسطح الجسور الخرسانية

وتؤخذ درجات الحرارة T1 و T2 بالشكل (2-3) T1 = 30°م و T2 = 8°م، بينما تؤخذ درجة الحرارة T3 بقيمة صفر°م، إلا إذا تم تحديد قيمة أخرى مناسبة بناءً على دراسة خاصة بموقع الإنشاء.
ويؤخذ البعد A بالشكل (2-3) كالتالي:

- 300 مم في حالة أسطح الجسور الخرسانية ذات عمق قطاع أكبر من أو يساوي 400مم.
- 100 مم أقل من العمق الفعلي لقطاع سطح الجسر في حالة الجسور الخرسانية ذات عمق أقل من 400مم.

يتم إهمال حالة فرق درجات الحرارة العكسي (حالة أن يكون السطح السفلي للجسر أكثر سخونة من السطح العلوي) نظرًا لطبيعة حالة المناخ بالمملكة.

5-2 الأحمال الناتجة عن تأثيرات الزلازل

1-5-2 عام

يتم الرجوع إلي جميع أجزاء بند 3-10 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى كود البناء السعودي (SBC 301-CR-2018 2-and 11 1-and Tables 11 2-and 22 1-Figures 22) في أحدث إصدار له عند التحديث الأول لهذا الدليل، بجانب التعديلات والإضافات التالية.

2-5-2 طيف الاستجابة التصميمي (Design Response Spectrum)

يجب تحديد قيم عوامل التسارع الطيفي القصير والطويل المدى (Ss و S1 على التوالي)، من خلال الخرائط بالشكل (22-1) والشكل (22-2) بكود البناء السعودي SBC 301-CR-2018 حسب ما هو مناسب. يجب استخدام الاستيفاء الخطي للمناطق الموجودة بين خطوط الكونتور أو بين خط الكونتور والحد المحلي الأعلى أو الأدنى.
يجب أن يؤخذ طيف الاستجابة التصميمي المتخامد بالقيمة 5٪ كما هو محدد في الشكل (2-4). ويجب حساب هذا الطيف باستخدام عوامل التسارع الطيفي من الشكل (22-1) والشكل (22-2)، بكود البناء السعودي SBC 301-CR-2018، مقاسة بعوامل الموقع القصيرة والطويلة المدى Fa و Fv على التوالي من جدول رقم (11-1) وجدول رقم (11-2) بكود البناء السعودي SBC 301-CR-20.

3-5-2 معامل الاستجابة الزلزالية المرن (Elastic Seismic Response Coefficient)

من أجل الأزمنة الدورية Tm الأقل من أو تساوي To، فإنه يجب أن يؤخذ معامل الاستجابة الزلزالي المناظر لنمط الاهتزاز المعتبر رقم m، Csm، كما يلي:

$$C_{sm} = A_s + (S_{DS} - A_s)\,(T_m / T_o) \qquad (1-2)$$

حيث :

$$A_s = 0.4\,S_{DS} \qquad (2-2)$$

$$S_{DS} = 0.8\,F_a\,S_S \qquad (3-2)$$

حيث :
SS: معامل تسارع طيف الاستجابة الأفقي عند الزمن الدوري 0.2 ثانية في الصخر (الموقع من الصنف B).
Tm: الزمن الدوري للاهتزاز المناظر لنمط الاهتزاز المعتبر رقم m (ثانية).
To: الزمن الدوري المرجعي المستخدم لتحديد شكل الطيف يساوي 0.2 TS (ثانية).
TS: الزمن الدوري الحرج الذي يتغير فيه الطيف من كونه مستقلًا عن الزمن إلى كونه متناسبًا عكسيًا مع الزمن = SDS SD1/ (ثانية).
فيما يخص الأزمنة الدورية الأكبر من أو تساوي To والأقل من أو تساوي TS ، فإنه يجب أن يؤخذ معامل الاستجابة الزلزالي المرن كما يلي:

$$C_{sm} = S_{DS} \qquad (4-2)$$

فيما يخص الأزمنة الدورية الأكبر من TS الأكبر من أو تساوي To والأقل من أو تساوي TS، فإنه يجب أن يؤخذ معامل الاستجابة الزلزالي المرن كما يلي:

$$C_{sm} = S_{D1} / T_m \qquad (5-2)$$

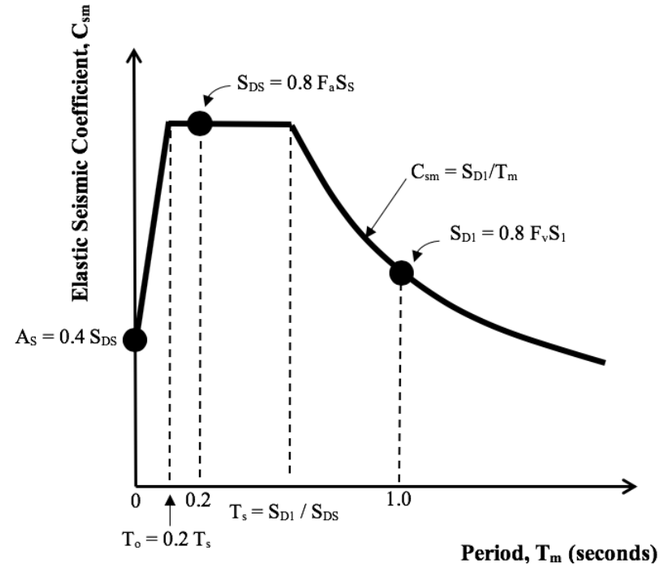
حيث:

$$S_{D1} = 0.8\,F_v\,S_1 \qquad (6-2)$$

حيث:
S1= معامل تسارع طيف الاستجابة الأفقي عند الزمن الدوري 1.0 ثانية في الصخر (الموقع من الصنف B).

4-5-2 التحليل من أجل أحمال الزلازل بطريقة السلوك المتعدد الطيفي (Multimode Spectral Method)

يجب اعتبار عدد كاف من أنماط الاهتزاز التي تناظر نسبة لا تقل عن 90٪ من الوزن الكلي الفعال من أجل التصميم الزلزالي في كل من الاتجاهين الطولي والعرضي للجسر .



شكل (2-4): طيف الاستجابة المتخامد التصميمي بالقيمة 5٪

الفصل الثالث
المنشآت الخرسانية

3- المنشآت الخرسانية

1-3 عام

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء الفصل الخامس بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.

2-3 خصائص المواد

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء الدليل الخاص بالمواصفات العامة لإنشاء الطرق ومنشآت الطرق.

3-3 متطلبات الديمومة (DURABILITY REQUIREMENTS)

1-3-3 الخرسانة الإنشائية

جدول رقم (3-1) يوضح الحد الأدنى لمقاومة الخرسانة للضغط للعناصر الإنشائية المختلفة لتحقيق متطلبات الديمومة في المملكة العربية السعودية:

جدول رقم (3-1): الحد الأدنى لمقاومة الخرسانة للضغط للعناصر الإنشائية المختلفة

العنصر الإنشائي	الحد الأدنى لمقاومة الضغط بعد 28 يوماً.	
	مقاومة المكعب	مقاومة الأسطوانة
الخرسانة لاحقة الشد المصبوبة في الموقع.	50 ن/مم^2	40 ن/مم^2
الخرسانة سابقة الإجهاد المسبقة الصب للمنشأ العلوي للجسر	55 ن/مم^2	45 ن/مم^2
الخرسانة المسلحة المصبوبة في الموقع للمنشأ العلوي للجسر والحواجز والقطع المسبقة الصنع	45 ن/مم^2	35 ن/مم^2
أعمدة الركائز والركائز الطرفية والحوائط والخوازيق المحفورة وهامات الخوازيق وبلاطات الاقتراب	45 ن/مم^2	35 ن/مم^2
الخرسانة غير المسلحة	25 ن/مم^2	20 ن/مم^2

2-3-3 حديد التسليح

1-2-3-3 الغطاء الخرسانى لحديد التسليح (التصنيف البيئي) (Environmental Classification)

يجب إضافة التصنيف البيئي للمنشأ العلوي والمنشأ السفلي للجسر إلى مخطط «الملاحظات العامة» في مخططات التعاقد وذلك طبقًا للتصنيفات التالية:

1. بيئة عدوانية بعض الشيء. (Slightly aggressive)
2. بيئة عدوانية بصورة معتدلة. (Moderately aggressive)
3. بيئة شديدة العدوانية. (Extremely aggressive)

بالنسبة للمنشأ السفلي فإنه يتم استكمال التصنيف البيئي باستخدام بيانات وصفية إضافية. وبعد التصنيف أضف بين القوسين

مصدر ومقدار معامل التصنيف البيئي الذى أدى إلى هذا التصنيف.
وكمثال لذلك، تم تصنيف المنشأ السفلي لجسر مقترَح كبيئة شديدة العدوانية لوجوده في تربة ذات أس هيدروجيني (pH) منخفض يبلغ 4.5 والمنشأ العلوي له كبيئة عدوانية بعض الشيء. فإن شكل مخطط الجسر يشمل:

– التصنيف البيئي

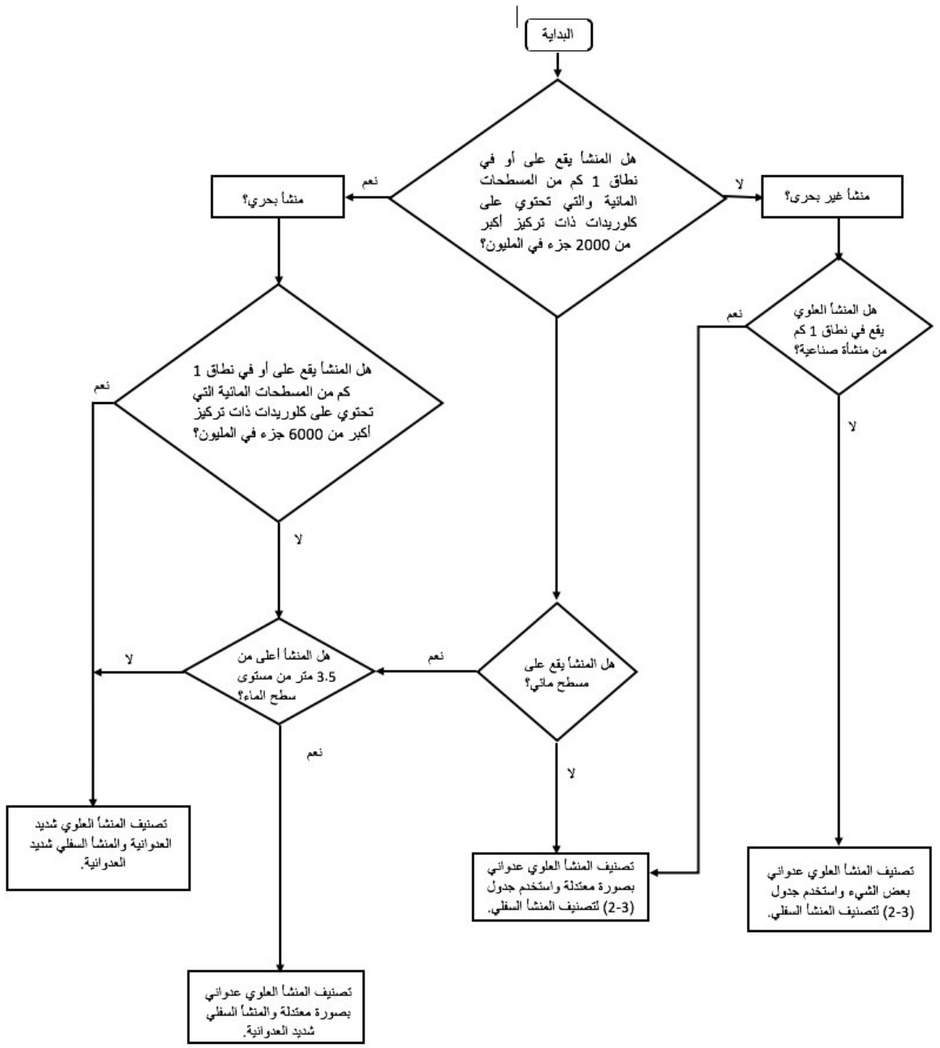
المنشأ السفلي: شديد العدوانية (رقم الأس الهيدروجيني للتربة = 4.5).

المنشأ العلوي: عدواني بعض الشيء.

ينبغي ألا يصنف المنشأ السفلي بحيث يكون أقل حدة من المنشأ العلوي.

معايير التصنيف (Classification Criteria):

يتم تصنيف المنشأ العلوي والمنشأ السفلي للجسر على أنهما «عدوانية بعض الشيء"، "عدوانية بصورة معتدلة" أو "شديدة العدوانية" طبقًا للمعايير الموضحة في شكل (3-1). ويعرف المنشأ العلوي على أنه جميع المكونات من أجهزة الاستناد (Bearings) وما يعلوها. وفي المقابل فإن جميع العناصر أسفل أجهزة الاستناد تصنف على أنها المنشأ السفلي.



شكل (3-1): معايير التصنيف البيئي للمنشآت

المنشآت البحرية (Marine Structures):

إن المنشآت الواقعة على أو في نطاق 1كم من المسطحات المائية التي تحتوي على كلوريدات ذات تركيز أكبر من 2000 جزء في المليون تعدُّ منشآت بحرية، أي منشآت أخرى لا تتفق وهذا الشرط تعدُّ منشآت غير بحرية. تحديد تصنيف المنشأ على أنه بحري أم لا يعتمد فقط على نتائج اختبار الكلوريدات.

يتم تصنيف منشآت المنشأ العلوي والسفلي للجسر طبقًا لما يلي:

1. المنشآت التي تقع على أو في نطاق 1كم من المسطحات المائية ذات تركيز كلوريدات أكبر من 6000 جزء في المليون، يكون تصنيف المنشأ العلوي والمنشأ السفلي لها «شديد العدوانية».
2. المنشآت التي تقع على المسطحات المائية ذات تركيز كلوريدات من 2000 إلى 6000 جزء في المليون، يصنف المنشأ السفلي لها على أنه «شديد العدوانية». المنشأ العلوي لهذه المنشآت الواقعة في نطاق مسافة 3.5 متر من مستوى سطح الماء المتوسط تُصنف على أنها «شديدة العدوانية»، والتي تقع على بعد أكبر 3.5 متر تصنف على أنها «عدوانية بصورة معتدلة».
3. المنشآت التي تقع في نطاق 1كم من المسطحات المائية ذات تركيز كلوريدات من 2000 إلى 6000 جزء في المليون، ولكنها لا تقع مباشرة على المسطح المائي يصنف المنشأ العلوي لها على أنه «عدوانية بصورة معتدلة». أما تصنيف المنشأ السفلي فيتبع معايير المنشآت غير البحرية كما هو موضح في جدول رقم (3-2).

المنشآت غير البحرية (Non-Marine Structures):

كل المنشآت التي لا تتفق مع المعايير السابقة تعدُّ منشآت غير بحرية.

1 - عناصر المنشأ السفلي (Sub-structure Elements):

استخدم جدول تصنيف المنشأ السفلي للمنشآت غير البحرية إذا كان المنشأ السفلي متصلاً بالماء أو التربة.

2 - عناصر المنشأ العلوي (Super-structure Elements):

أى منشأ علوي يقع في نطاق 1كم من أى منشأة تحرق الكربون، أو مصنع أسمدة أو أي من الصناعات المماثلة يُصنف على أنه «عدواني بصورة معتدلة». بالنسبة لباقي الحالات، يصنف على أنه «عدواني بعض الشيء".

جدول رقم (3-2): معايير التصنيف البيئي للمنشأ السفلي للجسور

التصنيف	الحالة البيئية	وحدة القياس	حديد التسليح		الخرسانة	
			الماء	التربة	الماء	التربة
شديدة العدوانية (إذا توافر أي من هذه الشروط)	pH		أقل من 6.0		أقل من 5.0	
	Cl	جزء في المليون	أكبر من 2000		أكبر من 2000	
	SO_4	جزء في المليون	لا تنطبق	أكبر من 1500	أكبر من 2000	
	المقاومة النوعية	أوم- سم	أقل من 1000		أقل من 500	
عدوانية بعض الشيء (إذا توافر أي من هذه الشروط)	pH		أكبر من 7.0		أكبر من 6.0	
	Cl	جزء في المليون	أقل من 500		أقل من 500	
	SO_4	جزء في المليون	لا تنطبق	أقل من 150	أقل من 1000	
	المقاومة النوعية	أوم-سم	أكبر من 5000		أكبر من 3000	
عدوانية بصورة معتدلة	يجب استخدام هذا التصنيف لجميع الأماكن التي لا تفي بمتطلبات أي من التصنيفين السابقين.					

pH=الأس الهيدروجيني

Cl= محتوى الكلوريدات

SO_4= محتوى الكبريتات

محتوى الكلوريدات:

لتحسين عملية اختيار المواد فإن المصمم و/أو مهندس المواد لديه اختيار الحصول على قلوب ممثلة (Representative cores) لتحديد معدل اختراق الكلوريدات (Chloride intrusion rate) لأى منشأ علوي في نطاق 1كم من أى مسطح مائي رئيس ذي تركيز كلوريدات يزيد على 6000 جزء في المليون. يأخذ مهندس المواد القلوب من المنشأ العلوي لجسر في المنطقة المجاورة للمنشأ العلوي للجسر المقترح. ويتم اختبار محتوى الكلوريدات ومعدل الاختراق للقلوب في معمل لاختبار المواد.

وبصفة عامة فإن المنشآت العلوية التي تقع في نطاق مرمى البصر أو 1كم من شاطئ البحر، تتعرض لمعدل اختراق كلوريدات زائد ويبلغ 0.027 كجم/م3/سنة عند عمق 50 مم داخل الخرسانة. ويتناقص معدل الاختراق بسرعة مع المسافة من المسطح المائي و/أو وجود حواجز تغير نمط الرياح مثل تضاريس مرتفعة أو أشجار أو مبانٍ.

بعد أخذ واختبار العينات الممثلة، استخدم جدول رقم (3-3) لإقامة ارتباط بين نتائج القلوب (معدل اختراق الكلوريدات بوحدة كجم/م3/سنة عند عمق 50 مم داخل الخرسانة) ودرجة التصنيف.

جدول رقم (3-3): العلاقة بين التصنيف البيئي ومعدل اختراق الكلوريدات

التصنيف	معدل اختراق الكلوريدات
شديدة العدوانية	أكبر من أو يساوي 0.027 كجم/م^3/سنة
عدوانية بصورة معتدلة	أقل من 0.027 كجم/م^3/سنة

يتم الرجوع للشكل (3-1) لتحديد التصنيف البيئي وجدول رقم (3-4) لتحديد متطلبات الغطاء الخرساني لكل من الحديد أو فولاذ سبق الإجهاد.

عندما تكون أسياخ التسليح المشكلة في اتصال مع العناصر المطمورة الأخرى (مثل قنوات فولاذ سبق الإجهاد اللاصق)، فإن قطر السيخ الفعلي شاملاً التشكلات يجب أن يؤخذ في الحسبان عند تحديد الأبعاد التصميمية للعناصر الخرسانية، وكذلك عند تطبيق سمك الغطاء الخرساني التصميمي من جدول رقم (3-4).

3-2-3-2 المسافة بين الأسياخ لكل الأعضاء الإنشائية.

يتم استخدام أكبر حجم للركام (الحصى) الخشن بما يعادل 20مم لتحديد أقل تباعد لأسياخ حديد التسليح بناءً على معايير بند 5-10-3-1-1 وبند 5-10-3-1-2 من مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) للأعضاء المصبوبة في الموقع والأعضاء سابقة الصب على التوالي. ويراعى التفاوت المعتاد المسموح به عند قطع وثني وتركيب الحديد. ويتم الرجوع إلى ACI-315 لتحديد قيم التفاوت المسموح بها.

جدول رقم (3-4): قيم الغطاء الخرساني الدنيا للعناصر الإنشائية للجسور تبعًا للتصنيف البيئي

	الغطاء الخرساني (مم)	
	S or M	E
عناصر المنشأ العلوي (المصبوبة في الموقع)		
كل الأسطح الخارجية (السطح العلوي مثلاً)	60	
كل الأسطح الداخلية (السطح العلوي مثلاً)	50	
عناصر المنشأ العلوي (سابقة الصب)		
الأسطح الداخلية والخارجية (كمرات صندوقية ذات القطع والأسطح الخارجية)	50	
الأسطح الخارجية للكمرات سابقة الإجهاد (فيما عدا السطح العلوي)	40	
عناصر المنشأ السفلي (المصبوبة في الموقع أو سابقة الصب)		
أسطح خارجية المصبوبة مباشرةً على التربة والأسطح في اتصال مع الماء	100	115
أسطح خارجية مصبوبة باستخدام شدات، ركائز وسطية والأسطح العلوية للقواعد دون اتصال مع الماء.	80	100
الأسطح الداخلية	75	
جزوع الكمرات	50	
المنشأ السفلي (سابقة الصب)	50	100
الخوازيق سابقة الإجهاد	75	
الخوازيق المحفورة	150	
الجدران الاستنادية (المصبوبة في الموقع أو سابقة الصب)	50	75
العبارات (المصبوبة في الموقع أو سابقة الصب)	50	75

S = عدوانية بعض الشيء (Slightly aggressive)

M = عدوانية بصورة معتدلة (Moderately aggressive)

E = شديدة العدوانية (Extremely aggressive)

4-3 حدود التشرخ (CRACK CONTROL)

بالنسبة لعوامل التحميل وتراكيب الأحمال فإنه يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 5-4-2-6 وبند 5-6-7 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.

- يفرض معامل التعرض ge = 0.75 (بند 5-6-7) لجميع اجزاء الجسر باستثناء الأجزاء المدفونة والجسور التي تقع في نطاق 1كم من المناطق الساحلية فيفرض معامل التعرض ge = 0.50.
- أى زيادة في الغطاء الخرساني عما هو محدد في البند السابق يمكن إهمالها في حسابات dc (سمك غطاء الخرسانة مقاس من غشاء الشد الأقصى إلى مركز تسليح الانحناء) hg (السماكة الكلية) المستخدمة في المعادلات 5-6-7-1 و5-6-7-2.
- بالإضافة إلى الاشتراطات الواردة في بند 5-6-7 فإنه يراعى أي اشتراطات إضافية خاصة بحدود التشرخ الحراري (Early thermal cracking) للخرسانة أثناء الصب.
- لزيادة التحكم في سمك الشروخ، فإنه يراعى استخدام أسياخ ذات أقطار صغيرة على مسافات تباعد قليلة بدلًا من أسياخ ذات أقطار كبيرة.

5-3 تفاصيل حديد التسليح

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 5-10 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.

طول التماسك (Development Length):

- عند حساب طول التماسك لأسياخ الأعمدة يتم استخدام المعادلات الخاصة بطول تماسك الشد (بدلًا من طول تماسك الضغط)؛ وذلك تحسبًا لقوى الشد التي قد تتعرض لها أسياخ العمود أثناء تعرضها لأحمال الزلازل.
- يمكن استخدام الخطافات القياسية (Standard hooks) ذات انحناء 90° و180° لتقليل طول تماسك الشد في حالة عدم توفر مسافة كافية لطول التماسك الرئيس، مع ملاحظة أن هذه الخطافات غير مؤثرة في حساب طول تماسك الضغط.

الوصلات (Splices):

يراعى أن تكون وصلات حديد التسليح للعناصر الإنشائية الرئيسة بالتناوب بحيث لا تزيد نسبة الحديد الموصول على 50٪.
يراعى ألا تقل المسافة بين وصلات التسليح عن 60 مرة قطر السيخ مقاسة بين منتصف الوصلات.
بالنسبة للأعمدة والخوازيق المحفورة يراعى عدم استخدام وصلات لحديد التسليح الرأسي والتسليح الحلزوني في المناطق المتوقع فيها مفاصل لدنة (Plastic hinges).

الأسياخ المحزومة (Bundled Bars):

- يراعى ألا يتم وصل كل أسياخ الحديد للحزمة الواحدة في المكان نفسه، بل يتم وصلها بالتناوب مع مراعاة عدم تداخل الوصلات.

6-3 الكمرات الخرسانية سابقة الصب، سابقة الإجهاد (PRECAST PRESTRESSED CONCRETE GIRDERS)

1-6-3 عام

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 5-9 وبند 5-12 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.

- الحد الأدنى لعدد الكمرات للسطح العلوي للجسر هو أربع كمرات وذلك لتحقيق مستوى كاف من التكرار (Redundancy).
- يتم تصميم الجسور المكونة من كمرات سابقة الصب وبلاطات سطح الجسر المصبوبة في الموقع، على أن تكون بسيطة الارتكاز تحت تأثير الحمل الذاتى (Self-weight) وسبق الإجهاد (Prestressing). بينما يتم التصميم على أنها مستمرة تحت تأثير الأحمال الدائمة الإضافية (Superimposed dead load) والأحمال الحية (Live load).

- الحد الأدنى لمقاومة الخرسانة في الضغط عند وقت النقل هو 28 ن/مم2 أو 60٪ من الحد الأدنى لمقاومة الخرسانة في الضغط أيهما أكبر.

2-6-3 أسلاك الجدائل غير المتماسكة (Debonded Strands)

يتم اتباع الشروط التالية في حالة جعل أسلاك الجدائل غير متماسكة مع الخرسانة عند نهايات الكمرات سابقة الصب، سابقة الإجهاد:

- الحد الأقصى لنسبة الجدائل غير المتماسكة هو 25٪ من العدد الكلي للجدائل. كما يجب ألا تزيد هذه النسبة على 40٪ من عدد الجدائل في الصف الواحد.
- الحد الأقصى لإنهاء الطول غير المتماسك للجدائل هو 40٪ من العدد الكلي للجدائل غير المتماسكة أو أربع جدائل بحد أقصى.
- يجب توزيع نمط الجدائل غير المتماسكة بحيث يكون على الأقل جديلة كاملة التماسك بين كل جديلتين غير متماسكتين.
- يجب أن يتم إنهاء التماسك للجدائل بصورة متماثلة حول المحور الرأسي للكمرة.
- جميع الجدائل الخارجية والواقعة في الصف السفلي يجب أن تكون كاملة التماسك.
- أقصى طول غير متماسك للجدائل هو 15٪ من الطول الكلي للكمرة، أدنى طول غير متماسك للجدائل هو نصف عمق الكمرة.

3-6-3 حدود التسليح الدنيا (Minimum Reinforcement)

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بند 5-3-6-3 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.

- بالنسبة للكمرات بسيطة الارتكاز لا داعي لتحقيق حدود التسليح الدنيا خلال طول محدد من طرف الكمرة كما يلي:
  - طول التماسك للجدائل.
  - مرتان ونصف عمق الكمرة مقاسًا من محور الركيزة

7-3 الجسور الخرسانية لاحقة الشد (POST-TENSIONED CONCRETE BRIDGES)

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء بنود 5-4-5 و 5-4-6 و 2-5-2-2 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.

- بالنسبة للجسور الخرسانية لاحقة الشد المنحنية في المستوى الأفقي (Curved post-tensioned bridges) التي يزيد نصف قطر الانحناء الداخلي لها على 250م، فإنها لا تحتاج إلى عوارض عرضية (Intermediate diaphragms). أما إذا كان نصف قطر الانحناء أقل من 250م ولكن أكبر من 135م، فإنه يلزم تزويدها بعوارض عرضية لا تزيد المسافة بينها على 25م. وفي حالة إذا كان نصف قطر الانحناء أقل من 135م فلا تزيد المسافة بين العوارض العرضية على 15م.
- عند حساب فواقد (ضياعات) سبق الإجهاد طويلة المدى (Long-term prestress losses) نتيجة الزحف (Creep) والانكماش (Shrinkage)، فإنه يتم فرض نسبة الرطوبة النسبية (60٪ Relative humidity).
- إذا زادت المسافة بين مراسي التثبيت (Anchorages) على 90م، فإنه يلزم شد الكابلات من الناحيتين.
- يجب ألا يقل الارتفاع الداخلي الخالص للجسور الخرسانية الصندوقية على 1.8م لأغراض الفحص والصيانة.
- يجب تزويد الجسور الخرسانية الصندوقية بفتحات وصول (Access openings) في البلاطة السفلية لا تزيد المسافة بينها على 60م. يجب ألا تقل أبعاد هذه الفتحات خلال العوارض العرضية عن 0.8م (العرض) ´ 1.2م (الارتفاع) أو لا يقل قطرها عن 0.9م.
- كما يجب تزويد الجسور الخرسانية الصندوقية بفتحات تهوية أو تصريف مياه في البلاطة السفلية بقطر لا يقل عن 50 مم ولا تزيد المسافة بينها على 15م.

8-3 الكمرات الصندوقية القطاعية (PRECAST SEGMENTAL BOX GIRDERS)

الجسور القطاعية بطبيعتها أكثر تعقيدًا في التصميم والبناء. فهى تتطلب تنسيق الجهود بين المصممين والرسامين، حتى تطوير خرائط مساقط أفقية متكاملة تعالج مسائل التصميم، وإعداد التفاصيل وإمكانية الإنشاء.

1-8-3 الوصول والصيانة (Access and Maintenance)

أثناء الدراسات الهندسية الأولية وأثناء تحديد شكل المنشأة يتم إعطاء أقصى اهتمام لإمكانية الوصول والأمان لفاحصي الجسور وأفراد الصيانة.

1-1-8-3 عمق قطاع الجسر

لا يقل العمق الصافي الداخلي للكمرة الصندوقية عن 1,8م لأجل أعمال الصيانة والفحص.

2-1-8-3 التجهيزات الكهربائية

يتم وضع أعمال الإضاءة الداخلية والمخارج الكهربائية في الأماكن التالية:

- جميع فتحات الوصول الداخلية والخارجية.
- على جانبي العوارض العرضية حيثما تواجدت كمرات رئيسة مستمرة.
- على الوجه الداخلي للكمرات العرضية حيثما وجدت كمرات رئيسة غير مستمرة (مثل الأطراف أو عند فواصل التمدد).
- ما بين الأماكن المذكورة آنفًا وعلى مسافات متساوية تقريبًا لا تزيد على 15 مترًا.
- في حالة تطابق أي من الأماكن السابقة فإنه يكتفى بعنصر إضاءة واحد ومخرج كهربائي واحد.
- يتم وضع الإضاءة الداخلية للكمرة الصندوقية بطول محور الجسر إذا كان عمق قطاع الجسر الصافي يسمح بذلك.
- يتم وضح المفاتيح الكهربائية عند نهايتي كل فتحة وعند كل فتحة وصول.

3-1-8-3 الوصول (ytilibisseccA)

فتحات الوصول في البلاطة السفلية (Access Openings in Bottom Flanges):

يتم تصميم الجسور ذات القطاعات الصندوقية بفتحات وصول (دخول / خروج) على مسافات لا تزيد على 180 مترًا في البلاطة السفلية. كما يجب أن يكون تباعد هذه الفتحات في اتجاه الجسر بحيث تكون المسافة من أي نقطة على الجسر إلى أقرب فتحة 90 مترًا أو أقل. الحد الأدنى لعدد هذه الفتحات لكل جسر هو فتحتان. يراعى وضع فتحات وصول إضافية بطول الجسر لاستيفاء متطلبات التباعد الأقصى.

يجب تفادي وضع فتحات الوصول فوق مسارب المرور لتفادي الحاجة لعمل أي تحويلات مرورية، أو فوق طابق ترابي مائل، أو فوق المجاري المائية أو في أي مكان آخر ذي تأثير سلبي على أمان فاحصي الجسور أو المارّة من الجمهور.

الحد الأدنى لأبعاد فتحة الوصول هو 0.85م ´ 1,10م أو قطر0.95م. يجب الإشارة على مخططات المساقط الأفقية إلى وجوب بقاء هذه الفتحات بلا عائق، وألا تستخدم لأعمال المرافق والملحقات أو أنابيب الصرف أو القنوات أو أي ملحقات أخرى. في حالة الاحتياج إلى أي من هذه البنود فيجب عمل فتحات إضافية لها.

يجب أن يؤخذ تأثير فتحات الوصول في التحليل الإنشائي للجسور الصندوقية. وبصفة عامة ينبغي عدم عمل أي فتحات في البلاطة السفلية للكمرة الصندوقية التي تكون البلاطة السفلية لها تحت تأثير إجهاد ضغط.

فتحات الوصول في العوارض العرضية الداخلية (Access Openings in Interior Diaphragms):

يجب عمل فتحات وصول في جميع العوارض العرضية الداخلية. في حالة عدم انطباق الحد السفلي لفتحة الوصول في العارضة

العرضية مع السطح العلوي للبلاطة السفلية، يجب عمل منحدرات خرسانية (Concrete ramps) لتسهيل حركة المعدات.

الحد الأدنى لأبعاد فتحة الوصول هو 0.85م ´ 1.10م أو قطر 0.95م. يجب الإشارة على مخططات المساقط الأفقية إلى وجوب بقاء هذه الفتحات بلا عائق، وألا تستخدم لأعمال المرافق والملحقات أو أنابيب الصرف أو القنوات أو أي مرافق أخرى. في حالة الاحتياج إلى أي من هذه البنود فيجب عمل فتحات إضافية لها. في الأماكن الأخرى من الكمرة الصندوقية يجب عمل مغلف وصول مستمر لأعمال الفحص والصيانة (Continuous maintenance / Inspection access envelop) ذي أبعاد لا تقل عن 1.8م (ارتفاع) ´ 0.6م (عرض) بطول الكمرة الصندوقية، ويتم قياس الارتفاع الخالص للمغلف من قمة البلاطة السفلية، مع مراعاة أن الارتفاع الخالص للمغلف يجب أن يأخذ في الحسبان كابلات سبق الإجهاد، مناطق الإرساء (Anchorages)، الأغلفة (Blisters)، سروج الانحراف (Deviation saddles)...إلخ.

4-1-8-3 الفتحات الخارجية الأخرى

يتم تصميم الكمرات الصندوقية بفتحات تهوية أو صرف في البلاطة السفلية ذات قطر أدنى 50مم على جانبي الكمرة، وتباعد أدنى 15 مترًا أو حسب الاحتياج لعمل صرف مضبوط. يتم وضع مصارف إضافية عند النقط المنخفضة مقابل الحواجز الداخلية، واختيار وضع المصارف لتلائم ميول الجسر.

يجب وضع أنابيب صرف لتمنع تجمع الماء (بما فيه الماء المتكثف) عند مكونات سبق الإجهاد اللاحق، وأوجه العوارض العرضية، والأغلفة، والأعصاب وأي إعاقة أخرى كما يجب إظهار هذه التفاصيل في مخططات التعاقد، والتي يجب أن تشتمل على الآتي:

- استخدام ماسورة صرف بلاستيكية (بى في سي مثبط للأشعة فوق البنفسجية) دائمة ذات قطر 50مم مع مساواة نهاية الماسورة مع السطح العلوي لبلاطة الجسر.
- تجويف للتنقيط ويكون ذا أبعاد 13مم ´ 13مم حول قيعان قطع المواسير بعد تثبيتها.
- مواسير صرف عند كل النقط المنخفضة عند الحواجز الداخلية أو الأغلفة... إلخ.
- وجوب وضع مصفاة 6مم على كل الفتحات الخارجية التي بلا غطاء. ويشمل هذا الثقوب في الأعصاب التي تمر خلالها مواسير الصرف، وثقوب التهوية، وثقوب الصرف... إلخ.

2-8-3 سبق الإجهاد

1-2-8-3 بلاطة ظهر الجسر (balS kceD)

يجب استخدام كابلات سبق إجهاد لاحق عرضي في بلاطة ظهر الجسر.

عند استخدام كابلات سبق إجهاد لاحق مثنية (Draped) في بلاطة ظهر الجسر يجب مراعاة المكان النهائي لمركز ثقل كابلات فولاذ سبق الإجهاد في الأغلفة.

يجب تخفيض اللامركزية الحرجة (Critical eccentricity)في الأعصاب وعند مركز القطاع الصندوقي بمقدار 6مم من القيمة النظرية لتعويض تفاوتات الإنشاء.

3-8-3 مناطق إرساء سبق الإجهاد اللاحق (segarohcnA gninoisnet-tsoP)

في حالة الحاجة إلى عمل مناطق لإرساء سبق الإجهاد اللاحق المؤقتة أو الدائمة في البلاطة العلوية أو السفلية للكمرة الصندوقية، فإنه لا بد من تصميم وعمل تفاصيل الأغلفة الداخلية. كما أنه غير مسموح باستخدام البلوكات الخارجية (Block-outs) التي تمتد حتى الأسطح الداخلية أو الخارجية للبلاطات.

في حالة استخدام نظام إنشاء القطع المصبوبة في الموقع، يتم استخدام حديد تسليح طولي عادي مستمر خلال الوصلات لربط القطع.

يجب أن يتم التصميم وإعداد التفاصيل بحيث أن كل سبق الإجهاد اللاحق المستقبلي يكون باستخدام كابلات خارجية (قضبان Bars أو جدائلStrands). يكون تصميم سبق الإجهاد اللاحق المستقبلي بحيث يمكن تقوية أى فتحة (span) بشكل مستقل عن الفتحات المجاورة. يجب إضافة مكان القناة/المَرسىَ (Duct/Anchorage location) إلى العوارض العرضية لكل كابل مستقبلي عند فواصل التمدد، وإضافة مكانين للقناة/المَرسيَ إلى العوارض العرضية عند القطعة الداخلية فوق الركيزة الداخلية.

إعداد تفاصيل مراسي الأغلفة بحيث تنتهي الكابلات على بعد لا يقل عن 0.3م من الفاصل بين قطعتين متتاليتين.

إعداد تفاصيل الأغلفة الداخلية بحيث تبعد مسافة لا تقل عن 0.3م من الفاصل بين قطعتين متتاليتين. كما يجب عمل تجويف على شكل V حول أغلفة البلاطة العلوية لعزل الغلاف عن أي مياه.

غير مسموح بعمل أي أعصاب عرضية في البلاطة السفلية. كما يتم تصميم العوارض العرضية بكامل الارتفاع لتوجيه قوى الانحراف (Deviation forces) مباشرة للجذع وللبلاطة.

ممنوع عمل أي تجاويف في الأركان العلوية للقطعة فوق الركيزة (Pier segment) عند فاصل الإغلاق (Closure joint). يجب أن يستمر القطاع النمطي حتى وجه العارضة العرضية. يتم اختيار أماكن / مراسى الكابلات بحيث تسمح بوضع مضخة الشد (Jack).

4-8-3 متطلبات تصميم الجسور الكابولية ذات منضدة الركيزة الثابتة (Cantilever Bridges with Fixed Pier Tables)

يتم تصميم المنشآت العلوية والمنشآت السفلية لتتحمل تفاوت في الإنشاء يعادل (L/1000) حيث L هى طول الكابولي من مركز الركيزة حتى طرف الكابولي، وذلك للمنشآت العلوية سابقة الصب. ويتم حساب القيم القصوى والدنيا للإجهادات طبقًا لأسوأ حالات التحميل. كما يجب التحقق من حالات حدود التشغيل باعتبار تأثيرات إجهادات التركيب المحبوسة (Locked-in erection stresses) والتي يرمز لها "EL" كما بالمعادلة 3-4-1-2 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS).

يجب مراجعة إجهادات أحمال التشغيل للركيزة ووصلات الركيزة مع المنشأ العلوي متضمنة حدود التشرخ للجسر أثناء التركيب وللوضع النهائي.

5-8-3 الزحف والانكماش

يتم حساب انفعالات وتأثيرات الزحف والانكماش باستخدام رطوبة نسبية 60٪.

6-8-3 بيانات إنشاء منحنيات ارتفاع وتحدب الكمرات الصندوقية (noitcurtsnoC sredriG xoB rof rebmaC dna noitavelE ataD)

يتم حساب بيانات إنشاء منحنيات الارتفاع بناءً على التصميم الهندسي الأفقي والرأسي لأعمال الطرق، ويتم حساب منحنيات التحدب بناءً على أحمال التركيب المستخدمة في التصميم وتتابع الإنشاء المفترض.

يتم توقيع وإظهار نقط بيانات الإنشاء ثلاثية الأبعاد عند محور الكمرة الصندوقية وفوق كل جذع.

يتم حساب ووضع بيانات منحنى التحدب عند محور الكمرة الصندوقية، مع ملاحظة أن بيانات منحنى التحدب تكون في اتجاه معاكس لاتجاه الترخيم.

أظهرت الخبرة أنه يمكن الحصول على دقة أعلى لشكل منحنى الصب باستخدام خصائص القطاع المركّب، واعتبار قنوات الكابلات محقونة (Grouted tendons).

الفصل الرابع
الأساسات

4- الأساسات

4-1 عام

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء الفصل العاشر في مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)

4-2 الأساسات الضحلة (SHALLOW FOUNDATIONS)

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء الفصل 10-6 في مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والتعليقات التالية.

تطبق اشتراطات هذه الفقرة على تصميم الأساسات المنفردة (Spread footings) والأساسات المشتركة (Combined footings) والأساسات الشرائحية المستمرة(Strip footings) . ويجب أن تراعى الاشتراطات التالية في تصميم هذا النوع من الأساسات:

- **الزيادة الناتجة عن الأحمال الديناميكية:** بصفة عامة لا تؤخذ الزيادة الناتجة عن الأحمال الديناميكية في تصميم الأساسات إلا إذا تم تنفيذ جزء كبير منها أعلى مستوى سطح الأرض.
- **السماكة:** يؤخذ الحد الأدنى لسماكة الأساس 600مم، ويستثنى من ذلك أساسات الجدران الاستنادية. كما يفضل زيادة سماكة الأساس بدلًا من استخدام تسليح خاص لمقاومة قوى القص.
- **عمق سطح الارتكاز (مستوى التأسيس):** يجب أن يكون مستوى السطح العلوي للأساسات الشريطية تحت العمق الأعلى المتوقع للجرف (scour) بما لا يقل عن 300مم. كما يجب اختيار عمق التأسيس بحيث لا يقل سمك غطاء التربة فوق الأساس الشريطي عن 600مم.
- **مقاومة الانزلاق:** يراعى بقدر الإمكان عدم اللجوء لاستخدام مفاتيح لتوليد قوى سلبية للتربة لمقاومة الانزلاق. وفي حالة اللجوء إلى ذلك يجب الرجوع إلى المهندس الجيوتقني المختص.
- **الهبوط المتفاوت(Differential settlement) :** في حالة وجود هبوط متفاوت بين مجموعة الأعمدة التي تنتمي لركيزة وسطية معينة فإنه يراعى تأسيس هذه الأعمدة على أساس مشترك أو استخدام أساسات عميقة.

4-3 الأساسات العميقة (DEEP FOUNDATIONS)

تشمل اشتراطات هذه الفقرة تصميم الأساسات العميقة بطريقة الخوازيق المحفورة والخوازيق المدقوقة بالإضافة إلى هامات الخوازيق.

4-3-1 الخوازيق المحفورة (Drilled Piles)

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء البند 10-8 في مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والتعليقات التالية. يعدُّ هذا النوع من الخوازيق هو الأكثر شيوعًا ويستخدم عادةً لمقاومة الأحمال الجانبية الكبيرة. وتتراوح أقطار الخوازيق المحفورة من 900 إلى 1500مم. وفي حالة العمود المرتكز على خازوق واحد (Monopile) يجب ألا يقل الفرق بين قطر الخازوق وقطر العمود عن 500مم.

تفاصيل التصميم:

- **التغليف (Casing):** يراعى استخدام تغليف لسند التربة أثناء حفر الخازوق وخاصة في خلال نطاق تغير منسوب المياه الجوفية. إذا كان التغليف دائمًا يجب عدم اعتباره في حسابات المقاومة الإنشائية، ولكن يجب اعتباره في تقدير قيمة الجساءة الإنشائية لأساسات المنشأ تحت تأثير أحمال الزلازل.
- **المسافة الطرفية والتباعد بين الخوازيق:** يجب ألا تزيد المسافة الطرفية بين حافة الخازوق والحد الجانبي لهامة الخازوق على 250مم. كما يجب ألا يزيد التباعد بين الخوازيق على أربع مرات قطر الخازوق.

- **التسليح:** يجب ألا تقل نسبة حديد التسليح الطولي للخازوق عن 1٪ من المساحة الكلية لقطاع الخازوق. كما يجب أن يستمر التسليح الطولي بكامل طول الخازوق ويمتد داخل هامة الخازوق بمسافة لا تقل عن طول التماسك لأسياخ التسليح. ويراعى زيادة التباعد بين الكانات/الأساور(Stirrups/Lateral ties) بقدر الإمكان لتسهيل عملية صب الخرسانة.

2-3-4 الخوازيق المدقوقة (Driven Piles)

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء البند 10-7 في مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والتعليقات التالية.

تفاصيل التصميم:

- **تسليح الأجزاء الطرفية من الخازوق:** في حالة وجود طبقات شديدة التماسك من التربة يتم تسليح الأجزاء الطرفية من الخازوق لتقليل الأضرار أثناء عملية التنفيذ. وفي حالة وجود تربة صخرية يتم تزويد طرف الخازوق بأسنان صلبة مصممة خصيصًا لهذا النوع من التربة.
- **المسافة الطرفية والتباعد بين الخوازيق:** يجب ألا تزيد المسافة الطرفية بين حافة الخازوق والحد الجانبي لهامة الخازوق على 250مم. كما يجب ألا يزيد التباعد بين الخوازيق على مترين أو مرتين ونصف قطر الخازوق.
- **الخوازيق المائلة (Battered piles):** يجب تفادي استخدام هذا النوع من الخوازيق بقدر الإمكان. وفي حالة استخدامها لمقاومة القوى الجانبية يجب ألا تزيد زاوية الميل على 1 أفقي : 3 رأسي.

3-3-4 هامات الخوازيق (Pile Caps)

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء البندين 10-7 و10-8 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والتعليقات التالية.

- **الزيادة الناتجة عن الأحمال الديناميكية:** بصفة عامة لا تؤخذ الزيادة الناتجة عن الأحمال الديناميكية في تصميم الأساسات إلا إذا تم تنفيذ جزء كبير منها أعلى مستوى سطح الأرض.
- **السماكة:** يؤخذ الحد الأدنى للسماكة 600مم، ويفضل زيادة سماكة هامات الخوازيق بدلًا من استخدام تسليح خاص لمقاومة قوى القص.
- **حديد التسليح:** بالإضافة إلى متطلبات الحرارة والانكماش يراعى استخدام حديد تسليح علوي لمقاومة عزوم الانحناء السالب الناتج عن أحمال الزلازل.
- **خرسانة النظافة (Blinding):** يراعى أن تمتد الخوازيق بما يعادل سمك طبقة خرسانة النظافة بالإضافة إلى 100مم داخل هامة الخوازيق، ثم يتم وضع شبكة التسليح السفلية مباشرة.

الفصل الخامس
الركائز الطرفية والوسطية (Abutments and Piers)

5- الركائز الطرفية والوسطية (Abutments and Piers)

1-5 عام

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء الفصل الحادي عشر من مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والتعليقات التالية.

2-5 الركائز الطرفية وجدران الأجنحة (ABUTMENTS AND WING WALLS)

يتم تصنيف الركائز الطرفية جاسئة أو مرنة تبعًا لنوع وطريقة اتصال الركيزة بالأساسات، وليس تبعًا لاتصال كمرات وعوارض المنشأ العلوي للجسر بأجزاء المنشأ السفلي أي بأجزاء الركيزة.

عرض جلسة الاستناد (Seat width): غالبًا ما يُحدد عرض جلسة الاستناد للركيزة الطرفية قدرته على استيعاب اشتراطات الحركة الزلزالية التصميمية.

جدران أجنحة الركائز الطرفية (Wing walls): يؤخذ أدنى سمك لجدران أجنحة الركائز الطرفية بقيمة 300مم، وتصمم جدران الأجنحة لتتحمل فقط قوى الضغط الجانبي للتربة مع أخذ تأثير زيادة هذا الضغط الجانبي نتيجة للتأثيرات الزلزالية في الحسبان.

فواصل التنفيذ (Construction joints): يراعى عمل فاصل تنفيذ أفقي بين أعلى سطح جلسة الاستناد وأسفل الجدار الخلفي (Back wall) للركيزة الطرفية، وفاصل أفقي آخر في جدران الأجنحة عند مستوى السطح العلوي لقاعدة الاستناد للركيزة الطرفية.

كما يتم توصيف فواصل تنفيذ رأسية تبعًا لاعتبارات التنفيذ المرحلي، وحينئذ يراعى وضع الأسياخ الرأسية لحديد التسليح على مسافة لا تقل عن 75مم من مكان فاصل التنفيذ الرأسي.

بلاطات الاقتراب (Approach slabs): عند تصميم بلاطات الاقتراب للجسور يتم فرض ارتكازها عند طرفها الملاصق للجسرعلى الركيزة الطرفية، في حين يمّثل ارتكازها من الناحية الأخرى في هيئة مجموعة من الزنبركات تمثل خصائص التربة أسفلها، وتمتد هذه الزنبركات على كامل نصف طول بلاطة الاقتراب. كما يتم اعتبار نصف قيمة وزن بلاطة الاقتراب كحمل ميت يؤثر مباشرةً في الركيزة الطرفية ويوضع في الحسبان عند تصميمها.

معلومات جيوتقنية يجب توافرها: عند تصميم الركائز الطرفية للجسور أو أي منشآت تابعة ساندة للتربة يقوم المهندس الجيوتقني بتوفير المعلومات الآتية لمهندس تصميم الجسور:

- معاملات الضغط الجانبي للتربة (ka , ko , kp) وتقدير الحركة اللازمة لتفعيل كل من ضغط التربة الجانبي الفعال (Active earth pressure) والسلبي (Passive) وكذا تحديد معاملات الأمان.
- وزن وحدة حجوم تربة الردم.
- معامل الاحتكاك المسموح بين سطح الخرسانة المصبوبة بالموقع والتربة الملاصقة.
- قدرة تحمل التربة المسموح.
- الهبوط المتوقع.
- متطلبات التحكم في تصريف المياه خلف الجدران الساندة للتربة.

3-5 الركائز الوسطية (PIERS)

يراعى تصميم أعمدة الركائز الوسطية لتحمل كامل تأثيرات قوى الزلازل في الاتجاه الطولي للجسر وذلك بفرض انهيار كامل للجدران الخلفية للركائز الطرفية (Abutments' back walls).

كما يراعى عمل فاصل طولي مفتوح (Longitudinal open joint) في المنشأ العلوي للجسر إذا تبين تحكم تأثير التغير في درجات الحرارة في الاتجاه العرضي للجسر في تصميم أعمدة الركائز الوسطية.

الكمرة العلوية (Pier cap): يراعى تنفيذ الكمرة العلوية للركيزة الوسطية بعرض أكبر من عرض العمود أسفلها؛ وذلك للحد من مشاكل تداخل أسياخ تسليح كل من العمود والكمرة العلوية، ومن المعروف أنه في أغلب الأحيان يحدد عرض الكمرة العلوية

لتستوعب المتطلبات الزلزالية التصميمية لمسافة الاستناد الآمنة للكمرات المرتكزة عليها.

كما يراعى كلما أمكن ذلك وجود كوابيل طرفية قصيرة نسبيًا في الاتجاه الطولي للكمرة العلوية للركيزة الوسطية؛ بهدف تعادل قيم عزوم الانحناء السالبة والموجبة على طول الكمرة العلوية بقدر الإمكان للحصول على تصميم فعال واقتصادي.

يكون أدني أرتفاع للقواعد أسفل أجهزة الاستناد (Pedestals under bearings) والواقعة أعلا الكمرة العلوية للركائز وغير المصبوبة ميليثيًا 100مم، وفي جميع الحالات يجب عدم استخدام قواعد أجهزة الاستناد ذات أرتفاع يزيد على 375مم. وفي حالة الاحتياج لارتفاعات أعلى للقواعد أسفل أجهزة الاستناد، فإنه يلزم استخدام كمرات علوية مائلة في الاتجاه العرضي؛ وذلك لتحجيم ارتفاعات هذه القواعد.

كما يؤخذ بصفة عامة عرض الكمرة العلوية للركائز الوسطية أكبر بمقدار 150مم على الأقل من أكبر بعد لقطاع العمود أسفلها .

العوارض العرضية (Diaphragms): في حالة الركائز الوسطية المتصلة إنشائيًا (Integral) بالمنشأ العلوي للجسر، يفضل تصميم العوارض العرضية أعلى الركائز الوسطية بعرض 10٪ من طول فتحة الجسر أو ضعف عمق المنشأ العلوي للجسر، كما يفضل تصميم العوارض العرضية أعلى الركائز الطرفية بعرض 5٪ من طول فتحة الجسر.

الركائز الوسطية الجدارية (Wall piers): عند استخدام الركائز الوسطية الجدارية يلزم اعتبار قطاع مصمت للجدار على كامل الارتفاع بسمك أدنى مقداره 600مم قابل للزيادة أعلى الركيزة لاستيعاب مسافة استناد كافية إذا تطلب الأمر ذلك.

الأعمدة أعلى الخوازيق المفردة (Monopile piers): في حالة الأعمدة أعلى الخوازيق المحفورة المفردة يستخدم خازوق بقطر أكبر من العمود أعلاه لإجبار تكون المفصلة اللدنة (Plastic hinge) في القطاع السفلي للعمود أعلى الخازوق، وبذلك تتم حماية الخازوق من حدوث أي تأثيرات به تتعدى حدود المرونة. وفي هذه الحالات عادة ما يؤخذ قطر قطاع الخازوق أكبر من قطر قطاع العمود بقيمة 500مم. ولكن يجب مراعاة أن تكون أقطار كل من العمود والخازوق أسفله متوافقة لتستوعب تراكب (Overlapping) أقفاص حديد التسليح لكليهما دون تعارض، بالإضافة إلى تحقيق متطلبات الغطاء الخرساني الصافي (Clear cover) في كل منهما.

تسليح الركائز الوسطية: فيما يخص التسليح الطولي لأعمدة الركائز الوسطية فإنه يجب مراعاة عدم عمل أي وصلات تداخل (Splices) في مناطق المفصلات اللدنة، كما يجب توفر مسافة لا تقل عن 600مم بشكل متناوب (Staggered) بين وصلات التداخل المتجاورة لحديد التسليح الطولي، مع ضرورة إظهار أماكن هذه الوصلات بوضوح في المخططات.

فواصل التنفيذ (Construction joints): يجب عمل فواصل تنفيذ أفقية عند أعلى وأسفل قطاع أعمدة الركائز الوسطية، وفي حالات زيادة ارتفاع العمود عن 8م يجب توصيف فواصل تنفيذ بشكل يراعي تجنب صبات خرسانة بارتفاع يزيد على 8م، مع مراعاة عدم وجود أي فاصل تنفيذ على ارتفاع يقل عن 300مم مقاس من سطح أي مياه محيطة يحتمل وجودها في الموقع أثناء التنفيذ.

وفي حالة الركائز الجدارية يفضل تحديد أقصى مسافة من دون عمل فاصل تنفيذ رأسي بحيث لا تزيد على 9م.

كما يفضل تجنب فواصل التنفيذ في الركائز الوسطية في المناطق المعرضة لتأثيرات ظاهرة المد والجزر.

أعمدة الركائز ذات القطاعات المفرغة (Hollow section piers): في حالة أعمدة الركائز ذات القطاعات المفرغة والمجاورة لطرق مرورية فإنه يجب ملء كامل الفراغ الداخلي بالخرسانة حتى ارتفاع 5م مقاسًا من سطح الطريق النهائي، وذلك حتى في ظل وجود حواجز حماية لأعمدة الركيزة.

وفي حالة الركائز القائمة في المجاري المائية التي تصمم لتحمل صدمات السفن، فيجب ضمان تصميم أعمدتها باستخدام قطاع مصمت من الخرسانة المسلحة في الارتفاع الواقع ما بين خمسة أمتار فوق أعلى منسوب متوسط (Mean High Water Level) أو أعلى منسوب عادي (Normal High Water Level) لسطح الماء، و600مم أسفل أدنى منسوب متوسط (Mean Low Water Level) أو أدنى منسوب عادي (Normal Low Water Level) لسطح الماء.

الفصل السادس
الفواصل (Expansion Joints)

6- الفواصل (Expansion Joints)

6-1 عام

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء البندين 14-4 و 14-5 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والتعليقات التالية.

6-2 متطلبات التصميم

يراعى بقدر الإمكان تخفيض أعداد الفواصل على طول سطح الجسر، ولكن دون إخلال بالسلامة الإنشائية وذلك لمشاكلها المحتملة بما في ذلك متطلبات الصيانة أثناء عمر المنشأ التصميمي.

يراعى دقة تحديد قيمة طول الجسر القابلة لحركة التمدد والانكماش وهي تقاس من النقطة الساكنة على سطح الجسر (أي النقطة ذات حركة تساوي صفرًا)، والتي يتحكم في تحديد مكانها الجساءة في الاتجاه الطولي للأعضاء الإنشائية للمنشأ السفلي للجسر، بالإضافة إلى أماكن أجهزة الاستناد المانعة للحركة الطولية.

يتم الرجوع إلى البند 2-4-2 لتحديد المدى التصميمي المناسب لتغير درجات الحرارة المنتظمة. كما يراعى إضافة تأثير الحركة الناتجة عن التأثيرات طويلة الأمد كالزحف والانكماش وذلك عند حساب الحركة التصميمية الكلية عند الفواصل للجسور الخرسانية سابقة الإجهاد. وعند حساب الحركة الكلية التصميمية للفاصل في اتجاه تباعد جانبية (أي اتجاه فتح / اتساع الفاصل) يجب تحديد دقيق لقيم تأثيرات الزحف والانكماش والتغير في درجات الحرارة المنتظمة. ويفضل حساب قيم تأثيرات الزحف والانكماش – وبخاصة لجسور الكمرات الصندوقية – المناظرة للفترة من زمن تركيب فاصل التمدد وحتي مرور 4 آلاف يوم. وبهدف تحقيق أكبر حالة فتح/ اتساع للفاصل (أي أكبر تباعد بين سطحي الجسر المتلاصقين على جانبي الفاصل)، يجب ضبط الفاصل عند تركيبه ليكون في حالة أقصى انضغاط مسبق متاح، وتتم حسابات سبق الانضغاط لفاصل التمدد بناءً على درجة الحرارة المحيطة أثناء تركيب الفاصل؛ وذلك لضمان بقائه في حالة انضغاط مسبق لكامل مدى التغير التصميمي في درجات الحرارة المنتظمة، وهو المناظر للفترة من زمن التركيب وحتى مضي 4 آلاف يوم.

عند التعامل مع فواصل سطح الجسور ذات زاوية انحراف في المستوى الأفقي يجب مراعاة فرق الحركة نتيجة التمدد والانكماش بين الأركان عند الزوايا الحادة، مقارنة بحركة الأركان عند الزوايا المنفرجة، وذلك للفواصل المتوازية ذات الميل الواضح في المستوى الأفقي، وهي الواقعة بين سطحي جسرين منحرفين متجاورين، حيث تكون الحركة عند الزوايا الحادة أكبر من مثيلتها عند الزوايا المنفرجة، ما قد يؤدي إلى زيادة تشوه وانحراف الفاصل. ويجب تحجيم هذا الانحراف / التشوه بحيث لا يزيد على 20٪ من حركة الفاصل التصميمية. كما يفضل توفير ألواح تغطية للفواصل عند مناطق الأرصفة.

ويلزم دقة تحديد قيمة فجوة الفاصل (Expansion joint gap) عند درجة حرارة التركيب المتوائمة مع درجات الحرارة العليا والدنيا المتوقعة عند موقع الجسر، كما يجب اعتبار قيمة التقاصر المرن نتيجة سبق الإجهاد لقطاعات أسطح الجسور المصبوبة بالموقع، وذلك عند تحديد قيمة فجوة الفاصل.

كما يراعى عدم استخدام فجوة فاصل بعرض أقل من 30مم لأي جسر، وهي المسافة العمودية بين جانبي الفاصل عند مستوى سطح الطريق.

جدول رقم (6-1): إرشادات اختيار نوع فاصل التمدد

الحركة الكلية عند الفاصل، أي كامل المدى (Opening + Closing) الحركة المعنية أحادية الاتجاه فقط (مم)	نوع الفاصل
أقل من أو تساوي 125	فواصل التكتيم الشريحي
أكبر من 125	فواصل التمدد الخلوية
أكبر من 125	فواصل التمدد الفولاذية
100	فواصل الحشوات المضغوطة
أقل من أو تساوي 50	فاصل الحشوات الأسفلتية

3-6 فاصل الحشوات الأسفلتية (ASPHALTIC PLUG JOINTS)

يتم استخدام هذا النوع الشائع من الفواصل حتي قيمة حركة كلية (أي مدى كلي للحركة في الاتجاهين المعاكسين) لا تزيد على 50مم. ويتميز هذا النوع من الفواصل بسهولة تركيبه، وقلة احتياجه للصيانة، وكفاءة حركة المرور أعلاه، بالإضافة إلى عدم احتياجه لأي وسيلة تثبيت ميكانيكية. ولكن من عيوبه الأكثر شيوعًا احتمالية تعرضه للتلف والتشرخ العميق تحت تأثير مرور الأحمال الثقيلة والحركات الدورانية أثناء سير المركبات، وذلك في الأجواء الحارة.

4-6 فواصل الحشوات المضغوطة (CLOSED-CELL COMPRESSION SEAL)

يتم تحديد مدى الحركة الأقصى المتاح لهذا النوع من الفواصل من خلال المُصنع. وفي حالة استخدام مقاسات عريضة من هذا النوع فمن المفضل استخدام لوح تغطية لحماية الحشوة المضغوطة.

5-6 فواصل التكتيم الشريحي (LAES PIRTS)

تعد من أكفأ أنواع فواصل التمدد للجسور المعرضة لمدى حركة تصميمي كلي أقل من أو يساوي 125مم، ويفضل دائمًا حمايتها باستخدام لوح تغطية من الصلب. ويعد هذا النوع من الفواصل غير منفذ للماء إذا ما تم تركيبه بعناية. ويتميز هذا النوع بطول عمره في أجواء الاستخدام الطبيعية، ولكن ما يعيبه صعوبة تغييره، كما يلزم مراعاة تجنب وجود أي وصلات في الأغشية والسدادات المطاطية المستخدمة في تصنيع الفاصل.

6-6 فواصل التمدد الفولاذية (STNIOJ REGNIF LEETS)

يستخدم هذا النوع من الفواصل بكفاءة حتى مدى حركة تصميمي كبير كما بالجدول الاسترشادي رقم (6-1). ويتم تركيب هذه الفواصل على شكل كوابيل، ويجب تصميمها بعناية لتحمل أحمال المرور الثقيلة بتوفير جساءة مناسبة لها لتفادي الاهتزازات الزائدة. وبالإضافة إلى الحركات الطولية يجب تصميم الأصابع الفولاذية أيضًا لاستيعاب الحركة الدورانية التصميمية عند الفاصل والحركة الرأسية النسبية بين جانبي الفاصل. ومن أبرز عيوب هذا النوع من الفواصل أنه لا يوفر مانعًا محكمًا لتسرب المياه، ومن ثم يفضل تركيب غشاء مطاطي ومجرى معدني بأسفله لتجميع الماء وتصريفه، ولكن عادةً ما يتعرض هذا المسار للسدد ويصبح غير فعال.

7-6 فواصل التمدد الخلوية (STNIOJ NOISNAPXE RALUDOM)

يعد هذا النوع من الفواصل عالي التكلفة ويحتاج إلى صيانة كبيرة؛ ولذلك لا يفضل استخدامه إلا لحالات الحركة واسعة المدى أكبر من 125مم، وعند استخدام هذه الفواصل يراعى توصيف تلك التي تتميز بسهولة صيانتها وسهولة تغيير أجزائها، بالإضافة إلى تلك الأصناف المتوفر معلومات مسبقة حول بقائها في الخدمة بكفاءة لفترات طويلة.
كما أنه يراعى كلما أمكن ذلك استخدام فواصل التمدد الخلوية التي تكون بكامل عرض سطح الجسر من دون وصلات تركيب، كما يجب مراعاة أن تكون سدادة حشوة النيوبرين المستخدمة في فاصل التمدد الخلوي قطعة واحدة بكامل عرض سطح الطريق أعلى الجسر، بغض النظر عن اعتبارات مراحل التنفيذ المستخدمة.

الفصل السابع
أجهزة الاستناد (Bearings)

7- أجهزة الاستناد (Bearings)

1-7 عام

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء البنود 14-4 و 14-6 إلى 14-9 بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS)، بالإضافة إلى التعديلات والتعليقات التالية.

2-7 متطلبات التصميم والتركيب

يتم اختيار نوع جهاز الاستناد المناسب لحالة كل جسر طبقًا لعوامل متعددة مثل قيمة التحميل، متطلبات الصيانة ومحدداتها، الخلوص المتاح، متطلبات الحركة وزاوية الدوران عند موضع جهاز الاستناد، توفر الأنواع، اقتصاديات المشروع، متطلبات المصمم والمالك، محددات التنفيذ، إلخ... وبصفة عامة تقوم جميع أجهزة الاستناد المُوصفة بمنع الحركة الرأسية، بينما تسمح بالدوران بحرية حول جميع المحاور بقدر الإمكان، كما تمنع أو تسمح بكلتا الحركتين الأفقيتين أو إحداهما.

يفضل استخدام أجهزة الاستناد من المطاط المسلح بالفولاذ (Steel-reinforced elastomeric bearings) أو من نوع الوسادة المرنة المستوية (Plain elastomeric pads) في حالة الجسور ذات الكمرات (Girder bridges) كلما أمكن ذلك. بينما تستخدم أجهزة الاستناد عالية التحميل ومتعددة الدوران (HLMR bearings) مثل جهاز الاستناد الوعائي (Pot bearing)، وجهاز الاستناد الكروي (Spherical bearing)، وجهاز الاستناد المعدني المتأرجح أو الدوراني (Metal rocker or roller bearing) في حالة الجسور ذات الأحمال العالية و /أو الحركات المتعددة الاتجاهات المطلوبة عند جهاز الاستناد.

تستخدم ألواح ارتكاز وبراغي تثبيت في حالات الجسور ذات المنشأ العلوي من الخرسانة سابقة الصب، أو ذات المنشأ العلوي من الكمرات المعدنية. كما تستخدم عادةً خوابير القص من الخرسانة (Concrete shear keys) مع أجهزة الاستناد من المطاط المسلح بالفولاذ؛ بهدف توفير انتقال آمن للقوى الأفقية من المنشأ العلوي للجسر إلى المنشأ السفلي.

يراعى عند تركيب أجهزة الاستناد من المطاط المسلح بالفولاذ أو من نوع الوسادة المرنة المستوية أن يتم توجيهها، بحيث يكون الاتجاه الأطول لجهاز الاستناد موازيًا لمحور الدوران المناظر لحالة انحناء في الاتجاه الطولي للمنشأ العلوي من الجسر، حيث يسمح ذلك باستيعاب قيم أكبر لزوايا الدوران. كما يمُنع تثقيب هذه الأنواع من أجهزة الاستناد، وفي حالة تركيبها مباشرة على خرسانة المنشأ السفلي للجسر يراعى ألا تقل مسافة الحافة عن 75مم.

يراعى تصميم كل من أجهزة الاستناد من المطاط المسلح بالفولاذ والمنشأ السفلي من الجسر الحامل لها لتحمل ٪80 من مدى الحركة الكلي المناظر لقيم درجات الحرارة التصميمية العليا والدنيا، وذلك لمراعاة التغير الواسع والاختلاف الملحوظ بين درجات الحرارة التصميمية العليا والدنيا للمناطق المختلفة في عموم المملكة، وفي خلال اليوم الواحد. كما يؤخذ أدنى سمك كلي للمطاط المستخدم في أجهزة الاستناد من هذا النوع مساويًا لضعف مجموع الحركات الكلية؛ نتيجة الزحف والانكماش والتقاصر المرن للجسور الخرسانية سابقة الإجهاد طبقًا لترتيب التنفيذ المتَّبع، بالإضافة إلى الحركة التي تناظر ٪80 من مدى قيم درجات الحرارة التصميمية العليا والدنيا الموضحة سابقًا.

1-2-7 تأثير التحدب (Camber) وطريقة التنفيذ

في حالات خاصة يكون من المناسب من وجهة نظر اقتصادية توقيع ترحيل ابتدائي (Initial offset) عند تركيب أجهزة الاستناد، أو ضبط مكانها النسبي أعلى الركيزة بعد بدء التنفيذ، وذلك لاستيعاب و/أو تخفيض التأثير السلبي لأي من حالات التحميل الابتدائية المؤقتة أثناء مرحلة التنفيذ.

كما يتسبب التحدب الابتدائي لكمرات الجسور في بلوغ قيم زوايا دوران ابتدائي كبيرة بأجهزة الاستناد، بينما تنخفض هذه القيم تباعًا مع الاستمرار في خطوات إنشاء الجسر. ولكن يجب مراعاة قيم زوايا الدوران لأجهزة الاستناد الناشئة نتيجة التحدب الابتدائي والسماحات الابتدائية أثناء مراحل الإنشاء؛ نظرًا لمشاركة هذين البندين عادةً بأكبر نصيب في قيمة زاوية الدوران الكلية بأجهزة الاستناد.

2-2-7 الحركات التصميمية نتيجة التغير في درجات الحرارة (Design Thermal Movements)

يجب مراعاة ظروف تركيب أجهزة الاستناد فيما يخص درجة الحرارة أثناء التركيب؛ لكي تتلاءم مع درجات الحرارة العليا والدنيا المتوقعة في موقع الجسر أثناء فترة التشغيل للجسر خلال عمره التصميمي. كما يجب مراعاة الطول الحاكم للتمدد واتجاه حركة الجسر نتيجة للتغير المنتظم في قيمة درجات الحرارة في اتجاهي سطح الجسر في المستوى الأفقي، حيث إن الحركة تتم في مختلف الاتجاهات في مستوى سطح الجسر، ومن ثم فمن الوارد أن تكون الحركة العرضية لبلاطة عريضة بعض الشيء لجسر قصير نتيجة لتغير منتظم في درجات الحرارة أكبر من نظيرتها الطولية.

عند تحديد قيمة الحركة التصميمية الكلية المطلوب استيعابها بواسطة أجهزة الاستناد، يجب حساب قيمة الحركة نتيجة تأثيرات الزحف والانكماش، بالإضافة إلى الحركة الناشئة عن تأثير التغير المنتظم في قيمة درجات الحرارة عند موقع الجسر.

3-2-7 براغي التثبيت (Anchor Bolts)

تستخدم البراغي في أجهزة الاستناد كوسائط تثبيت رأسي (Hold downs)، أو لضمان انتقال آمن للقوى الأفقية في حالة غياب وسائل مساعدة خارجية مثل مُعِيقات القص بشكل مفاتيح قص (Shear keys).

يجب مراعاة عمل فتحات براغي التثبيت في الأعضاء من الفولاذ بأجهزة الاستناد بقطر يزيد بمقدار 6مم عن قطر البراغي، مع مراعاة بُعد مركز البراغي عن حافة الكمرة مسافة لا تقل بأي حال عن 50مم؛ لتسهيل عملية التحكم أثناء التركيب والتثبيت. وفي حالة استخدام أجهزة استناد من المطاط (Elastomeric bearings) يراعى ترك مسافة سماح بمقدار 13مم على الأقل ما بين حافة جهاز الاستناد وحافة براغي التثبيت.

كما يجب وضع حديد تسليح كاف حول براغي التثبيت؛ لضمان انتقال آمن للقوى الأفقية للمنشأ السفلي للجسر، أي للركيزة الحاملة لجهاز الاستناد. كما يجب تحديد الأسطح المحتملة للتشرخ في محيط جهاز الاستناد المعني، مع ضرورة تحديد قدرتها لحالة القص-الاحتكاك (Shear-friction capacity) .

4-2-7 تفاصيل ألواح الارتكاز (Bearing Plates)

في حالة استخدام أجهزة استناد من المطاط (Elastomeric bearings)، فإنه يلزم توصيف ألواح الارتكاز أعلى أجهزة الاستناد بعرض لا يقل عن 25مم أكبر من عرض جهاز الاستناد، وبسمك لا يقل عن 40مم. كما يلزم استخدام لوح ارتكاز مشطوف (Beveled plate) ليحتوي قيمة محصلة الميل الهندسي للمنشأ العلوي من الجسر، بالإضافة إلى تأثير التحدب النهائي لأعلى، وذلك في حالة زيادة القيمة المجمعة لميلهما عن ٪1. وفي حالة استخدام ألواح الارتكاز المشطوفة، فإنه يلزم توفير سمك لا يقل عن 40مم عند الطرف الأقل سمكًا للوح الارتكاز.

وفي حالة أجهزة الاستناد التي تسمح بالتمدد (Expansion bearings)، فإنه يلزم توفير ألواح ارتكاز ذات شق⊠ فتحة (Slotted bearing plates)، ويتم تحديد القيمة الدنيا لطول هذه الفتحة طبقًا لمقدار الحركة الكلية وتأثير الدوران المحسوبين عند أجهزة الاستناد. ويحسب مقدار طول الفتحة كما يلي:

طول الفتحة = قطر براغي التثبيت + 1.2 ´ مقدار الحركة الكلية + 25مم

قيمة المعامل 1.2 المستخدمة في العلاقة السابقة مأخوذة من جدول معامل تراكيب الأحمال وهي القيمة المناظرة لأحمال التغير المنتظم في درجات الحرارة وأحمال الزحف والانكماش.

الفصل الثامن
العبارات (Culverts)

8- العبارات (Culverts)

8-1 عام

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء الفصل الثاني عشر من مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) بالإضافة إلى التعديلات والتعليقات التالية.

تستخدم فقط العبارات الصندوقية الخرسانية المسلحة أو الأقواس الخرسانية المسلحة أو العبارات الأنبوبية المسلحة. أما باقى أنواع العبارات الأخرى فهي لا تفي بالمتطلبات الخاصة بالديمومة.

8-2 العبارات الصندوقية الخرسانية المسلحة

8-2-1 التحليل الإنشائي

يتم عمل التحليل الإنشائي للعبارات باستخدام طرق المرونة، حيث يتم نمذجة القطاع العرضي كإطار ثنائي الأبعاد باستخدام خصائص المقطع العرضي الكامل. ويتم تقييد حركة البلاطة السفلية بإحدي الطريقتين الآتيتين:

- استناد مقيد عند أحد الأركان واستناد متدحرج عند الركن المقابل.
- زنبركات رأسية (خطية مرنة أو غير مرنة)، بالإضافة إلى تقييد أفقي عند أحد الأركان.
- يتم أخذ معاملات قيم رد فعل طبقة ما تحت الأساس من المهندس الجيوتقني وذلك عند إجراء التحليل الإنشائي.

8-2-2 التشكلات (Deformations)

يجب ألا يزيد ترخيم البلاطة العلوية للعبارات على (الفتحة/800) تحت تأثير الحمل الحي، بالإضافة إلى الزيادة الناتجة عن التحميل الديناميكي.

في العبارات في المناطق الحضرية التي تستخدم بواسطة المشاه يجب ألا يزيد ترخيم البلاطة العلوية على (الفتحة/1000).

8-2-3 الأحمال الميتة وضغط التربة

يتكون الحمل الميت على البلاطة العلوية من طبقات الرصف والتربة ووزن البلاطة الخرسانية. للتبسيط يمكن اعتبار طبقات الرصف مثل التربة من حيث قيمة وحدة الوزن (g).

في حالة غياب معلومات أدق يمكن استخدام القيم الآتية لتحديد الحمل الميت وضغوط التربة:

- التربة = 19.50 كن/م3
- الخرسانة = 24 كن/م3
- تأثير ضغط التربة الجانبي (أثناء الراحة) Kog و يؤخذ كالآتي:
- تأثير الحمل الأفقي الأقصى = 9.60 كن/م3 (بفرض أن زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة = 30°)

تأثير الحمل الأفقي الأدنى = 4.80 كن/ م3 (وهو يعادل نصف تأثير الحمل الأقصى)

8-2-4 الحمل الحي

يتم استخدام حمل المسرب لتصميم العبارات والتي يزيد طول فتحاتها على 5 أمتار.

5-2-8 متطلبات سمك الجدار

يتم تحديد سمك الجدار الخارجي للعبارات الخرسانية بناءً على متطلبات التصميم مع مراعاة الحد الأدنى لسمك الجدار طبقًا للجدول الآتي:

جدول رقم (8-1): الحد الأدنى لسمك الجدار الخارجي للعبارات

الفتحة الصافية	الحد الأدني لسمك الجدار الخارجي
أقل من 2.4 متر	250 مم (سابقة الصب) و300 مم (مصبوبة في الموقع)
من 2.4متر حتى 4.0 متر	300 مم
من 4.0 متر حتى 6.0 متر	350 مم
أكبر من أو يساوي 6.00 متر	400 مم

ينبغي ألا يقل سمك الجدار الداخلي للعبارات سابقة الصب عن 250مم وللعبارات المصبوبة في الموقع عن 300مم. كما يتم زيادة الحد الأدنى لسمك جدار العبارة بمقدار 25مم إذا ما وجدت في بيئة شديدة العدوانية مع مراعاة استخدام غطاء خرساني = 100مم.

6-2-8 العبارات المنحرفة سابقة الصب (strevluC dewekS tsacerP)

يتم تصميم وإعداد تفاصيل هذه العبارات بحيث تكون:

- الوحدات الداخلية غير المنحرفة متعامدة على الحوائط الجانبية.
- الوحدات الطرفية المنحرفة فتحتها الصافية مساوية للفتحة الصافية المنحرفة.

الفصل التاسع
جسور المشاة
(Pedestrian Bridges)

9- جسور المشاة (Pedestrian Bridges)

9-1 عام

يختلف تصميم جسور المشاة عن جسور السيارات من حيث الحمل المطبق، بينما تنطبق عليها جميع اشتراطات تصميم الجسور الواردة في هذا الدليل؛ وذلك من أجل تصميم مقاطع عناصر تلك الجسور سواء كانت من الخرسانة المسلحة أو من الخرسانة سابقة الإجهاد أو من الفولاذ. ويجب عند تصميم جسور المشاة مراعاة النواحي الجمالية بجانب النواحي الاقتصادية، إلى جانب أمانها وتحقيق الهدف من إنشائها.

بغرض تصميم جسور المشاة يتم الرجوع إلى مواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) إلى جانب المواصفات المتخصصة كما بالمرجع:

(AASHTO LRFD Guide Specifications for the Design of Pedestrian Bridges (AASHTO GSDPB) (2nd Edition 2009

9-2 الحمل الحي التصميمي

9-2-1 حمل المشاة

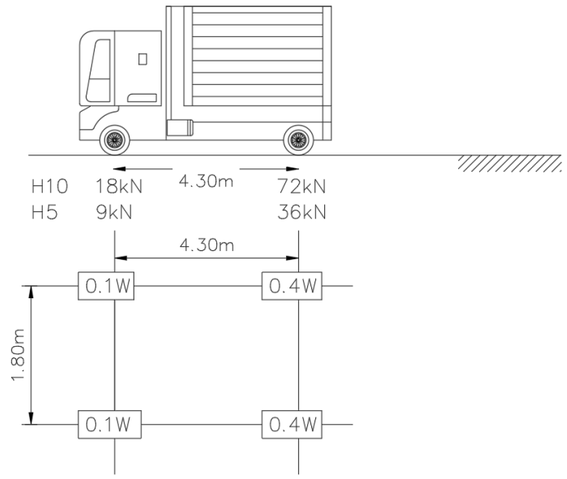
يجب تصميم جسور المشاة من أجل حمل مشاة موزع بانتظام قيمته 5 ´ 10-3 ميجاباسكال، ويتم وضع هذا الحمل بحيث ينتج تأثيرات تحميل قصوى، مع عدم أخذ العامل الديناميكي في حالة تصميم جسور المشاة.

9-2-2 حمل عربات الصيانة

عند عدم وجود عائق من وصول عربات الصيانة إلى بلاطة الجسر، يجب تصميم جسور المشاة من أجل حمل العربات الموضح بالشكل (9-1) والجدول رقم (9-1)؛ وذلك من أجل تركيب حمل حد المقاومة I (Strength I) .

جدول رقم (9-1): اختيار حمل عربة الصيانة حسب عرض الجسر

الحمل التصميمي	العرض الصافي للجسر
H5	2m ≤ w < 3m
H10	w ≥ 3m



شكل (9-1): الحمل التصميمي لعربة الصيانة

3-2-9 حمل الرياح

يجب تصميم جسور المشاة على مقاومة ضغط الرياح المؤثرة أفقيًا على الإشارات والأضواء، وعلى أي ملحقات أخرى بأخذ سرعة الرياح التصميمية لثلاث ثوانٍ كما هو موضح بالبند 2-4-1.

4-2-9 تراكيب التحميل

يجب تصميم جسور المشاة على تراكيب التحميل وعوامل الحمل المحددة بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS) باستثناء تراكيب الأحمال المشار إليها بحدود المقاومة (Strength II, IV and V). كما يجب أخذ عامل الحمل من أجل تركيب حمل الكلال (Fatigue I) مساويًا 1.0، ولا يتم أخذ حالة تركيب الحمل (Fatigue II) في الحسبان.

5-2-9 الترخيمات (Deflections)

يجب التحقق من الترخيمات عند حالة حد الخدمة باستخدام تركيب حمل الخدمة (Service I) المحدد بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD BDS). يجب ألا يتجاوز الترخيم الناتج عن الحمل الحي غير المصعد للمشاة (Unfactored pedestrian load) القيمة 500/1 من طول فتحة الجسر، وذلك من أجل جميع فتحات الجسور باستثناء الفتحات الكابولية. كما يجب ألا يتجاوز الترخيم الناتج عن الحمل الحي غير المصعد للمشاة القيمة 300/1 من طول الفتحة؛ وذلك من أجل الفتحات الكابولية. ويجب أيضًا ألا يتجاوز الترخيم الأفقي الناتج عن حمل الرياح غير المصعدة القيمة 500/1 من طول فتحة الجسر.

الفصل العاشر
مراجع الجزء الثاني

10- مراجع الجزء الثاني

- AASHTO LRFD Bridge Design Specifications (8th Edition, September 2017)
- AASHTO LRFD Guide Specifications for the Design of Pedestrian Bridges (December 2009)
- ACI 31599- Details and Detailing of Concrete Reinforcement
- Florida DOT Structures Manual – Volume 1, Structures Design Guidelines (January 2014)
- Road Structures Design Manual, TR-529, Abu Dhabi Department of Municipal Affairs and Transport (1st Edition, December 2016)
- Saudi Building Code – General (كود البناء العام) SBC 201-CR (2018)
- Saudi Building Code – Saudi Loading Code (كود الأحمال والقوى) SBC 301-CR (2018)
- Wisconsin Department of Transportation – Bureau of Structures – WisDOT LRFD Bridge Manual (2019)

الجزء الثالث

دليل تصميم الأنفاق

المحتويات

الجزء الثالث: دليل تصميم الأفاق 1-1

3ـ 1ـ نطاق البحث 3ـ 15

3ـ 2ـ الغاية 3ـ 15

3ـ 3ـ التعريفات والاختصارات 3ـ 15

3ـ 4ـ التخطيط 3ـ 16

3ـ 4ـ 1ـ التقييم بين الخيارات 3ـ 16

3ـ 4ـ 2ـ أسس تشغيل الأنفاق 3ـ 16

3ـ 4ـ 3ـ التخطيط المالي 3ـ 17

3ـ 4ـ 4ـ مسائل التوفير المتعلقة بالتخطيط 3ـ 17

3ـ 4ـ 5ـ فاعلية التوقع أو التنبؤ 3ـ 18

3ـ 5ـ الدراسات والتحريات 3ـ 18

3ـ 5ـ 1ـ عام 3ـ 18

3ـ 5ـ 2ـ تحريات ظروف الموقع 3ـ 19

3ـ 5ـ 3ـ تحريات العوائق 3ـ 19

3ـ 5ـ 4ـ التحريات الجيولوجية والجيوتكنية 3ـ 19

3ـ 5ـ 5ـ التحري من أجل الوقاية البيئية 3ـ 21

3ـ 6ـ الحسابات التصميمية 3ـ 21

3ـ 6ـ 1ـ متطلبات الطرق السريعة 3ـ 21

3ـ 6ـ 1ـ 1ـ عام 3ـ 22

3ـ 6ـ 1ـ 2ـ الأنفاق الحضرية 3ـ 22

3ـ 6ـ 1ـ 3ـ أنفاق الطرق السريعة الحضرية 3ـ 22

3ـ 6ـ 1ـ 4ـ الأنفاق الغائصة في الماء 3ـ 22

3ـ 6ـ 1ـ 5ـ الأنفاق الجبلية 3ـ 22

3ـ 6ـ 2ـ هندسة خط المركز 3ـ 22

3ـ 6ـ 2ـ 1ـ طرق الاقتراب 3ـ 23

3ـ 6ـ 2ـ 2ـ الجيولوجيا 3ـ 23

3ـ 6ـ 2ـ 3ـ الخلوص من العوائق الخارجية 3ـ 23

3ـ 6ـ 2ـ 4ـ الميول 3ـ 23

3ـ 6ـ 2ـ 5ـ المنحنيات الرأسية 3ـ 23
3ـ 6ـ 2ـ 6ـ المنحنيات الأفقية 3ـ 23
3ـ 6ـ 3ـ المقطع العرضي 3ـ 24
3ـ 6ـ 3ـ 1ـ عام 3ـ 24
3ـ 6ـ 3ـ 2ـ الحيز المروري 3ـ 24
3ـ 6ـ 3ـ 3ـ المساحات الأخرى 3ـ 24
3ـ 6ـ 3ـ 4ـ الدراجون والمشاة 3ـ 24
3ـ 6ـ 3ـ 5ـ متطلبات التنفيذ 3ـ 25
3ـ 6ـ 4ـ الطريقة الأساسية لتصميم التدعيم الأرضي 3ـ 25
3ـ 6ـ 5ـ التأثيرات الزلزالية على الأنفاق 3ـ 27
3ـ 7ـ حفر الأنفاق في الأرض الطرية 3ـ 27
3ـ 7ـ 1ـ عام 3ـ 27
3ـ 7ـ 2ـ استقرار التربة والتحكيم بالمياه الجوفية 3ـ 28
3ـ 7ـ 3ـ آلات حفر الأنفاق في الأرض الطرية 3ـ 30
3ـ 7ـ 4ـ طريقة شق الأنفاق النمساوية الجديدة NATM/ طريقة الحفر التتابعي SEM 3ـ 34
3ـ 7ـ 5ـ تدعيم وتبطين أنفاق الأرض الطرية 3ـ 35
3ـ 7ـ 5ـ 1ـ مخطط بطانة مزدوجة 3ـ 35
3ـ 7ـ 5ـ 2ـ مخطط بطانة مفردة 3ـ 35
3ـ 7ـ 6ـ التأثيرات السطحية لتنفيذ النفق 3ـ 38
3ـ 7ـ 7ـ طرق حماية المباني 3ـ 39
3ـ 7ـ 8ـ تصميم بطانة الأنفاق للأنفاق المنفذة بواسطة التروس 3ـ 40
3ـ 7ـ 8ـ 1ـ المصطلحات الفنية 3ـ 43
3ـ 7ـ 8ـ 2ـ الرموز 3ـ 45
3ـ 7ـ 8ـ 3ـ أسس التصميم 3ـ 45
3ـ 7ـ 8ـ 4ـ الأحمال التصميمية 3ـ 45
3ـ 7ـ 8ـ 5ـ تصنيف الأحمال 3ـ 46
3ـ 7ـ 8ـ 6ـ ضغط التربة الرأسي والأفقي 3ـ 46
3ـ 7ـ 8ـ 7ـ إمكانية تطبيق ضغط الارتخاء 3ـ 47
3ـ 7ـ 8ـ 8ـ ضغط الماء 3ـ 47
3ـ 7ـ 8ـ 9ـ الوزن الدائم 3ـ 47
3ـ 7ـ 8ـ 10ـ الحمولة الإضافية للتربة 3ـ 47
3ـ 7ـ 8ـ 11ـ رد فعل التربة 3ـ 47
3ـ 7ـ 8ـ 12ـ أحمال التنفيذ (الإنشاء) 3ـ 47
3ـ 7ـ 8ـ 13 الأحمال الداخلية 3ـ 48
3ـ 7ـ 8ـ 14ـ تأثير الزلازل 3ـ 48
3ـ 7ـ 8ـ 15ـ تأثيرات نفقين أو أكثر 3ـ 51
3ـ 7ـ 8ـ 16ـ تأثيرات الإنشاءات المجاورة 3ـ 52
3ـ 7ـ 8ـ 17ـ تأثيرات هبوط الأرض 3ـ 52
3ـ 7ـ 8ـ 18ـ الأحمال الأخرى 3ـ 53
3ـ 7ـ 8ـ 19ـ الحساب الإنشائي للقطع 3ـ 53
3ـ 7ـ 8ـ 20ـ يجب أن يكون أساس الحساب الإنشائي كما يلي: 3ـ 53
3ـ 7ـ 8ـ 21ـ التصميم التفصيلي للقطع 3ـ 57
3ـ 7ـ 9ـ حفر النفق باستخدام الدعامات المركزية المرحلية 3ـ 59
3ـ 7ـ 9ـ 1ـ مقدمة 3ـ 59
3ـ 7ـ 9ـ 2ـ اختيار التقنية 3ـ 60
3ـ 7ـ 9ـ 3ـ التعاقب الأساسي للتثبيت 3ـ 61
3ـ 7ـ 9ـ 4ـ التصميم 3ـ 61
3ـ 8ـ الأنفاق الصخرية 3ـ 64
3ـ 8ـ 1ـ عام 3ـ 64
3ـ 8ـ 2ـ الفجوات (الانقطاعات) الصخرية 3ـ 65
3ـ 8ـ 3ـ الحركات الصخرية 3ـ 65
3ـ 8ـ 4ـ تسليح الصخر 3ـ 66
3ـ 8ـ 5ـ تصميم التدعيم الأولي 3ـ 66
3ـ 8ـ 5ـ 1ـ القواعد التجريبية 3ـ 66
3ـ 8ـ 5ـ 2ـ الطرق النظرية وشبه النظرية 3ـ 67
3ـ 8ـ 5ـ 3ـ 1ـ تحليل البراغي الصخرية 3ـ 67
3ـ 8ـ 5ـ 4ـ الطريقة الأساسية – تصميم الأعصاب الحديدية والعوارض الشبكية 3ـ 68
3ـ 8ـ 6ـ التحليل الجيوميكانيكي 3ـ 73
3ـ 8ـ 6ـ 1ـ مفاهيم عامة 3ـ 73
3ـ 8ـ 6ـ 2ـ طريقة حجز الالتقاء 3ـ 82
3ـ 8ـ 6ـ 3ـ تحليل الإجهاد 3ـ 85
3ـ 8ـ 6ـ 4ـ تحليل الاستمرارية باستخدام طرق الفروقات المحدودة أو العناصر المحدودة أو العناصر الحدية 3ـ 92
3ـ 8ـ 6ـ 5ـ تحليلات عدم الاستمرارية 3ـ 99
3ـ 8ـ 7ـ تصميم التبطينات الدائمة النهائية 3ـ 101
3ـ 8ـ 7ـ 1ـ اختيار التبطين: 3ـ 101
3ـ 8ـ 7ـ 2ـ أنماط انهيار التبطينات الخرسانية 3ـ 104
3ـ 8ـ 7ـ 3ـ الأحمال اللاحقة 3ـ 105
3ـ 8ـ 7ـ 4ـ التبطينات الخاضعة للانحناء والتشوه 3ـ 105

3_ 8_ 8_ طرق الحفر ..... 3_ 110
3_ 8_ 8_ 1_ حفر الـTBM ..... 3_ 111
3_ 8_ 8_ 2_ الحفر بالثقب والتفجير ..... 3_ 111
3_ 8_ 8_ 3_ تقدم الواجهة ..... 3_ 111
3_ 8_ 8_ 4_ النفق الأفقي والمنصة ..... 3_ 112
3_ 8_ 8_ 5_ تقدم الجروف المتعدد ..... 3_ 112
3_ 8_ 8_ 6_ طريقة شق الأنفاق النمساوية الجديدة NATM ..... 3_ 112
3_ 8_ 9_ تأثير طريقة الحفر في التصميم ..... 3_ 113
3_ 9_ الأرض ذات الواجهة المختلطة أو الصعبة ..... 3_ 113
3_ 10_ الممرات الرأسية ..... 3_ 118
3_ 10_ 1_ عام ..... 3_ 118
3_ 10_ 2_ حفريات الممرات الرأسية في الأرض الطرية ..... 3_ 118
3_ 10_ 2_ 1_ معدل التركيب ..... 3_ 118
3_ 10_ 2_ 2_ هيئة الممرات الرأسية: ..... 3_ 118
3_ 10_ 2_ 3_ منظومة تدعيم الممرات الرأسية: ..... 3_ 118
3_ 10_ 2_ 4_ الحفر في الأرض الطرية الرطبة: ..... 3_ 118
3_ 10_ 3_ الممرات المحفورة في الصخر ..... 3_ 122
3_ 10_ 3_ 1_ التدعيمات المؤقتة ..... 3_ 122
3_ 10_ 4_ التبطين النهائي للمرات الرأسية ..... 3_ 122
3_ 10_ 5_ النفق الجديد الرأسي الترسي ..... 3_ 122
3_ 11_ منشآت الأنفاق بطريقة القطع – و – التغطية ..... 3_ 122
3_ 11_ 1_ التصميم الإنشائي للنفق ..... 3_ 122
3_ 11_ 2_ ضغط التربة الأفقي ..... 3_ 123
3_ 11_ 3_ قابلية الطفو في الماء ..... 3_ 124
3_ 11_ 4_ الفيضان ..... 3_ 125
3_ 11_ 5_ الانكماش والقوى الحرارية ..... 3_ 125
3_ 11_ 6_ حالات التحميل ..... 3_ 125
3_ 11_ 7_ التحليل الإطاري ..... 3_ 125
3_ 11_ 8_ تصميم الخرسانة المسلحة ..... 3_ 126
3_ 11_ 9_ منظومات التدعيم ..... 3_ 126
3_ 11_ 10_ التغطية ..... 3_ 127
3_ 11_ 11_ السيطرة على الحفرية والمياه الجوفية ..... 3_ 127
3_ 11_ 11_ 1_ الحفريات المقواة داخليًا ..... 3_ 127
3_ 11_ 11_ 2_ الحفريات المربوطة من الخلف ..... 3_ 128
3_ 11_ 11_ 3_ السيطرة على المياه الجوفية ..... 3_ 129
3_ 11_ 12_ جدران السند والتدعيم الدائمين ..... 3_ 129
3_ 11_ 13_ الكتامة ضد الماء ..... 3_ 129
3_ 12_ الأمان أو السلامة ..... 3_ 130
3_ 12_ 1 الحوادث والطوارئ ..... 3_ 130
3_ 12_ 2_ تحليل وإدارة المخاطر ..... 3_ 130
3_ 12_ 3_ التصنيف والقرارات الخاصة بمرافق السلامة ..... 3_ 134
3_ 12_ 4_ إدارة الحركة المرورية ..... 3_ 135
3_ 12_ 5_ القيود على استخدام الأنفاق ..... 3_ 135
3_ 12_ 6_ حدود السرعة ..... 3_ 135
3_ 12_ 7_ تأسيس المقطع الطولي للنفق ..... 3_ 135
3_ 12_ 8_ اعتبارات التوسيع المستقبلي وحارات الصيانة المرورية ..... 3_ 140
3_ 12_ 9_ أنفاق الخدمات ومتطلبات الفراغ ..... 3_ 140
3_ 12_ 10_ مقاطع الأنفاق المدفوعة (المسافة) ..... 3_ 140
3_ 12_ 11_ مقاطع الأنفاق المحفورة والمسقوفة ..... 3_ 141
3_ 12_ 12_ مقاطع الأنفاق الأنبوبية المغمورة ..... 3_ 141
3_ 12_ 13_ الفراغ الخاص بالمعدات ..... 3_ 141
3_ 12_ 14_ متطلبات فراغ التهوية ..... 3_ 141
3_ 12_ 15_ متطلبات الفراغ للإنارة ..... 3_ 142
3_ 12_ 16_ متطلبات الفراغ للوحات المرورية والإشارات الضوئية ..... 3_ 142
3_ 12_ 17_ متطلبات الفراغ لكبائن تحصيل الرسوم ..... 3_ 143
3_ 12_ 18_ متطلبات الفراغ ووظيفة التكسية الثانوية ..... 3_ 143
3_ 12_ 19_ متطلبات الفراغ لخدمات الأقنية والكابلات ..... 3_ 143
3_ 12_ 20_ المرافق ..... 3_ 144
3_ 13_ التصنيف التشغيلي لوسائل السلامة من أجل مستخدمي الطريق ..... 3_ 144
3_ 13_ 1_ عام ..... 3_ 144
3_ 13_ 2_ المتطلبات الأساسية ..... 3_ 145
3_ 13_ 3_ تصنيف المرافق ..... 3_ 146
3_ 13_ 4_ تخطيط النفق والخواص الإنشائية ..... 3_ 148
3_ 13_ 4_ 1_ نقاط الطوارئ ..... 3_ 148
3_ 13_ 4_ 2_ ملاجئ المركبات من أجل حوادث الأنفاق ..... 3_ 148
3_ 13_ 4_ 3_ حارات التوقف الطارئة ..... 3_ 148
3_ 13_ 4_ 4_ أرصفة الطوارئ ..... 3_ 149
3_ 13_ 4_ 5_ مسالك الهروب (النجاة) ..... 3_ 149

3ـ 13ـ 4ـ 6ـ الوصلات العرضية للنفق 3ـ 149
3ـ 13ـ 4ـ 7ـ المعابر العرضية للمركبات 3ـ 150
3ـ 13ـ 4ـ 8ـ فسحات الالتفاف 3ـ 150
3ـ 13ـ 4ـ 9ـ مواقف خدمات الطوارئ 3ـ 150
3ـ 13ـ 4ـ 10ـ كبائن تحصيل الرسوم 3ـ 150
3ـ 13ـ 4ـ 11ـ مجمعات التصريف (الخزانات الأرضية) 3ـ 150
3ـ 13ـ 5ـ وسائل اتصال النفق ومرافق الطوارئ 3ـ 151
3ـ 13ـ 5ـ 1ـ الاتصالات 3ـ 151
3ـ 13ـ 5ـ 2ـ التحكم المروري 3ـ 151
3ـ 13ـ 5ـ 3ـ منظومات طوارئ الأنفاق 3ـ 151
3ـ 13ـ 5ـ 4ـ إنذار الحريق، طفايات الحريق، والتحكم بالدخان 3ـ 151
3ـ 13ـ 5ـ 5ـ طاقة وإنارة الطوارئ 3ـ 151
3ـ 13ـ 6ـ الهندسة القيمية 3ـ 151
3ـ 14ـ الإنارة 3ـ 152
3ـ 14ـ 1ـ عام 3ـ 152
3ـ 14ـ 2ـ المراجع المعيارية 3ـ 153
3ـ 14ـ 3ـ مناطق النفق 3ـ 154
3ـ 14ـ 4ـ تصنيف الأنفاق 3ـ 156
3ـ 14ـ 5ـ إنارة النفق 3ـ 157
3ـ 14ـ 5ـ 1 إنارة منطقة الدخول 3ـ 157
3ـ 14ـ 6 التحكم في الإضاءة 3ـ 163
3ـ 14ـ 7 تحديات التصميم 3ـ 163
3ـ 14ـ 8 معامل الصيانة 3ـ 165
3ـ 14ـ 9 إضاءة الطوارئ 3ـ 165
3ـ 14ـ 10 إنارة الممرات 3ـ 166
3ـ 14ـ 11 شبكة توزيع الكهرباء للأنفاق 3ـ 166
3ـ 15ـ مراقبة الأنفاق وإدارتها وسلامتها 3ـ 167
3ـ 15ـ 1ـ عام 3ـ 167
3ـ 15ـ 2ـ التصميم والتنفيذ 3ـ 168
3ـ 15ـ 2ـ 1ـ طريقة التصميم التقليدية 3ـ 168
3ـ 15ـ 2ـ 2ـ طريقة مدير المنظومة 3ـ 168
3ـ 15ـ 3ـ أمن النفق 3ـ 168
3ـ 16ـ التهوية 3ـ 168
3ـ 16ـ 1ـ عام 3ـ 168
3ـ 16ـ 2ـ تقنيات التهوية 3ـ 169
3ـ 16ـ 2ـ 1ـ التهوية الطبيعية 3ـ 169
3ـ 16ـ 2ـ 2ـ المراوح 3ـ 169
3ـ 16ـ 2ـ 3ـ المراوح النفاثة (Jet Fans) 3ـ 170
3ـ 16ـ 2ـ 4ـ التهوية الطولية 3ـ 170
3ـ 16ـ 2ـ 5ـ التهوية شبه المستعرضة 3ـ 172
3ـ 16ـ 2ـ 6ـ التهوية المستعرضة 3ـ 173
3ـ 16ـ 2ـ 7ـ فتحات وقنوات التهوية 3ـ 173
3ـ 16ـ 2ـ 8ـ حلول لتقليل إعادة دخول الهواء الملوث 3ـ 174
3ـ 16ـ 3ـ التحكم بالتهوية 3ـ 175
3ـ 16ـ 3ـ 1 سرعة الهواء داخل النفق)في حل استخدام نظام التهوية الطولية 3ـ 176
3ـ 16ـ 3ـ 2 سرعة الرياح واتجاهها 3ـ 176
3ـ 16ـ 3ـ 3ـ درجة الحرارة 3ـ 176
3ـ 16ـ 3ـ 4ـ عتامة الهواء 3ـ 176
3ـ 16ـ 3ـ 5ـ تركيز الملوثات 3ـ 177
3ـ 17ـ الحماية من الحريق 3ـ 177
3ـ 17ـ 1ـ كشافات ومطافئ الحريق 3ـ 178
3ـ 17ـ 1ـ 2ـ حساسات الغاز 3ـ 179
3ـ 17ـ 1ـ 3ـ حساسات الدخان 3ـ 179
3ـ 17ـ 1ـ 4ـ حساسات اللهب 3ـ 180
3ـ 17ـ 15 مكافحة النيران 3ـ 180
3ـ 18ـ نظام التصريف في الأنفاق والمعابر السفلية 3ـ 184
3ـ 18ـ 1ـ عام 3ـ 184
3ـ 18ـ 2ـ معايير تصميم التصريف 3ـ 184
3ـ 18ـ 3ـ التصريف 3ـ 184
3ـ 18ـ 4ـ إزالة الماء 3ـ 184
3ـ 18ـ 5ـ حجز الرمال وعزل المواد القابلة للاشتعال 3ـ 185
3ـ 18ـ 6ـ التزود بالماء 3ـ 185
3ـ 18ـ 7ـ خزان (أو صهريج) التخميد 3ـ 185
3ـ 18ـ 7ـ الشروط المسبقة 3ـ 187
3ـ 18ـ 7ـ 1ـ التصريف 3ـ 187
3ـ 18ـ 7ـ 2ـ إزاحة الماء 3ـ 188
3ـ 18ـ 7ـ 3ـ الأحواض 3ـ 188

3ـ 18ـ 7ـ 4ـ التزود بالماء 3ـ 188
3ـ 18ـ 8ـ التصميم 3ـ 188
3ـ 18ـ 9ـ المواد 3ـ 189
3ـ 19ـ محطات الضخ والمتطلبات الميكانيكية 3ـ 189
3ـ 19ـ 1ـ الحاجة لمحطة ضخ (تصريف) مياه السيول 3ـ 189
3ـ 19ـ 2ـ مكونات محطة الضخ 3ـ 189
3ـ 19ـ 2ـ 1ـ مقدمة 3ـ 189
3ـ 19ـ 2ـ 2ـ نظام التجميع 3ـ 190
3ـ 19ـ 2ـ 3ـ وحدة التخزين 3ـ 190
3ـ 19ـ 2ـ 4ـ الآبار 3ـ 190
3ـ 19ـ 2ـ 5ـ المضخات 3ـ 191
3ـ 19ـ 2ـ 6ـ وحدة التحكم 3ـ 191
3ـ 19ـ 2ـ 7ـ غرفة المحطة 3ـ 191
3ـ 19ـ 2ـ 8ـ مضخة القاع 3ـ 191
3ـ 19ـ 2ـ 9ـ مزود الطاقة 3ـ 192
3ـ 19ـ 2ـ 10ـ خصائص الأمن والوصول 3ـ 192
3ـ 19ـ 2ـ 11ـ سمات أخرى 3ـ 192
3ـ 19ـ 3ـ أنواع محطات المضخات 3ـ 192
3ـ 19ـ 3ـ 1ـ المحطة ذات التجويف الرطب 3ـ 193
3ـ 19ـ 3ـ 2ـ المحطات ذات التجويف الجاف 3ـ 196
3ـ 19ـ 4ـ مقارنة بين أنواع التجاويف 3ـ 197
3ـ 19ـ 4ـ 1ـ محطات التجويف الجاف 3ـ 197
3ـ 19ـ 4ـ 2ـ محطات التجويف الرطب 3ـ 198
3ـ 19ـ 5ـ مراحل تصميم محطات الضخ 3ـ 198
3ـ 19ـ 5ـ 1ـ المخططات والتفاصيل 3ـ 198
3ـ 19ـ 5ـ 2ـ الشروط والمواصفات والملاحظات العامة 3ـ 198
3ـ 19ـ 5ـ 3ـ مراجعة التصميم 3ـ 199
3ـ 19ـ 6ـ التنفيذ والاختيار 3ـ 199
3ـ 19ـ 7ـ مرحلة التشغيل والصيانة 3ـ 199
3ـ 19ـ 8ـ مرحلة التحديث 3ـ 199
3ـ 20ـ تصميم التنفيذ 3ـ 200
3ـ 20ـ 1ـ عملية التنفيذ 3ـ 200
3ـ 20ـ 1ـ 1ـ التنبؤ 3ـ 200
3ـ 20ـ 1ـ 2ـ التنفيذ (الإنجاز) 3ـ 200
3ـ 20ـ 1ـ 3ـ عمليات المراقبة 3ـ 201
3ـ 20ـ 2ـ استراتيجية المناقصة 3ـ 202
3ـ 20ـ 3ـ اختيار الطريقة 3ـ 203
3ـ 25ـ مراجع الجزء الثالث 3ـ 203

جدول الأشكال

الشكل 3ـ 1: طرق التحكم بالمياه الجوفية (بعد Karol 1990) 3ـ 30
الشكل 3ـ 2: أنواع التروس (أخذ عن JSCE,1996) 3ـ 31
الشكل 3ـ 3: الهيكل التنظيمي لاختيار طريقة الترس (أخذ عن JSCE,1996) 3ـ 33
الشكل 3ـ 4: نمذجة عملية الحفر (الطريقة 20 المعممة) 3ـ 34
الشكل 3ـ 5: المقطع العرضي لحوض الهبوط فوق النفق (متبنى من قبل Peck,1969) 3ـ 37
الشكل 3ـ 6: العلاقة بين عرض حوض الهبوط وعمق النفق (متبنى من قبل Peck,1969) 3ـ 38
الشكل 3ـ 7: المقطع العرضي للقطع مسبقة الصنع 3ـ 39
الشكل 3ـ 8: أجزاء القطع 3ـ 40
الشكل 3ـ 9: الحلقة المستدقة 3ـ 41
الشكل 3ـ 10:المقطع العرضي للحلقة القطعية 3ـ 42
الشكل 3ـ 11: مكونات الحلقة القطعية 3ـ 42
الشكل 3ـ 12: أنواع القطعة K 3ـ 42
الشكل 3ـ 13: عزم الانحناء، والقوة المحورية، وقوة القص 3ـ 43
الشكل 3ـ 14: مثال عن الرموز في طرق الإجهاد الكلي والإجهاد الفعال (بعد JSCE,2001) 3ـ 44
الشكل 3ـ 15: ضغط الارتخاء (أخذ عن JSCE,2001) 3ـ 47
الشكل 3ـ 16: دراسة عن استقرار الأرض المحيطة في التصميم الزلزالي (أخذ JSCE,2001) 3ـ 49
الشكل 3ـ 17: الإزاحة العرضية النسبية في طريقة الاستجابة للإزاحة (بعد JSCE,2001) 3ـ 50
الشكل 3ـ 18: مخطط هيكلي لطريقة الاستجابة للإزاحة (أخذ عن JSCE,2001) 3ـ 51
الشكل 3ـ 19: انتقالات (تحركات) الأرض الطولية في طريقة الاستجابة للإزاحة (أخذ عن JSCE,2001) 3ـ 51
الشكل 3ـ 20: الرسومات التخطيطية للنماذج التصميمية (بعد JSCE,2001) 3ـ 54
الشكل 3ـ 21: توزيعات الأحمال التصميمية للنماذج أعلاه (أخذ عن JSCE,2001) 3ـ 55
الشكل 3ـ 22: فتحات الهواء للقطع الحديدية (JSCE,2001) 3ـ 59
الشكل 3ـ 23: التتابع الأساسي للحفر الخاص بتثبيت الدعامات المركزية (أخذ عن Ropkins,1999) 3ـ 61
الشكل 3ـ 24: تحليلات التثبيت الأرضي لتحديد حمولات التثبيت واتجاهها 3ـ 68
الشكل 3ـ 25: أنماط انهيار الخرسانة المقذوفة 3ـ 69
الشكل 3ـ 26: العوارض الشبكية المستخدمة كتدعيم نهائي مع خرسانة مقذوفة مسلحة بالفولاذ

فهرس الجَدَاوِلِ

الجدول 3 ـ 1: متطلبات التحري الخاصة المتعلقة بطريقة التنفيذ (أخذت عن Bickel et al) 3ـ 20

الجدول 3 ـ 2: سلوك النفق: الرمل والحصى (Terzaghi,1977) 3ـ 28

الجدول 3 ـ 3: آلات ثقب الأنفاق (TBM) عائلة الآلات (من Kessler & Moore) 3ـ 30

الجدول 3 ـ 4: حدود الانحراف الزاوي (Wahls,1981) 3ـ 38

الجدول 3 ـ 5: معادلات قوى العنصر بالنسبة لطرق الحساب "الحساب الاعتيادية والاعتيادية المعدلة (أخذ عن JSCE,2001) 3ـ 56

الجدول 3 ـ 6: توصيات التصميم التجريبي (أخذ عن Lang, 1961) 3ـ 69

الجدول 3 ـ 7: البارومترات الجيوتكنيكية لبعض الصخور البكر (أخذ عن Lama and Vutukuri 1978) 3ـ 77

الجدول 3 ـ 8: العلاقة التقريبية بين نوعية الكتلة الصخرية وثوابت المادة القابلة للتطبيق على الأعمال تحت سطح الأرض 3ـ 81

الجدول 3 ـ 9: ملخص الأنواع الرئيسة للتبطين (أخذ عن O'Rourke,1984:COE EM 1110 ـ 2 ـ 2901,1997) 3ـ 102

الجدول 3 ـ 10: احتمالية الحدث 3ـ 133

الجدول 3 ـ 11: تأثير الحدث 3ـ 133

الجدول 3 ـ 12: أرقام أولوية الخطورة (احتمالية الحدث x تأثير الحدث) 3ـ 133

الجدول 3 ـ 13: استراتيجيات الاستجابة للخطر 3ـ 134

الجدول 3 ـ 14: الحد الأدنى للقياسات (الشكل 3ـ 58 و الشكل 3ـ 59) 3ـ 139

الجدول 3 ـ 15: دليل مرجعي للحد الأدنى من المتطلبات لمكافحة الحريق في الأنفاق 3ـ 147

والأوتاد (الأسافين) والسدادات 3ـ 71

الشكل 3ـ 27: تقدير المقطع العرضي بالنسبة للخرسانة المقذوفة المغلفة للعوارض الشبكية 3ـ 72

الشكل 3ـ 28: معيار انهيار مور – كولومب 3ـ 78

الشكل 3ـ 29: تفاعل التدعيم الصخري 3ـ 83

الشكل 3ـ 30: إزاحة باتجاه القطر لفتحة النفق، u 3ـ 84

الشكل 3ـ 31: تفاعل التدعيم الصخري 3ـ 85

الشكل 3ـ 32: الإجهادات المتنبأ بها بالتحليل المرن (أخذ عن Hoeck & Brown, 1980) 3ـ 87

الشكل 3ـ 33: الإجهادات حول فتحة دائرية في مجال إجهاد ثنائي المحور 3ـ 88

الشكل 3ـ 34: الحل الطيع اللدن 3ـ 90

الشكل 3ـ 35: الحلول المرنة اللدنة الخاصة 3ـ 92

الشكل 3ـ 36: تحليل ثنائي الأبعاد لمقطع نفق بيضاوي الشكل 3ـ 95

الشكل 3ـ 37: تحليل ثلاثي الأبعاد لتقاطع ممر رأسي ونفق 3ـ 96

الشكل 3ـ 38: ى تحليل الكتلة الرئيسة 3ـ 100

الشكل 3ـ 39: تحليل العناصر المميزة، Cundell and Hart 1993 ..... 3ـ 101

الشكل 3ـ 40: توصيات عامة من أجل الأحمال والتشوهات 3ـ 105

الشكل 3ـ 41: التبطين في الأرض المرنة، نموذج الاستمرارية (أخذ عن US Army COE EM 1110 ـ 2 ـ 2901,1997) 3ـ 107

الشكل 3ـ 42: (a) تفصيل منظومة بطانتين من أجل التحليل، (b) العزوم والقوى 3ـ 108

الشكل 3ـ 43: منحنى الطاقة ـ التفاعل 3ـ 109

الشكل 3ـ 44: البحر الفعال مقابل زمن الإنجاز (Brekke and Howard,1972) 3ـ 112

الشكل 3ـ 45: تفاصيل المجموعات المطواعة (اللينة) عند Yacambu (أخذ عن Bickel et Al., 1996) 3ـ 116

الشكل 3ـ 46: علاقة الالتقاء/المسافة خلف واجهة العمل والضغط الأرضي من أجل الصخر الضعيف النوعية بغطاء مقداره 1200 م (أخذ عن Senthivel,94) 3ـ 117

الشكل 3ـ 47: الممرات الرأسية لمنظومة الـــ NATM (البطانة الخرسانية النهائية غير مسلحة) 3ـ 119

الشكل 3ـ 48: التمثيل التخطيطي لقيسون رفع الوحل، a) الحفر بواسطة الدلو على شكل محارة، b) بواسطة الهواء (الشفط الهوائي). 3ـ 120

الشكل 3ـ 49: التركيب النموذجي للخوابير الصخرية وشبكة الأسلاك والخرسانة المقذوفة، مترو واشنطن 3ـ 121

الشكل 3ـ 50: مخطط المعامل Cdt من أجل نفق في التربة 3ـ 124

الشكل 3ـ 54: التعاقب العام للتنفيذ المستخدم بشكل نموذجي لمنشآت الأنفاق بطريقة القطع – و – التغطية (بعد Bickel et al. 1996) 3ـ 128

الشكل 3ـ 55: مقطع نموذجي لحفر وتغطية النفق 3ـ 138

الشكل 3ـ 56: مقاطع عرضية نموذجية للأنفاق المثقوبة 3ـ 138

الشكل 3ـ 57: مثال المقطع المستطيل 3ـ 139

الشكل 3ـ 58: مثال لمقطع قوسي 3ـ 139

القسم الأول
هيدرولوجيا الطرق السريعة

1-3 نطاق البحث

يؤمن هذا القسم متطلبات تصميم وتنفيذ الأنفاق.

تتضمن هذه الاشتراطات نواحيَ مهمة مثل التهوية، والحماية من الحرائق، والإنارة والأمان والتصريف، بالإضافة إلى متطلبات تصميم الأنفاق.

2-3 الغاية

إن غاية هذا القسم هي التركيز على زيادة معرفة المهندسين بالحد الأدنى من متطلبات تصميم الأنفاق، وتخطيط التنفيذ، والوقاية من الحرائق، والتهوية، ومنظومات الإنارة وتصريف المياه.

3-3 التعريفات والاختصارات

AADT:

الإحصاء السنوي لمتوسط الحجم المروري اليومي.

ACI :

معهد الخرسانة الأمريكي.

ADS:

المنظومة المضادة للانسحاب.

BEM:

طريقة العناصر الحدودية.

BS5400:

المقاييس البريطانية لتصميم وتنفيذ الجسور الحديدية، والخرسانية والمركبة المستخدمة في الطرق السريعة والسكك الحديدية.

CIE:

الوكالة الدولية للإنارة.

DMRB:

دليل تصميم الطرق والجسور.

FDM:

طريقة الفوارق المحدودة.

FOSD:

الحد الأقصى لمسافة الرؤية للتجاوز.

HGVs:

عربات البضائع الثقيلة.

IES:

جمعية هندسة الإنارة.

NATM:

الطريقة النمساوية الجديدة لشق الأنفاق.

NFPA:

الجمعية الوطنية للحماية من الحرائق.

RDS:

منظومة البيانات اللاسلكية (الراديوية).

SBC:

الكود السعودي للبناء.

SEM:

طريق الحرف التتابعي.

SSD:

مسافة الرؤية للتوقف.

TBM:

آلة ثقب (حفر) الأنفاق.

TDSCG:

المجموعة الاستشارية لتصميم وسلامة الأنفاق.

4-3 التخطيط

1-4-3 التقييم بين الخيارات

يجب أن يؤخذ خيار النفق للطرق الجديدة في الحسبان من أجل اجتياز حاجز فيزيائي كسلسلة جبلية أو نهر، أو مناطق تكون عرضة للانهيارات الجليدية، أو الانزلاقات الأرضية، أو الفيضانات أو الهزات الأرضية. كما يجب أن تؤخذ الأنفاق في الحسبان لأسباب بيئية (تقليل الضجيج، أو التلوث، أو التداخل المرئي)؛ ولحماية المناطق ذات القيمة الثقافية الخاصة (للحفاظ على الأحياء أو الأبنية)؛ أو لأسباب محيطية (تجنب الجماهير أو التجمعات، أو لتحميل موقع المنطقة السطحية).

إن تخطيط وتصميم خيارات الأنفاق يجب أولاً أن يكون وفق معايير الطرق السريعة كما هو الحال لخيارات الطرق المفتوحة، باستثناء فروقات تتضمن: رأس المال، وتكاليف التشغيل والعمر الكلي، التهوية، متطلبات الإنارة والصيانة. كما أن طبيعة ومزيج العربات في التدفق المروري سيؤثر في التصميم الفيزيائي للأنفاق.

إن الحسنات الخاصة لمختلف الخيارات هي:

1. الموارد المالية الداخلية: تحديد التكلفة الأساسية، وتكاليف التمويل، وتكاليف التشغيل والصيانة، وتكاليف التحديد، مقابل العوائد (إن وجدت).
2. المنافع الخارجية المكلفة: قيمة المرفق من ناحية الوفورات إلى التكاليف المباشرة والاجتماعية خارج المشروع.
3. المنافع الخارجية غير محسوبة التكاليف: الصيانة، البيئة، المنافع الاجتماعية غير محسوبة التكاليف.
4. إعداد المظاهر: يقيم المشروع كمساعد ضروري للتطورات المرغوبة الأخرى.

3-4-2 أسس تشغيل الأنفاق

يؤخذ في الحسبان نوعان اثنان لتشغيل الأنفاق:

1. أنفاق مع موارد ومنشآت إدارة تشغيل مكرسة خصيصًا لها؛ تحتفظ بمسؤولية مراقبة الحركة المرورية والتشغيل الآمن للنفق، متضمنة الاستجابة للحوادث والحالات الطارئة.
2. أنفاق مصممة لتعمل كمرافق بشكل ذاتي بالكامل، دون فريق عمل دائم للتشغيل والمراقبة، إذ تسمح مثل هذه الأنفاق بالمرور الحر لعربات البضائع الخطرة العاملة ضمن القانون. وإن انحراف مثل هذه العربات عن منظومة الطرق الحرة قد ينقل الخطورة إلى مواقع غير مزودة بمرافق للتعامل مع أي حادث طارئ ينطوي على حريق أو انسكاب السوائل.

3-4-3 التخطيط المالي

يجب إنشاء مشاريع الأنفاق لعمر طويل يتراوح بين (100 إلى 150 سنة). ويجب أن يأخذ التخطيط المالي في الحسبان كما يلي:

1. فترة الإعداد، عندما تزداد التكاليف بنسبة صغيرة من قيمة المشروع، بينما تقل الخطورة عن مستواها الابتدائي «التقديري».
2. فترة الإنشاء، عندما يحدث الإنفاق الرئيس مع انخفاض خطورة الإنشاء الواضحة تدريجيًا باتجاه الصفر عند الاكتمال، أو سريعًا بعد ذلك بالنسبة لتداعيات الإنشاء.
3. فترة التشغيل، عندما تتم تغطية التكاليف من العوائد أو بشكل نظري. وبالنسبة لمشاريع البناء، والتشغيل والنقل، فهي تعني فترة العائد من التشغيل على الانتقال إلى ملكية الدولة.

3-4-4 مسائل التوفير المتعلقة بالتخطيط

إذا كان هناك طرف آخر سيأخذ على عاتقه المسؤولية عن التصميم (مثال ـ التصميم ـ البناء ـ التشغيل)، فإنه يتم إعداد اشتراطات من أجل الاستمرار في تطوير التخطيط، وذلك لمنع التوقف عن التفكير بذلك، إذ سيكفل هذا بأنه سيتم تحصيل المنافع من الطرق المبتكرة التي تحتاج للاستمرارية في التطور في تصميم المشروع.

ويجب أن تأخذ تقديرات التكاليف في الحسبان الترتيبات التعاقدية على النحو التالي:

1. بالنسبة لمفهوم المشاركة ـ يتم إبداع أفضل الطرق للتعامل مع أماكن الخطورة؛ مع تحقيق أفضل التداعيات المتعلقة بمراقبة التكاليف.
2. عندما يأخذ المقاول على عاتقه الخطورة الجيولوجية وخطورة التنفيذ ـ تحسب التكاليف على أساس السيناريو الأسوأ والأخطر، مع هامش لإمكانية المقاضاة. ومن دون وجود مشاركة عادلة في الخطورة، فإنه لا يمكن تحقيق منافع مالية محتملة لعملية قوية، ومن هنا تبرز الحاجة إلى زيادة المخصصات عن زيادة التكاليف.
3. يجب إعداد تقديرات التكاليف في سنة الإنفاق بالريال السعودي، مع حساب التضخم وصولًا إلى منتصف مرحلة التنفيذ، مع الأخذ في بالحسبان بعض التخصيص لحالات عدم الالتزام بالجدول.
4. يجب تضمين حالات طارئة معقولة ضمن تقدير التكلفة الكلية للمشروع. ويتم اقتراح بأن تكون الطوارئ التالية مشمولة.

- طوارئ التنفيذ المتعلقة بنمو التكلفة خلال التنفيذ.
- طوارئ التصميم بناء على مستويات مختلفة من اكتمال التصميم.
- طوارئ الإدارة ككل الخاصة بطرف ثالث وتغييرات أخرى غير متوقعة.
- طوارئ أخرى خاصة بالمناطق التي قد تظهر احتمالاً عاليًا للخطورة والتغيير؛ ومثال ذلك:

التلطيف البيئي، المرافق العامة، والتصاميم عالية التخصص، إلخ.

5. يجب أن تأخذ تقديرات التكاليف في الحسبان التأثير الاقتصادي للمشروع الرئيس في المنطقة الجغرافية المحلية؛ ومثال ذلك، قد «يجبر» منتجو المواد الذين يتنافسون مع بعضهم بعضًا في الظروف العادية إلى تشكيل فريق مع مشترك من أجل تلبية متطلبات المشروع الرئيس. كما يمكن لصفقات الإنشاءات الكبيرة للغاية أن تخفض عدد المقاولين القادرين على المناقصة على المشروع، وقد تحتاج إلى تقسيمها إلى عقود أصغر لجذب تنافس إضافي. وإن خيارات المناقصة (مشتريات متزامنة متشابهة مع إمكانية الترسية)، يجب أن تؤخذ في الحسبان من أجل تحقيق وفورات محتملة في التكلفة الناتجة عن الاقتصاد في المصاريف وخفض الحشد للمشروع. ويجب إنجاز تحليل القيمة على المشروع لتحديد الطريقة الأكثر اقتصادية وإيجابية لإعداد العقود من أجل إعلان المشروع.

3-4-5 فاعلية التوقع أو التنبؤ

بالنسبة للمشاريع التي تجرى تحت سطح الأرض، فإن طبيعة الموقع الخاصة بالموقع تضاعف إلى حد بعيد الشكوك بالتنبؤات المالية. وإن مناطق الشك الرئيسة، المبينة أدناه، يجب أن تكون محددة في التقديرات:

- السياسات.
- كفاءة وجدول أعمال مصدر التقديرات.
- توقيت الاكتمال.
- تطور المشاريع المنافسة / التكنولوجيا (التقنيات الحديثة).
- المجالات والمؤهلات.
- الانتباه إلى ظروف الخطر.
- التغيرات المحتملة في الاحتياجات.
- العلاقات التعاقدية.
- عملية المناقصة.

5-3 الدراسات والتحريات

1-5-3 عام

يجب القيام بالتحريات للحصول على البيانات من أجل التخطيط، والتصميم والتنفيذ، والصيانة.

2-5-3 تحريات ظروف الموقع

يجب القيام بتحريات حول ظروف الموقع لاختيار مسار النفق، والحكم على ملاءمة النفق، وقياس النفق، ويجب أن تغطي الظروف المحلية على طول مسار النفق المتعلقة بـ:

1. استخدام الأرض وحقوق الملكية، ويشمل ذلك الصكوك العقارية والعقود على استخدام الأرض على السطح وتحت الأرض، بالإضافة إلى خطط التطور المستقبلية على طول المسار، متضمنة مقاييسها وجداولها الزمنية.
2. صنف الطريق وحالات المرور؛ للمساعدة في تحديد مواقع الممرات الرأسية.
3. صعوبة استخدام الأرض من أجل التنفيذ؛ مثلاً، ساحة الإنشاء حول الممرات الرأسية.
4. ظروف البحيرات والبحار؛ ويشمل ذلك المقطع العرضي، منشآت الضفاف الخاصة بها،...إلخ.
5. توفر الطاقة وقدرتها، ووصلات المياه والبواليع من أجل التنفيذ.

3-5-3 تحريات العوائق

يجب إجراء تحريات حول العوائق لتحديد البنود التالية:

1. المنشآت السطحية وتحت السطحية الحالية، ويشمل ذلك نوع الأساسات، والتسويات، والمنشآت ذات التجهيزات الحساسة.
2. المرافق تحت السطحية الحالية.
3. الآبار المستخدمة والآبار المهجورة لتقدير خطر انفجار أو تسرب الطين، الهواء قليل الأوكسجين.
4. مواقع المنشآت المزالة والأعمال المؤقتة، ويشمل ذلك التربة الملوثة والمياه الجوفية.

4-5-3 التحريات الجيولوجية والجيوتكنية

يجب إجراء التحريات الجيولوجية والجيوتكنية لتحديد طبوغرافية الأرض، والتشكيلات الجيولوجية، وحالات التربة، والمياه الجوفية. وقد تم تلخيص متطلبات التحري الخاصة لطريقة التنفيذ في الجدول رقم 3 - 1. ويجب أن يكون مستوى الجهود الجيوتكنية كما هو موصى به من قبل (Tunneling US National Committee on USNC/TT,1995)، حيث إن أهم توصيتين هما:

1. يجب أن تكون ميزانية استكشاف الموقع بمعدل 3% من الكلفة التقديرية للمشروع.
2. يجب أن تكون قواعد الحفر بمعدل 0.5 م طولي من الحفرة لكل مسلك (m) نفقي.

الجدول رقم 3 - 1: متطلبات التحري الخاصة المتعلقة بطريقة التنفيذ (أخذت عن Bickel et al)

طريقة التنفيذ	متطلبات خاصة
آلة ثقب الأنفاق TBM في الصخر	بيانات لتحديد تكاليف آلة القطع، معدل الاختراق، الزمن المتوقع للإنجاز لتحديد فيما إذا كان هناك حاجة للحفارة من النوع المفتوح أو الحفارة ذات الرأس الدوار، وكان هناك جريان مياه جوفية.
آلة ثقب الأنفاق TBM للواجهة المضغوطة	التقديرات الموثوقة لضغوط المياه الجوفية، قوة الـTBM ونفاذية التربة المراد تنفيذ النفق فيها. التوزيع المتوقع للحجم وكمية الجلاميد، وتوصيف حالات الواجهات المختلطة.
الغاطسة الطرقية	بيانات عن التشققات الصخرية لتقييم فيما إذا كانت الغاطسة الطرقية ستسحب كتلاً متشققة للخارج، أو يجب أن تطحن الصخر بعيدًا. بيانات عن قساوة الصخر الأساسي لتوقع تكاليف آلة القطع والسحب.
الأنبوب المغمور	بيانات التربة من أجل تصميم المنحدرات المجروفة، وتوقع ارتداد الخندق المجروف، وهبوط منشأة الأنبوب المغمور المكتملة، ويجب أن يؤكد الاختبار معامل الارتداد (المرونة والانضغاطية) ومعايير القوة غير المحملة. تحديد قوة التربة للتحقق من الميل والتحمل. التحري للتأكد من أنه قد تم تحديد وتوصيف ورصد كل العوائق المحتملة والسلاسل الصخرية، وتوصيف الأرض الملوثة.
الحفر والتغطية	استكشاف المشروع لتحديد أفضل موقع وأقل التكاليف للتغيير من الحفر والتغطية إلى التنفيذ الحقيقي لمنجم النفق.
تنفيذ الممرات الرأسية	حفر واحد عند كل موقع مقترح للممر الرأسي.
الوصول والتهوية للممرات الرأسية الدائمة الأخرى	بيانات تصميم التدعيم الدائم وقياسات التحكم بالمياه الجوفية. حفر واحد لكل ممر رأسي.
حل المنجم	الكيمياء لتقدير معدل الرشح؛ عينة غير مخربة من أجل تجربة الزحف طويل الأمد من أجل تحليل استقرار تجويف الحفرة.
رص الأنابيب والأنفاق النحيفة	بيانات للتنبؤ باحتكاك السطح البيني للتربة ولتحديد طريقة حفر الأنفاق النحيفة واحتياجات التدعيم عند النفق الأفقي.
الهواء المضغوط	ثقب مسار التفحة النفقية؛ حقن الثقب لكي لا يتم فقد الهواء المضغوط أعلى السير القديم شريطة أن يلاقي النفق فتحة النفق القديم.
التنفيذ البابي	بيانات لتحديد موقع المدخل وتصميم المنشأة المؤقتة والنهائية للمدخل.
NATM طريق شق الأنفاق النمساوية الجديدة	بيانات جيوتكنية شاملة وتحليل للتنبؤ بسلوك الأرض وتصنيف حالات الأرض ومنظومات الاستناد الأرضي إلى أصناف بناءً على السلوك.

3-5-5 التحري من أجل الوقاية البيئية

يجب تحري البنود التالية حيثما تظهر الحاجة، لوقاية البيئة،خلال وبعد إنشاء النفق.

- **الضجيج والاهتزاز**: يجب مراقبة كليهما قبل وخلال الإنشاء لتقدير ما هو ناتج فقط عن إنشاء النفق.
- **حركات الأرض**: يجب مسح ومراقبة حالة الأرض والمنشآت على طول المسار، خلال وبعد الإنشاء، لقياس درجة رفع الأرض وانخفاسها والتأثير على المنشآت على طول مسار النفق.
- **المياه الجوفية**: يجب مسح استخدام الآبار، ومستوى المياه ونوعية الآبار، ومياه الينابيع في محيط التأثير. ويجب مقارنة وقت المسح والإنشاء لحساب التقلب الفصلي في مستوى المياه الجوفية.
- **الهواء قليل الأوكسجين والغازات الخطرة كالميثان**: ينتج الهواء قليل الأوكسجين عن تأكسد محتوى الحديد والمواد العضوية في التربة، وقد تدفع داخل الآبار المجاورة والتسويات عن طريق استخدام طريقة حفر الأنفاق بالترس العامل بالهواء المضغوط.

  من ثم، فإنه يجب تحري مواقع الآبار، ومستويات مياهها ومنشآت التسويات المتوقع تأثرها، حيث يجري التحري قبل الإنشاء، ويجب مراقبة تسرب الهواء قليل الأوكسجين خلال الإنشاء. ويجب تحري وجود الغازات الخطيرة كالميثان قبل الإنشاء عن طريق الحفر. وإذا ما اكتشفت فإنه يجب قياس ومراقبة تركيزها قبل وخلال الإنشاء.
- **الحقن الكيميائي:** يجب مسح ومراقبة نوعية المياه في الآبار والأنهار التي يتوقع أن تتأثر بتسرب الملاط الكيميائي المحقون، أو الطين من حفر النفق بالترس، للبحث عن أي تغيرات خلال الإنشاء.
- **نواتج الإنشاء الثانوية:** يجب التشجيع على تخفيض وإعادة تدوير نواتج الإنشاء الثانوية في عمليات الإنشاء الصقيل والمحافظة على البيئة.

6-3 الحسابات التصميمية

1-6-3 متطلبات الطرق السريعة

تتغير متطلبات الطرق السريعة بالنسبة للأنفاق الطرقية تبعًا لحالة النفق وصفته (حضري، أو بين المدن، أو غائص بالماء، أو جبلي)، وفيما إذا كان طويلاً أو قصيرًا.

ويجب أن تكون المقاييس بالنسبة لعرض المسرب والكتف، والخلوص الرأسي للطرق السريعة، محددة بواسطة FHWA، AASHTO تبعًا للتصنيف (الشكل -13).

1-1-6-3 عام

بالإضافة إلى عرض حارات التنقل، فإنه يجب تأمين أكتاف على اليسار واليمين بشكل مستوي مع سطح الرصيف الطرقي. ويجب زيادة الخلوصات الأفقية على الأنفاق المنحنية لتأمين مسافات الرؤية قبل جدار النفق. وبدلًا من أرصفة الصيانة، فيتم استخدام دائرة تلفزيونية مغلقة خاصة بالمراقبة، ويتم إغلاق المسارب عندما يتطلب الأمر الوصول للصيانة.

2-1-6-3 الأنفاق الحضرية

يجب تبني الخط الأكثر استقامة من الناحية العملية، كما يجب تقييد المنحدرات، إن أمكن، إلى أقل من 3. 4%، لأن المنحدرات السحيقة تؤدي إلى نشوء اختناق عندما تكون المركبات الكبيرة المحملة جدًّا تصعد هذه المنحدرات.

3-1-6-3 أنفاق الطرق السريعة الحضرية

يجب أن يطابق خط النفق وميوله المعايير المحددة للطرق الحصرية: خطوط الرؤية المناسبة للسرعة التصميمية يجب أن تتطلب اهتمامًا خاصًا، خصوصًا عندما تكون المنحنيات الرأسية ضرورية. ويجب أن تكون السرعة التصميمية أكبر من 97 كم/الساعة، ما لم يتم التقييد في المناطق الحضرية؛ ويجب ألا يقل نصف القطر الأدنى للانحناء عن 457م.

4-1-6-3 الأنفاق الغائصة في الماء

يجب أن يكون الخط ثابتًا تقريبًا بزوايا قائمة مع المجرى المائي لتخفيض طول النفق إلى الحد الأدنى، ما لم تفرض طوبوغرافية الوادي مسارًا آخر. وكما هو الحال مع الأنفاق الحضرية، فإن أي ميل يتجاوز 3. 4% يبطئ المرور الثقيل بشكل غير متكافئ. وسيتضمن المقطع الطولي للنفق عادة ميلًا تنازليًا، وميلًا متوسطًا أفقيًا تقريبًا، وميلًا تصاعديًا. ويجب أن تكون المنحنيات الرأسية المطلوبة عند تغييرات الميول طويلة بالمقدار الذي يمكن إجراؤه، لتبسيط الإنشاء إذا تم استخدام الترس، ولتجنب حصر خط الرؤية في النفق القريب من تغير الميل.

5-1-6-3 الأنفاق الجبلية

يجب أن يكون الشكل الهندسي مرتبطًا بالطوبوغرافيا والجيولوجيا من أجل تصميم وضمان استقرار الحفريات، والطوابق الترابية، والجسور العالية والمداخل المؤدية للأنفاق.

2-6-3 هندسة خط المركز

تتضمن العوامل الأساسية المحددة لخط المركز:

1. المواقع النسبية للمداخل وتوجيهات الاقتراب من النفق.
2. الجيولوجيا.
3. الخلوصات من العوائق الخارجية.
4. الميول.
5. المنحنيات الرأسية.
6. المنحنيات الأفقية.

1-2-6-3 طرق الاقتراب

بالنسبة للأنفاق القصيرة جدًّا والبسيطة، يتراصف النفق بخط مستقيم ضامًّا معه المداخل، وإلا فإنه يتم إدخال منحنيات لتناسب طرق الاقتراب من النفق، وتتغير ميول النفق تحت العوائق وحولها.

3-2-6-2 الجيولوجيا

إن اختيار الطبقة الأكثر مناسبة لحفر النفق سيؤثر في المسار، كما هو الحال عند تجنب الأرض الحاملة للمياه أو الصخر غير المستقر.

3-2-6-3 الخلوص من العوائق الخارجية

كتعميم فإنه يكون مقبولاً عادة أن تمتد الأرض المنتظمة الممهدة خارج النفق بمقدار قطر نفق واحد، ويلزم تحليل أكثر حذرًا إذا حدثت انقطاعات وعوائق في هذه المنطقة.

3-2-6-4 الميول

يجب عدم استخدام ميول حادة لأنفاق الطرق السريعة؛ لأن المركبات الثقيلة تلجأ إلى استخدام أخفض مبدلات سرعاتها (الغيارات)؛ ما يؤدي إلى خفض الطاقة المرورية ورفع الطلب على نظام التهوية. ويجب أن تكون الميول مقتصرة على 3ـ 4%. ويجب تحديد حد أدنى للميل (عادة 0.25%) لضمان التصريف الطولي للطريق.

3-2-6-5 المنحنيات الرأسية

عادة تكون التغيرات في الميول صغيرة في أنفاق الطرق السريعة الواصلة بين المدن والأنفاق الجبلية، وتكون المنحنيات الواصلة قصيرة أيضًا، ويجب أن تتبع مواصفات الشكل الهندسي للطريق الملائم.

3-2-6-6 المنحنيات الأفقية

في المستوى، قد تكون المنحنيات ضرورية لمراصفة النفق مع الطرق المتصلة بها ولتجنب العوائق في الأرض. وتطبق الحسابات نفسها في تحديد نصف القطر كما هو الحال في الطرق السطحية، وهذه الحسابات هي: السرعة التصميمية، والقوة الطاردة المركزية، والواقع الإضافي، وخط الرؤية على المنحنيات الحادة جدًا، تكون بعض الزيادة في عرض المسرب للمركبات الطويلة أمرًا مرغوبًا فيه، لكنها قد تكون ذات تكاليف باهظة جدًا.

3-6-3 المقطع العرضي

3-6-3-1 عام

يتم تحديد المقطع العرضي بواسطة الحيز المطلوب للمرور، والحيز المطلوب للمرافق الأخرى، وبواسطة طرق التنفيذ.

3-6-3-2 الحيز المروري

يجب تحديد هذا الحيز بواسطة عرض الحارة المرورية والحد الأعلى لارتفاع حمولة المركبة. وسوف يتسع النفق العادي في الحد الأدنى لحارتين مروريتين. ولا تعدُّ الأنفاق ذات الثلاث حارات غير شائعة عندما يتم استخدام مقطع مستطيل، في طريقة الإنشاء القائمة على الحفر والتغطية، أو في الأنابيب المغمورة. إلا أنه لا يتم استخدام الشكل الدائري عادة من حارة لثلاث حارات أو أكثر.

3-6-3-3 المساحات الأخرى

لا تزال الأرصفة في بعض الأحيان تستخدم للتفتيش، والصيانة، والطوارئ للوصول إلى موقع حادث أو من أجل النجاة. ويمكن أن يكون الحيز الإضافي ضروريًا أيضًا لأقنية التهوية. وفي النفق الدائري، تكون الفراغات تحت الطريق وفوق خط الخلوص متاحة من دون حفر إضافي، وفي النفق بشكل حذوة الحصان يكون هناك عادة منطقة أساسية في أعلى النفق؛ لكن في المنشأة المستطيلة، يجب حفر عرض أو عمق إضافي. وفي العبارات النهرية، فإنه غالبًا ما يطلب استيعاب أنابيب المياه الرئيسة، أو أنابيب الغاز الرئيسة، أو كابلات الطاقة الكهربائية، أو الخدمات الأخرى. وتركب هذه الخدمات عادة في الحيز الواقع تحت الطريق في النفق الدائري، ولكن على حساب تخفيض المساحة المتاحة للتهوية وزيادة الطاقة الضرورية للمراوح للتغلب على الاحتكاك والاضطراب المتولدين.

3-6-3-4 الدراجين والمشاة

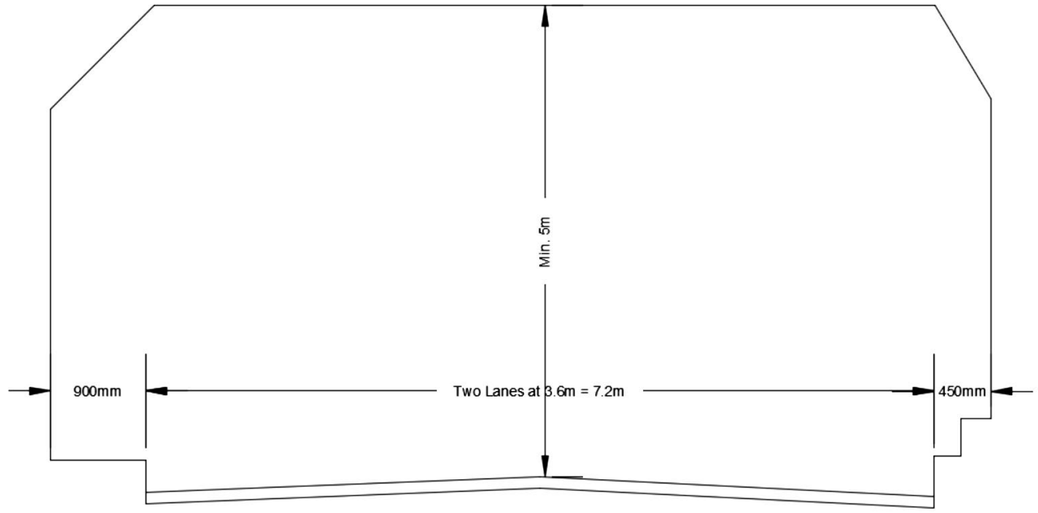
في عملية إنشاء بعض الأنفاق، يكون هناك طلب على وسائل عبور الدراجين والمشاة. وقد يكون هذا مكلفًا بشكل كبير إذا ما تم إدخالها في منظومة مرور المركبات.

إن الوسائل الأخرى، إضافة إلى التهوية، التي سيتم إدخالها في النفق هي خدمات للنفق نفسه، وهي: الإنارة، وخدمات الطوارئ كالهواتف وإنذارات الحرائق، وخطوط إطفاء الحريق، وأجهزة مراقبة جودة الهواء والرؤية، وأجهزة مخاطبة الجمهور، وأنوار وإشارات المرور، والتصريف والضخ. وينصح بالرجوع إلى National Fire Protection Association (NFPA) Standard 502 (2001).

3-6-3-5 متطلبات التنفيذ

إن شكل النفق الطرقي، سواء كان مستطيلًا، أو دائريًا، أو بشكل حذوة الحصان، تفرضه طريقة التنفيذ المختارة لتناسب ظروف الأرض.

بالنسبة لطريقة الحفر والتغطية، فإن الشكل المستطيل يكون مألوفًا، وبالنسبة للصخر الذي سيتم حفره بواسطة المتفجرات، شكل حذوة الحصان أو أي شكل قوسي، فإنه يكون شائعًا، وبالنسبة للحفر بواسطة آلة كاملة الواجهة، فإن الشكل الدائري عادة يكون مناسبًا، وبالمثل ينطبق ذلك على معظم الأنفاق الغاطسة (غير الأنفاق المغمورة) الموجودة في الأرض الطرية. وفي الأنفاق الجبلية الطويلة، يكون الميل الصاعد مفضلًا لتسهيل التصريف خلال التنفيذ، وفي الأنفاق ذات التروس المدفوعة، فإن المنحنيات الحادة، أفقيًا أو رأسيًا، تطرح صعوبات في توجيه الترس وبناء البطانة.



الشكل 3 - 1: خلوصات NORMA بالنسبة لطريق سريع رئيس بحارتي مرور

4-6-3 الطريقة الأساسية لتصميم التدعيم الأرضي

يجب أن يحقق التصميم تحت الأرض الفعالية، والاستقرار، والسلامة للفتحات تحت سطح الأرض خلال وبعد الإنشاء للمدة التي من المتوقع أن يبقى في المنشأ مؤديًا لعمله. لا يوجد معايير، أو خبرة، أو كود معترف بها من أجل تصميم المنشآت تحت سطح الأرض. ويطبق الكثير من المهندسين كودات مثل كودات وخبرات الـــACI لتصميم الخرسانة، لكن هذه الكودات والخبرات قد تم إنشاؤها للمنشآت فوق أسطح الأرض، وليس من أجل المنشآت تحت سطح الأرض، وتطبق أجزاء فقط من هذه الكودات على المنشآت تحت سطح الأرض.

غالبًا ما يقترب المصممون من تصميم النفق عن طريق البحث عن أساليب الانهيار التي يمكن تحليلها (مثال، دمج الانحناء والضغط في البطانة)، ثم يطبقونها على حالات أكثر أو أقل واقعية لكنها مفترضة (تحميل البطانة). وفي حين أن الانحناء والضغط قابلان للتطبيق على طرق انهيار البطانة، فإن العديد من طرق الانهيار الأخرى يجب تحليلها. ومن حيث المبدأ، فإنه يجب تحديد جميع أساليب الانهيار الواقعة، ثم يجب إيجاد الوسائل التي يمكن تحليل وتعديل (تلطيف) هذه الأساليب بها.

أساليب الانهيار هي أساليب السلوك التي يمكن أن تعد غير مقبولة من حيث الأخطار، أو الخطورة على التكلفة أو البرنامج الزمني خلال التنفيذ، أو من ناحية التأثير في البيئة، أو فشل الوظيفة على المدى الطويل. وبالنسبة للمنشآت تحت سطح الأرض، فإن فشل الوظيفة يعني أشياء مختلفة لأنواع مختلفة من المنشآت: كمية معينة من التسرب في نفق طريق سريع حضري يمكن أن يكون فشل في الوظيفة، بينما بالنسبة لقناة نقل مياه، فقد يكون مثل هذا التسرب مقبولًا تمامًا.

وقد تم أدناه إيجاز خطوات التصميم الخمسة الأساسية:

1. يتم تحديد المتطلبات الوظيفية بشكل عام. وهي تتضمن جميع المتطلبات الهيدروليكية والهندسية، والمتطلبات الثانوية والبيئية والقيود، والتموين، ومتطلبات الصيانة.
2. تجميع البيانات الجيولوجية والثقافية التي تتضمن جميع المعلومات المطلوبة لتحديد أساليب الانهيار المتوقعة وتحليلها، والبيانات الميدانية والمخبرية، والبيانات الثقافية لتحديد التأثيرات البيئية والقيود. وقد تتضمن هذه البيانات حدود حق أولوية الطريق، وإمكانية مواجهة الملوثات، وحساسية المنشآت للهبوطات.
3. تحديد أساليب الانهيار الظاهرية والمحتملة والتي تتضمن حوادث الإنشاء، والكفاءة غير المرضية على المدى الطويل، والانهيار لتحقيق المتطلبات البيئية. وتتضمن الأمثلة مشاكل عدم الاستقرار أو جريان المياه الجوفية خلال الإنشاء، وتآكل أو اهتراء زائد لعناصر تدعيم الأرض، أو تسرب زائد (داخل أو خارج)، والهبوطات التي قد تسبب خطورة على المنشآت الموجودة المجاورة.
4. تصميم التدعيمات الأرضية الأولية والنهائية. ويتضمن التدعيم الأولي جميع المنظومات المستخدمة للحفاظ على استقرار، وسلامة الفتحة خلال الإنشاء. وإن التدعيمات النهائية هي تلك المنظومات التي بحاجة للحفاظ على الفتحة فعالة من حيث العمر التصميمي للمشروع. وقد تشكل التدعيمات الأولية جزءًا من التدعيمات النهائية، أو قد تكون هي التدعيم النهائي (مثال، البطانة القطعية مسبقة الصنع المركبة خلف الـTBM).
5. تجهيز وثائق العقد. وهي تكوينات كل جهود التصميم، وقد تتضمن اشتراطات لتعديل إجراءات التنفيذ بناءً على المشاهدات.
6. وتتضمن وثائق العقد أيضًا جميع المعلومات الضرورية لعملية المناقصة التنافسية، ووسائل التعامل مع الدعاوى والمنازعات.

وللمزيد من المعلومات، يرجى الرجوع إلى.US Army COE Manual (EM 1110_ 2_ 2910,1997)

5-6-3 التأثيرات الزلزالية في الأنفاق

عمومًا، لقد واجهت المرافق تحت سطح الأرض درجة أقل من الضرر من المنشآت السطحية، لكن بعض المنشآت تحت السطحية كانت قد واجهت ضررًا كبيرًا أثناء الهزات الأرضية التي وقعت في العهد القريب، ويشمل ذلك: زلزال كوبي 1995 في اليابان، وزلزال تشيتشي 1999 في تايوان؛ وزلزال كوكيلي في تركيا. ويصف تقرير (/ITA) Hashash et al,2001 AITES الوسائل التي يستخدمها المهندسون في قياس التأثيرات الزلزالية في المنشآت تحت سطح الأرض. وهو يناقش مسائل تصميمية خاصة، تتضمن تصميم فواصل أجزاء النفق، والفواصل بين الأنفاق ومنشآت المداخل.

وبشكل عام فإنه يتم توصيف أحمال التصميم الزلزالية للمنشآت تحت سطح الأرض من ناحية التشوهات والإجهادات المفروضة من قبل الأرض المحيطة، بسبب التفاعل بين الأرض والمنشأة. وعلى النقيض من ذلك، تصمم المنشآت السطحية على قوى العطالة الناتجة عن التسارعات الأرضية.

وبشكل أساسي هناك ثلاث طرق للتصميم الزلزالي للمنشآت تحت الأرض:

1. الطريقة الأسهل وتتجاهل تفاعل المنشأة تحت الأرض المحيطة. ويتم تقدير التشوهات الأرضية الميدانية الحرة بسبب الحدث الزلزالي، ويتم تصميم المنشأة تحت سطح الأرض لتتلاءم مع هذه التشوهات. وتعد هذه الطريقة مرضية عند توقع مستويات منخفضة من الاهتزاز أو عندما تكون المرافق تحت سطح الأرض في وسط صلب كالصخر.

2. الطريقة شبه الساكنة (شبه إستاتيكية)، وتتضمن التشوهات الأرضية المفروضة كحمولة ساكنة (إستاتيكية)؛ إذ لا يتضمن التفاعل بين التربة والمنشأة التأثيرات الديناميكية أو الانتشارية.
3. وفي طريقة التحليل الديناميكي، يتم تولي التفاعل بين التربة والمنشأة باستخدام أدوات التحليل الرقمي، مثل طرق العناصر المحدودة أو الفوارق المحدودة.

7-3 حفر الأنفاق في الأرض الطرية

1-7-3 عام

تتطلب الأرض الطرية تدعيمًا بأسرع ما يمكن بعد الحفر، للحفاظ على استقرار الحفرية. وفي المناطق الحضرية المزدحمة، يكون من الضروري ضبط الهبوط لتجنب تضرر المنشآت الموجودة في الأعلى.

الجدول رقم 3 - 2: سلوك النفق: الرمل والحصى (Terzaghi,1977)

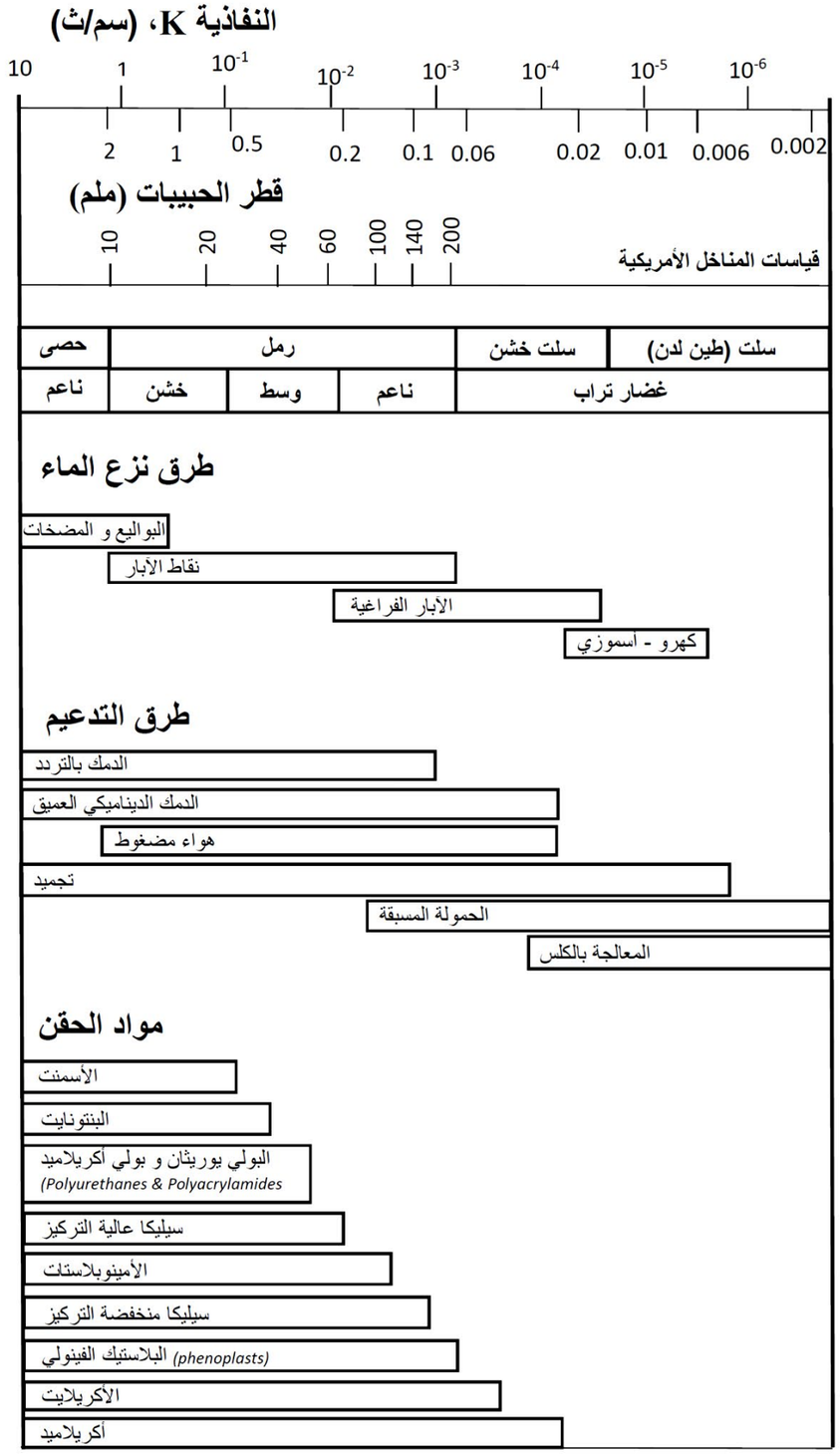
التسمية	درجة الدمك	سلوك النفق	
		فوق مستوى الماء	تحت مستوى الماء
رمل نظيف ناعم جدًّا	متفكك، N>10	متماسك يجري بسرعة انسلال	جاري جاري
رمل ناعم مع غضار رابط	متفكك، N>10 مكتنز، N>30	ثابت سريع الانسلال أو انسلال ببطء	جاري انسلال ببطء
رمل أو حصى رملية مع غضار رابط	متفكك، N>10 مكتنز، N>30	انسلال سريع ثابت	انسلال بسرعة أو جارٍ
حصمة رملية ورمل متوسط إلى خشن		أرض مائعة. منتظمة (Cu<3) ومتفككة (N<10) مواد بحبات مستديرة تجري بحرية أكثر من المواد المتدرجة بشكل جيد (Cu>6) والمكتنزة (N>30) بحبات ذات زوايا.	حالات جريان متراكبة مع تدفق مائي شديد إلى أبعد حد.

2-7-3 استقرار التربة والتحكيم بالمياه الجوفية

انظر إلى الطرق الأربع التالية للتحكم بالمياه الجوفية:

1. نزع الماء.
2. هواء مضغوط.
3. حقن.
4. تجميد.

يبين الشكل 3 - 1 الطرق القابلة للتطبيق للتحكم بالمياه الجوفية من ناحية نفاذية التربة وحجم الحبات. ويعد التحكم بالمياه الجوفية مهم أيضًا في أنفاق الأرض الطرية. بينما تزيد المياه الجوفية الموجودة فوق مستوى منسوب الماء من زمن الإنجاز في التربة الحبيبية، وتحت مستوى الماء، فإنها تخفض القوة الفعالة، ويمكن أن تسبب قوى التسرب انهيارا في مثل هذه التربة. وفي الترب المتماسكة، تحديد المياه الجوفية خواص القوة والحساسية، والانتفاخ، التي تحكم تصميم البطانة النهائية.



الشكل 3 - 1: طرق التحكم بالمياه الجوفية (بعد Karol 1990)

3-7-3 آلات حفر الأنفاق في الأرض الطرية

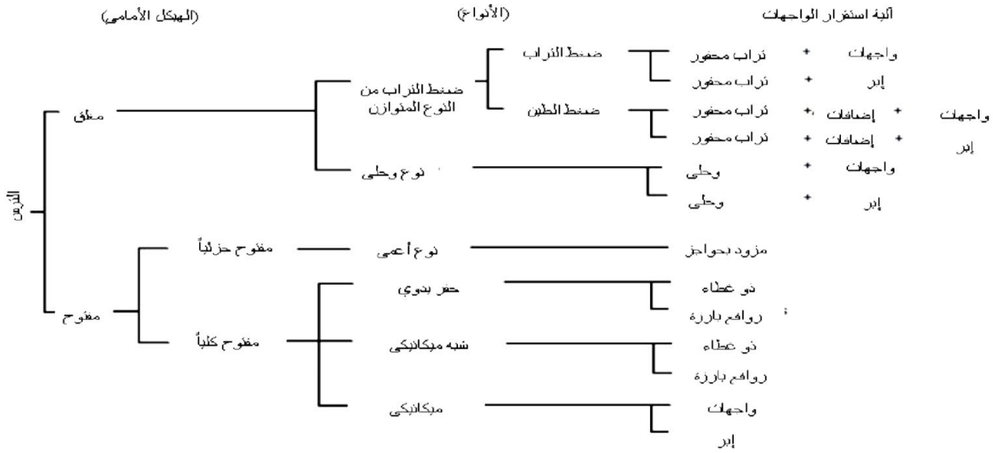
للتمكن من تنفيذ آمن واقتصادي للنفق في الأرض الطرية، فإن الـTBM واختيار الطريقة يجب أن يكون مبنيًا على اعتبارات مناسبة لظروف التربة، وظروف المياه، وظروف السطح، وحجم النفق، وطول فترة التنفيذ، ومسار النفق، ومنظومة التدعيم، وظروف الحفر، ومحيط الحفرة، وفترة التنفيذ.

ويبين الجدول التالي عائلة TBM الحالية من الآلات. ويجب ملاحظة أنه، إضافة إلى الـTBM المستخدمة في تنفيذ النفق الطرقي، فإن الجدول يتضمن تلك الآلات المستخدمة في مشاريع تنفيذ أنواع أخرى (أي، آلات رص الأنابيب والـSBU).

الجدول رقم 3 - 3: آلات ثقب الأنفاق (TBM) عائلة الآلات (منKessler & Moore)

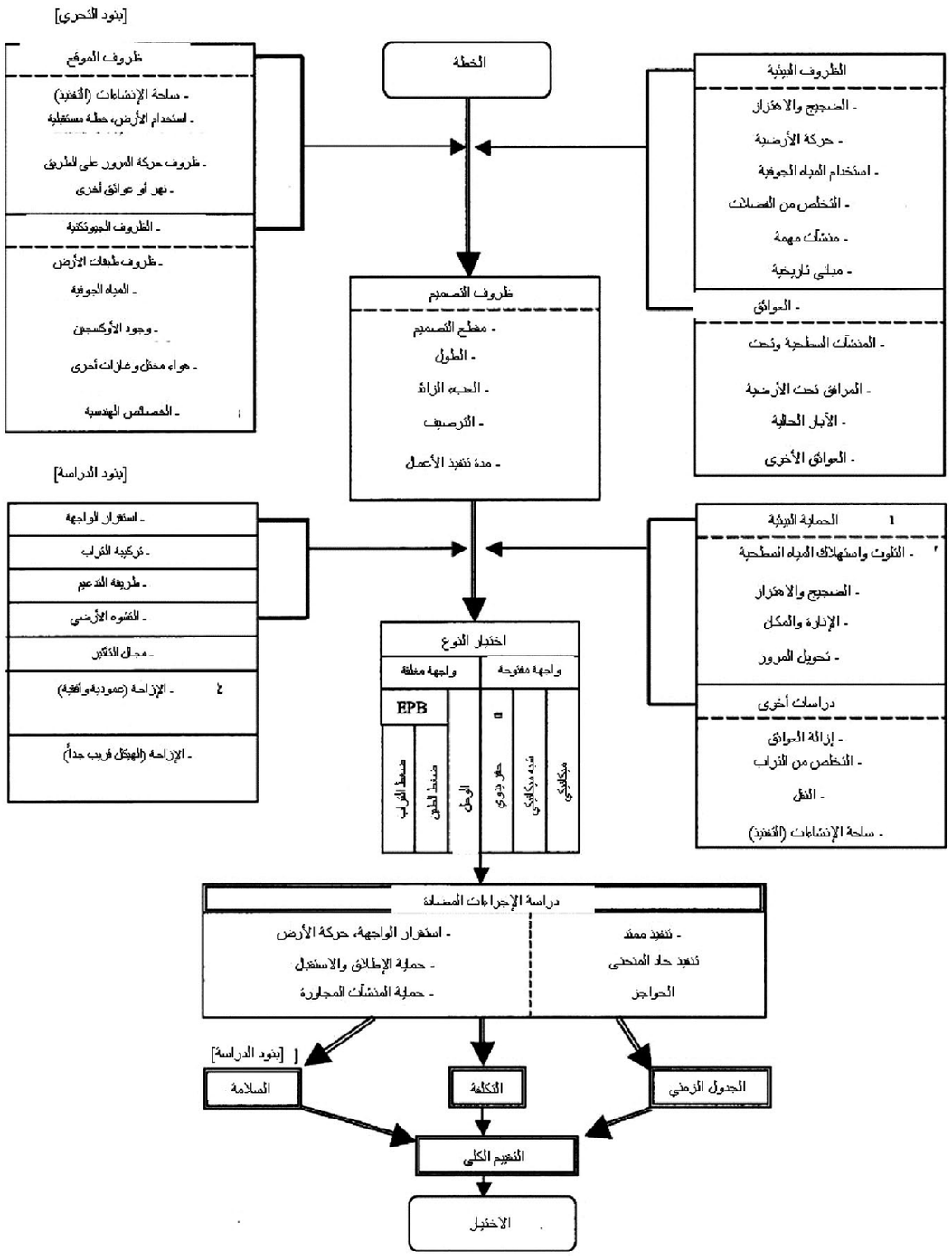
نوع الآلة	الأقطار النموذجية للآلة	حالة الأرض التي تكون الـ TBM أكثر مناسبة لها
آلات دمك الأنابيب	حتى 3 - 4م تقريباً	أي أرض
وحدة الثقب الصغيرة (SBU)	حتى 2م	أي أرض
آلات TBM ذات الترس	2 إلى 14 م+	أرض طرية فوق مستوى الماء
آلات TBM ذات واجهة خلط	2 إلى 14 م+	أرض مختلطة فوق مستوى الماء
آلات TBM للطين	2 إلى 14 م+	أرض طرية خشنة النسيج تحت مستوى الماء
آلات EPB TBM	2 إلى 14 م+	أرض طرية ناعمة النسيج تحت مستوى الماء
آلات TBM للصخر القاسي	2 إلى 14 م+	صخر قاسٍ
آلات TBM للتقوير	متنوع	صخر قاسٍ
آلات TBM متعددة الرؤوس	متنوع	متنوع

يلخص الشكل 3 - 2 الترتيبات المختلفة للتروس المفتوحة والمغلقة.
يقدم الشكل 3 - 3 هيكل عملية اختيار طريقة الترس.



الشكل 3- 2: أنواع التروس (أخذ عن JSCE,1996)

الشكل 3 - 2: أنواع التروس (أخذ عن JSCE,1996)

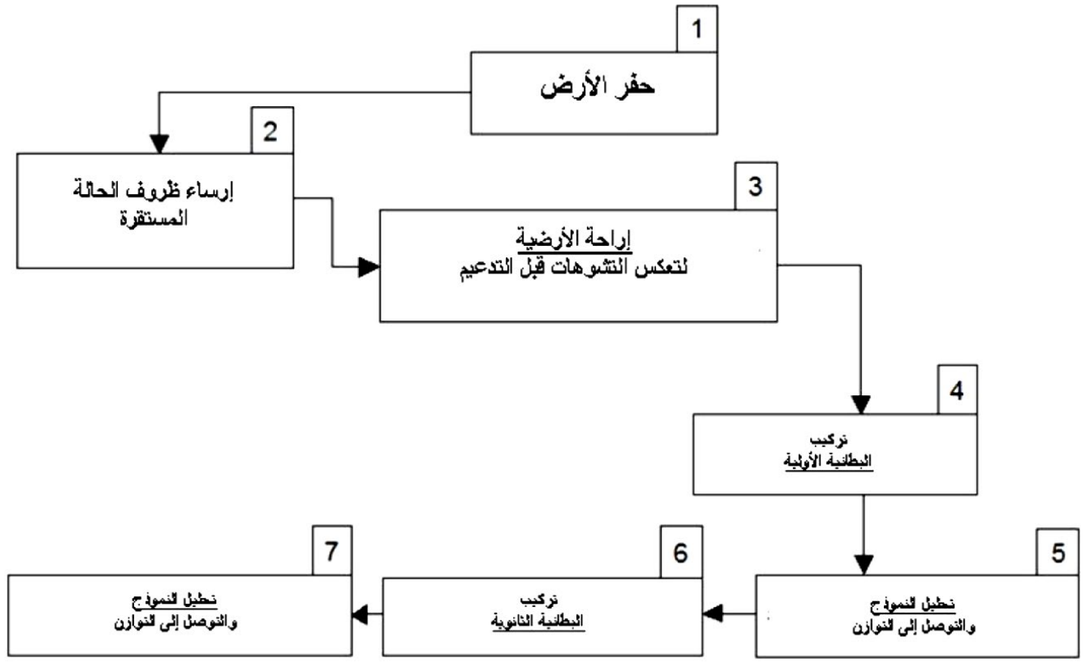


الشكل 3 - 3: الهيكل التنظيمي لاختيار طريقة الترس (أخذ عن JSCE,1996)

4-7-3 طريقة شق الأنفاق النمساوية الجديدة NATM/طريقة الحفر التتابعي SEM

إن طريقة شق الأنفاق هذه، المبتكرة من قبل الأستراليين في النصف الثاني من القرن العشرين، معروفة بشكل مختلف باسم: «طريقة شق الأنفاق النمساوية الحديثة» (NATM)، و"طريقة الحفر التتابعي" (SEM)، و"البطانة الخرسانية المرشوشة". وفي أنفاق الأرض الطرية، يجب أن يوضع تدعيم الأرض فورًا بعد الحفر. وطالما أن الأرض مدعمة بشكل صحيح، فإن طرق تنفيذ الـNATM تكون مناسبة لظروف الأرض الطرية.

يتم حفر وتدعيم النفق بشكل متتابع، ويمكن أن تتغير تتابعات الحفر. وفي أنفاق الأرض الطرية، يتم تركيب التدعيم الأولي للأرض على شكل خرسانة مقذوفة، عادة بعوارض متشابكة ونوع التسليح الأرضي، حالما يتواصل الحفر، متبوعًا بتركيب البطانة النهائية في موعد لاحق. ويكون التدعيم الدائم عادة، وليس دائمًا، بطانة خرسانية مصبوبة في المكان. وفي الحالات التي لا تفضل فيها ظروف الأرض الطرية واجهة مفتوحة ذات طول قصير من البطانة غير المكتملة مباشرة بعدها (أرض جارية أو أرض بزمن إنجاز قصير)، فإنه لا يتم إنشاء قوس أرضية. وما لم يتم تعديل ظروف عدم الاستقرار هذه بواسطة نزع الماء، أو السد، أو الحقن، أو أي طرق أخرى لتحسين الأرض، فإنه يجب اعتبار طرق شق الأنفاق مغلقة الواجهة بالترس هي المناسبة، وليس شقًا للأنفاق بالطريقة النمساوية الحديثة NATM. إن طريقة التصميم العامة لنمذجة عملية الحفر لنفق NATM مبينة في الشكل 3 - 4.



الشكل 3 - 4: نمذجة عملية الحفر (الطريقة 20 المعممة)

5-7-3 تدعيم وتبطين أنفاق الأرض الطرية

يجب تصميم بطانة للأغراض التالية:

1. تحميل الأحمال على النفق بشكل آمن، حيث البطانة الرئيسة هي المسؤولة عن سند الأحمال على النفق.
2. الحفاظ على وظيفة النقل بهدف استخدام النفق، وتسهيل صيانة وإدارة النفق حالما يتم وضعه في الخدمة. ويتطلب هذا دراسة قدرة البطانات على سد منافذ المياه، والعزل ضد الماء، والمتانة.
3. أن تكون مناسبة لحالات تنفيذ النفق. ويجب أن يتحمل الدوران الاندفاعي لتقدم الآلة ذات الترس، وأن تتحمل ضغط الردم الخلفي، وأن تعمل كمنشأة بطانة نفق فورًا بعد تقدم الترس.

ويجب الأخذ بالحسبان ثلاثة أنواع من منظومات التدعيم الأولي:

1. روافد (أعصاب ـ مورينات) وألواح (دفوف).
2. قطع خرسانية مسبقة الصنع، غير مثبتة ببراغٍ.
3. قطع خرسانية مسبقة الصنع مثبتة ببراغٍ (أو مسامير).

ويكون التفاعل بين منظومة التدعيم والأرض المحيطة أمرًا ضروريًا، ويعتمد على التماس البدائي بينهما لإيقاف الأرض عن الحركة (الانسلال، أو الجريان، أو القص، أو الانضغاط). ويتم الحصول على التماس (باستثناء الأماكن المدعومة بالخرسانة المقذوفة) عن طريق تمدد منظومة التدعيم، أو ملاط التماس بين سطح النفق المحفور ومنظومة التدعيم أو اجتماع الاثنين معًا.

1-5-7-3 مخطط بطانة مزدوجة

سيندمج النوعان الأولان من منظومة التدعيم الأولي وسيشتملان لاحقًا على البطانة النهائية المصنعة من الخرسانة المصبوبة في المكان، المستخدمة لتوفير الدعم للعمر التصميمي (مخطط الأعصاب والألواح)؛ وحصر بنية التصريف أو غشاء مانع التسرب (كلا المخططين)؛ وتوفير السطح الداخلي اللازم للنفق من أجل متطلبات المستخدم.

2-5-7-3 مخطط بطانة مفردة

إن المخطط الذي يشتمل على الأجزاء الخرسانية المسبقة الصنع المثبتة بالبراغي (أو المسامير) عادة لا يكون ذا بطانة نهائية، إلا إذا لزم متطلبات المستخدم واحدة اسمية منها.

6-7-3 التأثيرات السطحية لتنفيذ النفق

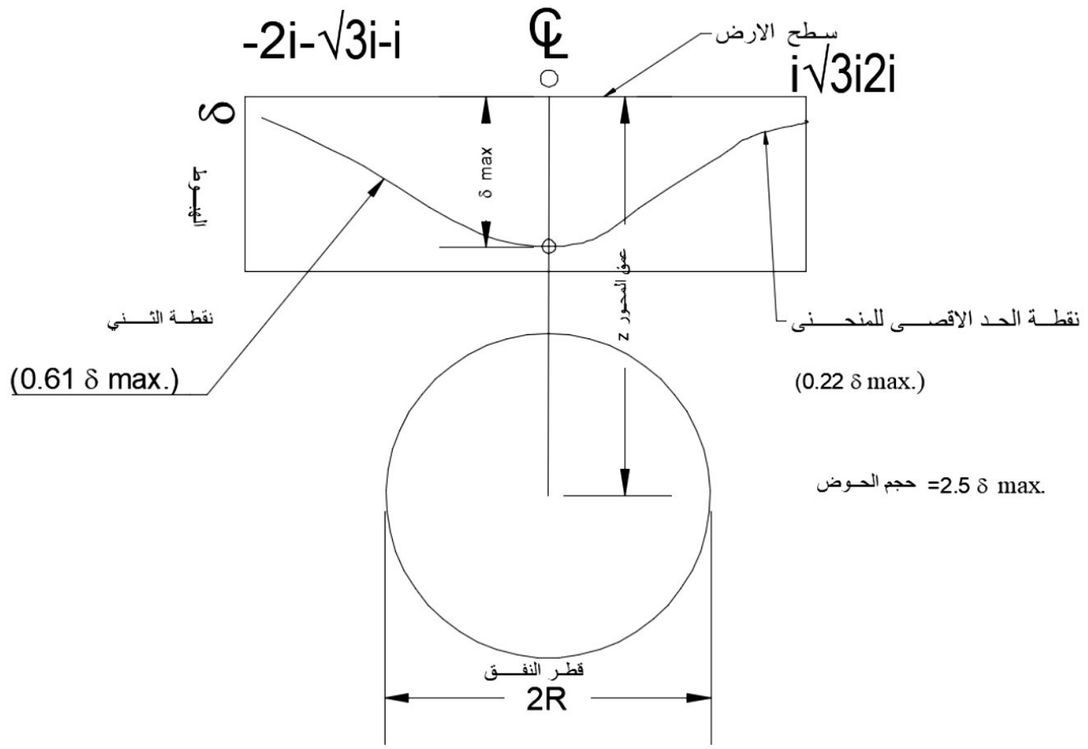
يجب أن يقلل مهندس النفق من مدى وتأثير الهبوطات المتعلقة بالنفق المتولدة عند سطح الأرض والمنشآت المعتلية للنفق (المقاول له أغلب السيطرة من خلال اختيار طرق وتجهيزات شق النفق). ويحدث هبوط مستوى الماء لأن النفق يعمل كمصرف للمياه الجوفية ويزيد الإجهاد الفعال، وهو ما يؤدي إلى الهبوط. وفي الرمل والحصى، تكون الهبوطات عادة صغيرة، ويجب التعامل معها بناء على نظرية المرونة. وفي الغضار، أو السيلت، أو أراضي السبخات، تكون الهبوطات عادة أكبر، ويجب التعامل معها بنظرية الارتصاص (الانضغاطية).

وإن الأشكال الثلاثة لانخساف الأرض في عمليات شق الأنفاق الأرضية في المناطق الطرية هي:

- انخسافات الواجهة ـ حركة التربة خارجًا أمام الترس وداخله، أو عبر الانسلال، أو التكهف، أو التدفق، أو الجريان، أو الانضغاط.
- الانخسافات عن الترس ـ حركة التربة عند الترس بين حافة القطع وذيل الترس، كنتيجة لجرف الترس، أو انحداره، أو تعرجه، ومن الفجوة المصنوعة بالقواطع العلوية.
- الانخسافات عند الذيل ـ حركة التربة باتجاه منظومة التدعيم عندما تترك ذيل الترس، وتنتج عن تحرك التربة لردم فجوة الذيل المصنوعة بواسطة صفيحة السطح الخارجي للذيل.
- توسع أو تمدد التدعيم غير المكتمل، وتأخر الحقن.

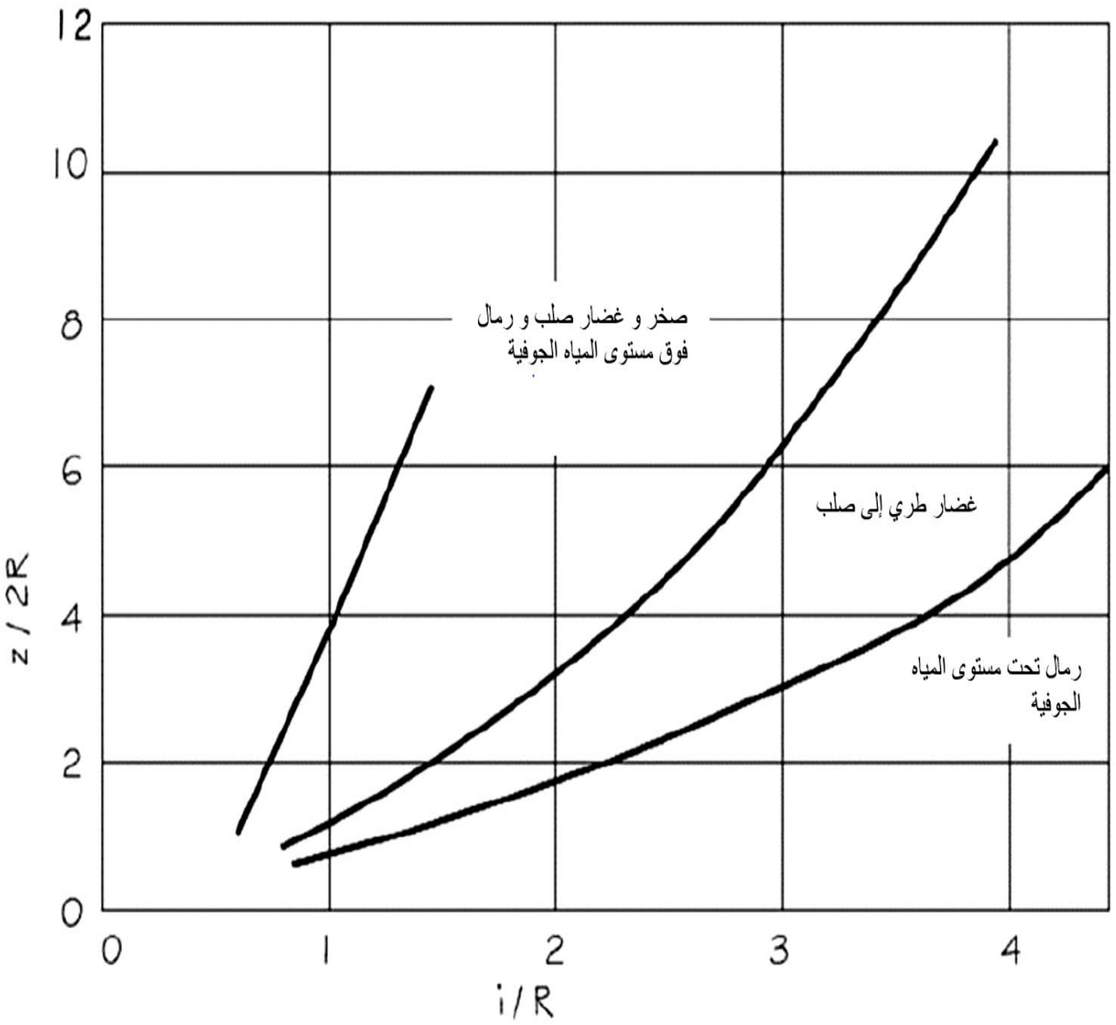
ويبين الشكل 3 - 5 خواص منحنى الاحتمال حسبما هو مستخدم لتمثيل المقطع العرضي لحوض الهبوط فوق النفق (انظر Bickel et al.,1996 لتفاصيل أكبر).

ويحدد الشكل 3 - 6 المعيار i، الذي يمثل عرض حوض الهبوط ـ المسافة الأفقية من الحد الأقصى لموقع الهبوط إلى نقطة انعطاف منحنى الهبوط. وإن الحد الأعلى لهبوط السطح يساوي حجم هبوط السطح مقسومًا على 2.5i.



تمثيل اقتران دلتة الخطأ لحوض الهبوط فوق النفق

الشكل 3 - 5: المقطع العرضي لحوض الهبوط فوق النفق (متبنى من قبل Peck,1969)



الشكل 3 - 6 : العلاقة بين عرض حوض الهبوط وعمق النفق (متبنى من قبل Peck,1969)

3-7-7 طرق حماية المباني

يجب أن يطلب مهندس الأنفاق استخدام طرق وتجهيزات شق الأنفاق التي تقلل من انخساف الأرض، وتشتمل على ما يلي :

- السيطرة الكاملة والمناسبة على الواجهة في كل الأوقات، خصوصًا عند دفع الترس.
- تحديد نسبة الطول إلى القطر بالنسبة للترس، التي تجعل السيطرة التوجيهية أسهل وتقلل من تأثيرات الانحدار والانعراج (الثني).
- التركيب السريع للتدعيم الأرضي.
- التوسع السريع، أو فرش الحصى بقياس حبة البازلاء، أو وصل ملاط التدعيم الأرضي.

وفي حالات خاصة، فإن الخطوات الأخرى قد تتضمن:

- استخدام الهواء المضغوط.
- الحقن المرصوص للأرض قبل شق النفق.
- الحقن المدكوك بين النفق والأساسات.
- تدعيم أساس المنشآت بمختلف الطرق.
- استخدام جدران الحماية، التي تتضمن: جدران الروبة أو الجدران الإنشائية من التربة ـ الإسمنت المدفونة أسفل النفق.

انظر Cording & Hansmire (1975) للاطلاع على أمثلة مفصلة عن القياسات الفعلية للحركات الأرضية حول الأنفاق في الرمل، انظر Palmer & Belshaw (1970,1980)للاطلاع على أمثلة مفصلة عن الحركات الأرضية حول الأنفاق في الغضار.

إن نتائج التفاوت الواسع لطرق التقييم الموجودة لتأثير النفق المولد للهبوط في الأبنية متناغمة بشكل مدهش، ويبين الجدول رقم 3 - 4 حدود الانحراف الزاوي لمختلف أنواع الأضرار المحتملة.

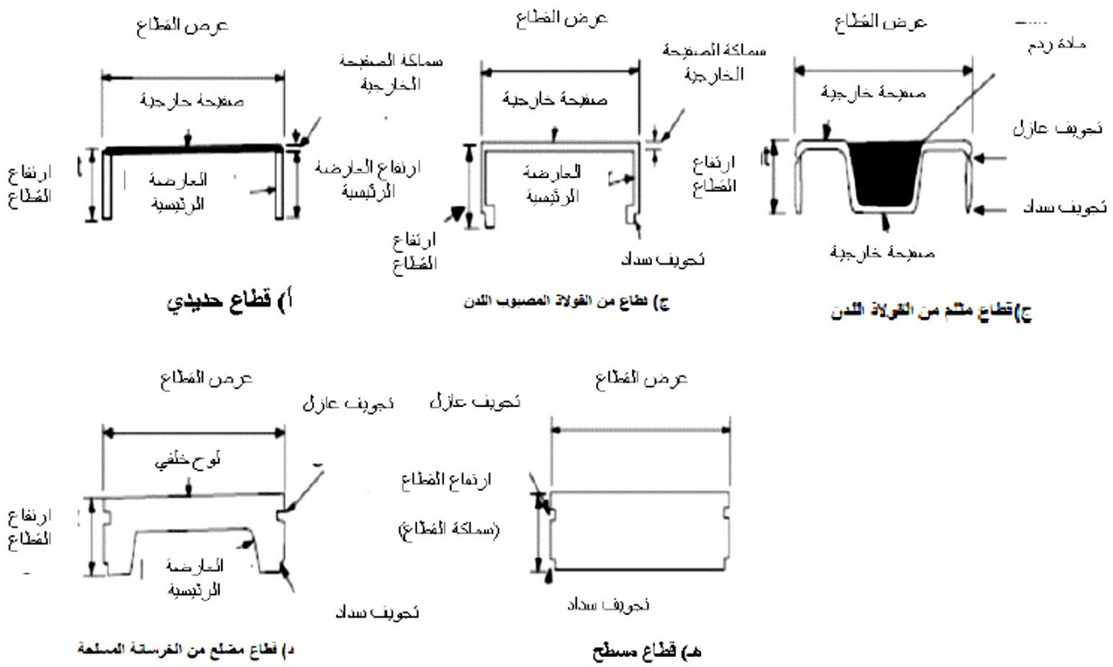
الجدول رقم 3 - 4: حدود الانحراف الزاوي (Wahls,1981)

صنف الأضرار المحتملة	الانحراف الزاوي
تضرر الآلات الحساسة للهبوط	1/750
الخطر على الإطارات ذات الانحرافات (الميول)	1/600
حد الأمان لعدم تشقق الأبنية (أ)	1/500
التشقق الأول للجدران المصنوعة من الألواح	1/300
صعوبات مع الرافعات الفوقية	1/300
اعوجاج الأبنية ذات القساوة العالية يصبح مرئيًا	1/250
التشقق الكبير للجدران المصنوعة من الطوب والألواح	1/150
خطر التضرر الإنشائي على المباني العامة	1/150
حد الأمان للجدران المصنوعة من الطوب (أ)	1/150

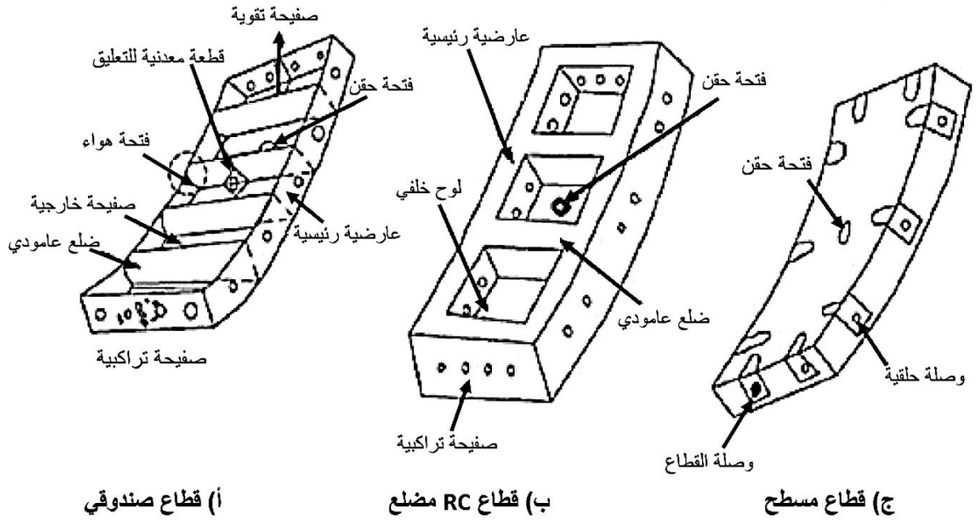
(أ) حد الأمان يتضمن عامل أمان.

8-7-3 تصميم بطانة الأنفاق للأنفاق المنفذة بواسطة التروس

يغطي هذا القسم المتطلبات الأساسية لتصميم بطانة الأنفاق بالنسبة للأنفاق المنفذة بواسطة التروس؛ وعندما تواجه أنفاقًا ذات مقطع عرضي دائري، مع تعديلات مناسبة، فإنها تكون قابلة للتطبيق على أشكال أخرى من الأنفاق المنفذة بواسطة التروس. وتعد الـ JSCE المعايير اليابانية لأنفاق التروس Japanese Standard for Shield Tunneling 1996)) مرجعًا ممتازًا. لاحظ أنه قد تم التعامل مع تصميم التدعيم الأولي وتصميم البطانات الدائمة النهائية في الفقرات 3-5-8 و 3-8-7، على التوالي.



الشكل 3 - 7: المقطع العرضي للقطع مسبقة الصنع



الشكل 3 - 8: أجزاء القطع

3-7-8-1 المصطلحات الفنية

1. أنواع القطع

يرد أدناه وصف للأنواع الخمسة للقطع وهي مبينة في الشكل 3 - 7 و الشكل 3 - 8:

1. القطعة من النوع الصندوقي: اسم عام للقطعة الفولاذية ذات زاوية ملتفة محاطة بالعوارض الرئيسة وصفائح الوصل أو الأعصاب الرئيسة.
2. قطعة الحديد المصبوب اللدن؛ قطعة من النوع الصندوقي مصنوعة من حديد مصبوب غرافيتي كروي.
3. قطعة مضلعة من الخرسانة المسلحة: قطعة من النوع الصندوقي مصنوعة من الخرسانة.
4. قطعة مثلمة: قطعة حديد مصبوب مرنة بزاوية ملتفة خارجية مملوءة بمادة صلبة.
5. قطعة من النوع المنبسط (المسطح): قطع خرسانية مسلحة بشكل لوح منبسط بجسد صلب، يستخدم التعبير أيضًا للقطع المركبة التي تكون فيها القطعة الخرسانية مغطاة بصفيحة فولاذية أو مسلحة بمقاطع فولاذية بدلًا من القضبان الفولاذية.

2. أجزاء القطعة

تم تحديد الأجزاء المختلفة للقطعة في الشكل 3 - 8.

3. مكونات الحلقة القطعية

القطعة A، والقطعة B، والقطعةK تم تحديدها في الشكل 3 - 11.

كما هو مبين في الشكل 3. 12، فإنه يوجد نوعان من القطعة K، بناء على اتجاه الإدخال.

4. تجميع الفواصل

أ. التجميع المستقيم للفواصل

عندما تكون فواصل القطع مرتبة في اتجاه محور النفق.

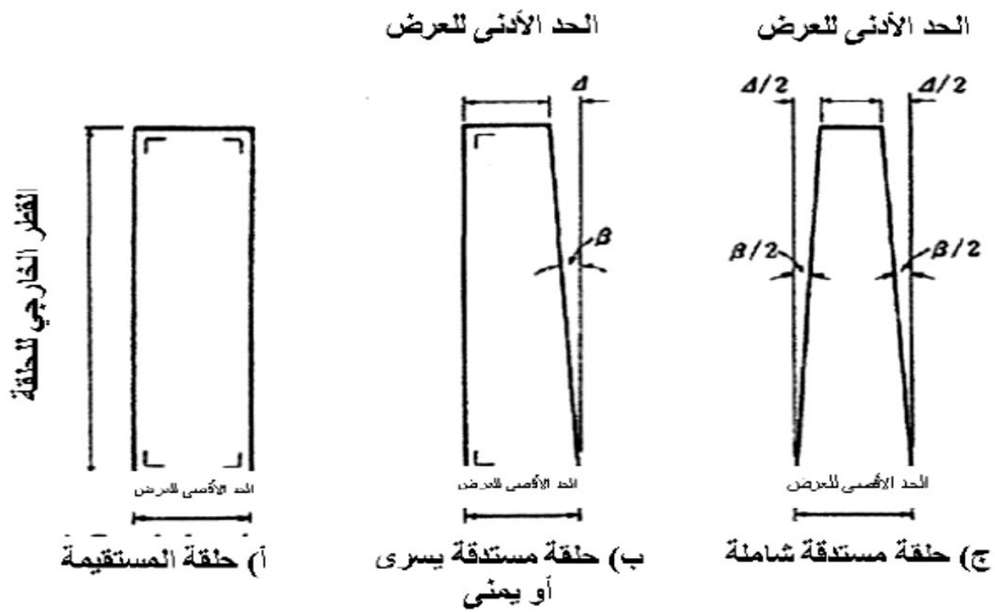
ب. بـ الترتيب المتخالف للفواصل

عندما تكون فواصل القطع مرتبة بنمط متخالف.

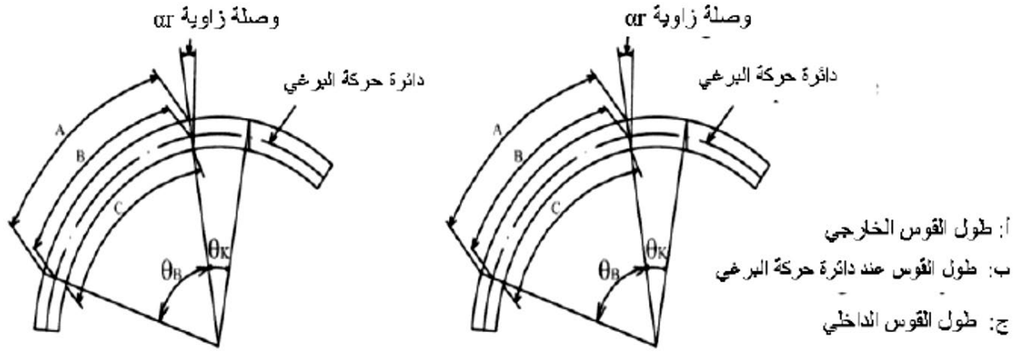
5. الحلقة المستدقة (المدببة أو المتناقصة تدريجيًا)

كما هو محدد في الشكل 3 - 9، فإن الحلقة المستدقة تكون ذات استدقاق طرفي يسمح للبطانة بتكييف نفسها مع الانحناء الخاص بها. والاستدقاق هو اختلاف بين الأطوال العليا والدنيا للحلقة المستدقة.

المقاطع العرضية للحلقات القطعية مبينة في الشكل 3 - 10.

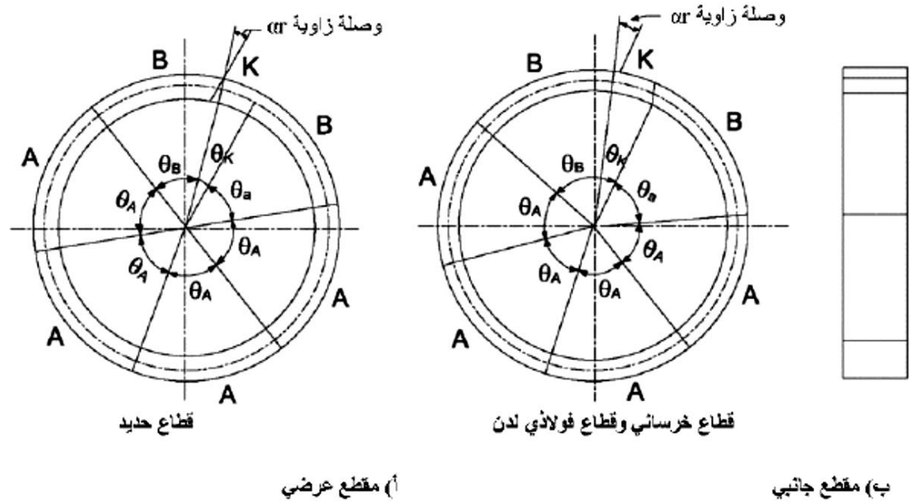


الشكل 3 - 9: الحلقة المستدقة

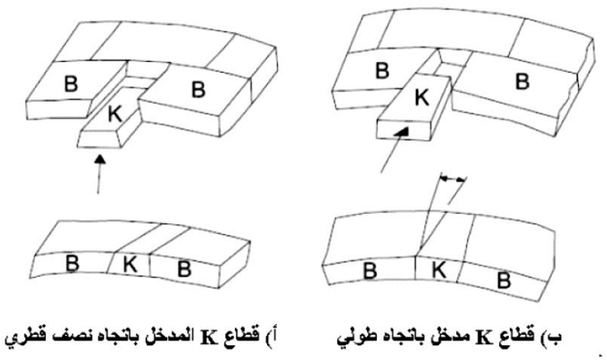


ب: قطاع خرساني وقطاع فولاذي لدن أ: قطاع حديد

الشكل 3 - 10:المقطع العرضي للحلقة القطعية



الشكل 3 - 11: مكونات الحلقة القطعية



الشكل 3 - 12: أنواع القطعة K

3-7-8-2 الرموز

يتم تحديد الرموز المستخدمة في الحساب الإنشائي للبطانة كما يلي:

Ec, Es, Ed = معاملات المرونة للخرسانة، والحديد، والفولاذ المصبوب اللدن

I = عزم القصور الذاتي

M, N, Q = عزم الانحناء، والقوة المحورية، وقوة القص (بالنسبة لقوى العنصر، فإن الاتجاهات المشار إليها في الشكل أدناه تفترض على أنها موجبة)

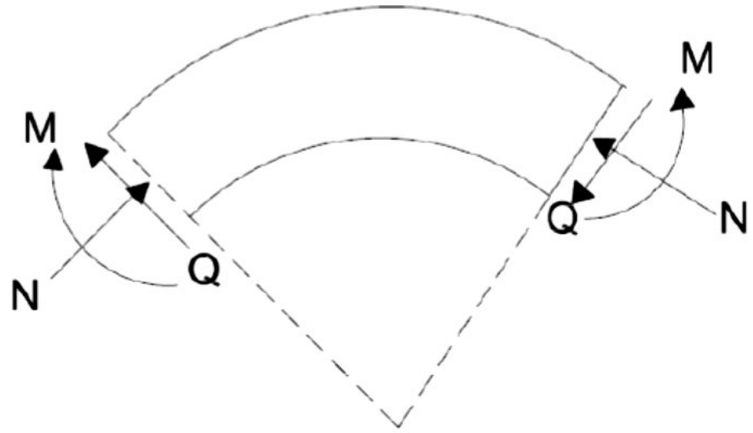
η_1 = النسبة الفعالة لقساوة الانحناء (EI)

ξ = نسبة النقل لعزم الانحناء

Ro, Rc, Ri = نصف القطر الخارجي، ونصف قطر المحور، ونصف القطر الداخلي للبطانة الرئيسة

h_1, h_2 = سماكة (ارتفاع) البطانة الرئيسة والبطانة الثانوية

B = عرض القطعة



الشكل 3_ 13: عزم الانحناء، والقوة المحورية، وقوة القص

υ = الزاوية عند نقطة حساب قوى العنصر،... إلخ. (الزاوية المقاسة باتجاه عقارب الساعة من قمة قوس النفق تفترض على أنها موجبة)

$\gamma, \gamma', \gamma_w$ = الكتلة الحجمية للتربة، والوزن المغمور للتربة، والوزن النوعي للماء

H = الغطاء الترابي (العمق المطمور) مقاسًا من قمة قوس النفق

H_w = ارتفاع مستوى المياه الجوفية من قمة قوس النفق

P_o = الوزن الإضافي للتربة

W_1, W_2 = الوزن الدائم للبطانة الرئيسة والبطانة الثانوية (لكل وحدة طول بالاتجاه الطولي)

g_1, g_2 = الوزن الدائم للبطانة الرئيسة والبطانة الثانوية على طول محور البطانة (في واحدة الطول بالاتجاه الطولي)

p = شدة الحمولة الرأسية

q = شدة الحمولة الأفقية

λ = معامل ضغط التربة الجانبي

κ = معامل رد فعل التربة

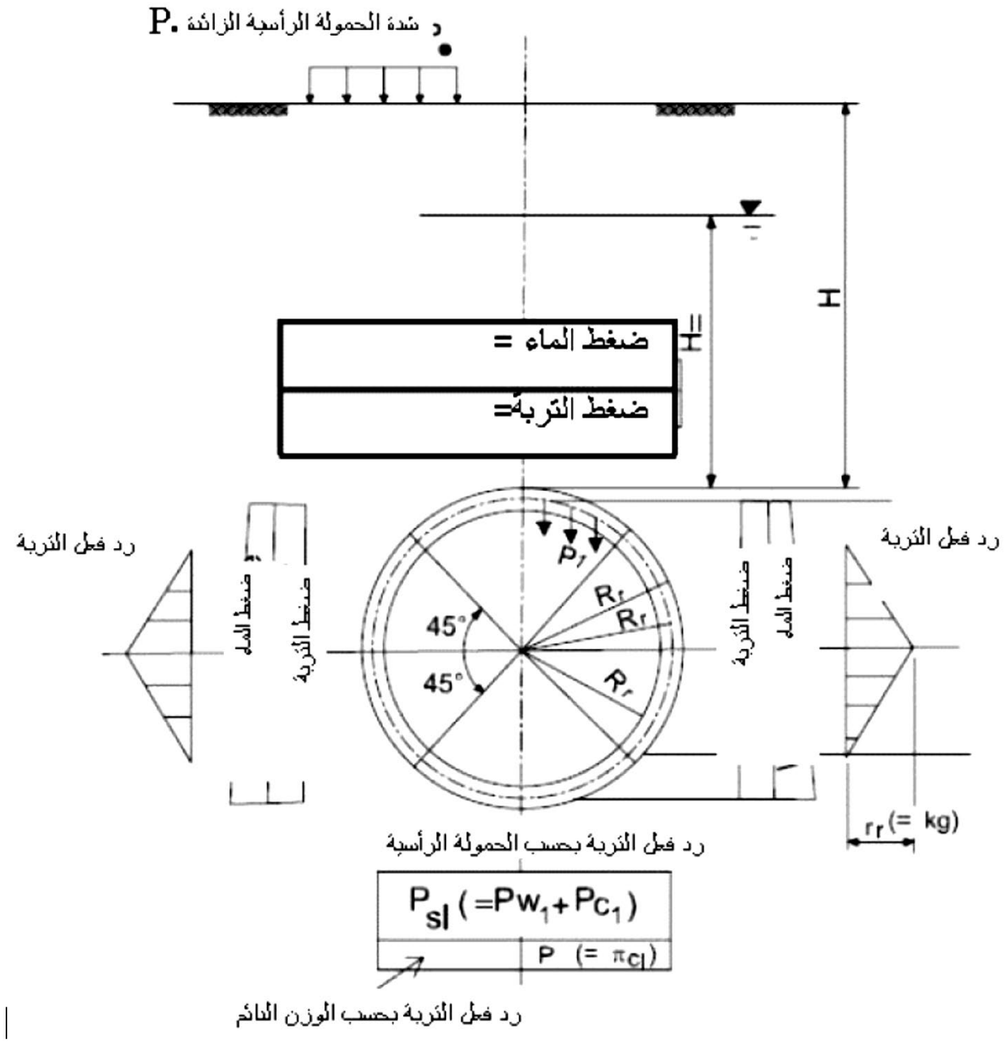
δ = تشوه البطانة (التشوه الداخلي يُفترض موجبًا)

c = تماسك التربة

ω = زاوية الاحتكاك الداخلية للتربة

$\upsilon_A, \upsilon_B, \upsilon_K$ = الزوايا الداخلية للقطع K,B,A

يبين الشكل 3ـ 14 كيف يتم استخدام الرموز في طرق الإجهاد الكلي والإجهاد الداخلي.



الشكل 3 - 14:مثال عن الرموز في طرق الإجهاد الكلي والإجهاد الفعال (بعد JSCE,2001)

3-8-7-3 أسس التصميم

يجب أن يبنى تصميم البطانة على اعتبارات الأمان، ويجب أن يكون متوافقًا مع الهدف من استخدام النفق، ويجب أن يكون منفذًا بطريقة التصميم على الإجهاد المسموح وبشرط إنجاز الإنشاء الكافي والصحيح باستخدام مواد ذات نوعية جيدة.

4-8-7-3 الأحمال التصميمية

يجب الأخذ في الحسبان الأحمال التالية في تصميم بطانة الأنفاق المنفذة بالترس:

أ. ضغط التربة الرأسي والأفقي.
ب. ضغط الماء.
ج. الوزن الدائم.
د. تأثيرات الحمل الإضافي للتربة.
ه. رد فعل التربة.
و. الأحمال الداخلية.
ز. أحمال التنفيذ أو الإنشاء.
ح. تأثيرات الزلازل.
ط. تأثيرات وجود نفقين منفذين بالتروس أو أكثر أثناء التنفيذ.
ي. تأثيرات أعمال التنفيذ المتزامنة في المناطق المجاورة.
أ. تأثيرات انخفاض الأرض.
ب. تأثيرات أخرى.

5-8-7-3 تصنيف الأحمال

يجب أن تصنف الأحمال كما يلي:

1. الأحمال الرئيسة

يجب أن تؤخذ الأحمال من أ. حتى ج. في الحسبان في تصميم البطانة.

2. الأحمال الثانوية

يجب أن تعتبر الأحمال من ح. حتى د. عاملة خلال التنفيذ أو بعد اكتمال النفق. ويجب أن تؤخذ في الحسبان بحسب الغرض، وظروف التنفيذ وموقع النفق.

3. أحمال خاصة

تؤخذ الأحمال من ذ. حتى س. في الحسبان تحديدًا حسب ظروف الأرض واستخدام النفق.

6-8-7-3 ضغط التربة الرأسي والأفقي

اعتمادًا على ظروف الأرض، فإن ضغط المياه الجوفية يجب أن يؤخذ في الحسبان عن طريق استخدام إما طريقة الإجهاد الفعال أو طريقة الإجهاد الكلي.

- يجب أن يكون ضغط التربة الرأسي هو الحمولة الموحدة المؤثرة في قمة قوس النفق. ويجب تحديد مقدارها مع اعتبار الغطاء الترابي، والمقطع العرضي والقطر الخارجي للنفق، وظروف الأرض.
- يجب أن يكون ضغط التربة الأفقي هو الحمولة المتغيرة بانتظام والمؤثرة في محور البطانة من قمة قوس النفق إلى أسفل النفق. ومقداره هو حاصل ضرب ضغط التربة الرأسي ومعامل ضغط التربة الجانبي.

7-8-7-3 إمكانية تطبيق ضغط الارتخاء

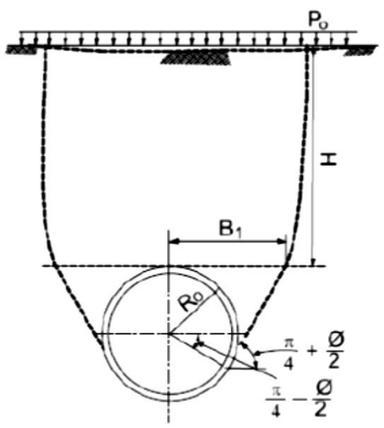
في الحالات التي يكون فيها عمق الغطاء الترابي (H) أكبر من قطر النفق (Do- القطر الخارجي للحلقة القطعية)، فإنه يمكن استخدام ضغط الارتخاء لتصميم ضغط التربة الرأسي بسبب صلته الوثيقة بالتأثير القوسي للتربة. ويجب تبني ضغط الارتخاء في الحالات التالية:

التربة الرملية — بالنسبة لـ <H1- 2 Do

التربة المتماسكة — بالنسبة لـ <H1- 2 Do، والنفق في الغضار القاسي مع <N 8

ويلخص الشكل 3- 15 ضغط الارتخاء.

ويمكن حساب عرض الارتخاء للمقاطع غير الدائرية من عبارة ترزاكي الجبرية، إذا أمكن تقدير عرض الارتخاء (Bl) بشكل مناسب. لكن في مثل هذه الحالات، فإنه يلزم تحديد الحمولة بحذر لأنها تتغير بحسب شكل (ترتيب) المقطع العرضي للنفق. وبالنسبة لهذه الحالات، يجب أن يشير المصمم إلى نتائج القياسات الميدانية بموازاة البيانات حول ضغط التربة وضغط المياه الجوفية،... إلخ، في ظروف الأرض المماثلة.



$$\sigma_v = \frac{B_l\left(\gamma - c / B_l\right)}{K_o \tan \varnothing} \cdot \left(1 - e^{-K_o \tan \varnothing \cdot H / B_l}\right) + po \cdot e^{-K_o \tan \varnothing \cdot H / B_l}$$

$$B_l = R_o \cdot \cot\left(\frac{\pi / 4 + \varnothing / 2}{2}\right)$$

σ_v : Terzaghi's loosening pressure

h_o : Converted height of loosening soil $(= \sigma_v / \gamma)$

K_o : The ratio of horizontal earth pressure to vertical earth pressure (Usually, 1.0 can be adopted as Ko)

$\varnothing$: Internal friction angle of soils

P_o : Surcharge

γ : Unit Weight of soil

c : Cohesion of soil

However, when P_o / γ is small compared with H, loosening Pressure can be calculated using the following equation.

$$\sigma'_v = \frac{B_l\left(\gamma - c / B_l\right)}{K_o \tan \varnothing} \cdot \left(1 - e^{-K_o \tan \varnothing \cdot H / B_l}\right) +$$

الشكل 3 - 15: ضغط الارتخاء (أخذ عن JSCE,2001)

8-8-7-3 ضغط الماء

يجب تحديد منسوب المياه الجوفية بموازاة التغير المحتمل لمنسوب المياه الجوفية أثناء التنفيذ وبعده. ويجب أن يكون ضغط الماء الرأسي حمولة موزعة بانتظام، ويجب أن يكوّن مقداره ضغطًا هيدروستاتيكيًا مؤثرًا في أعلى نقطة عند قمة قوس النفق، وضغطًا هيدروستاتيكيًا مؤثرًا في أخفض نقطة عند أسفل النفق. يجب أن يكوّن ضغط الماء الأفقي حمولة موزعة بانتظام، ومقداره يجب أن يكون ضغطًا هيدروستاتيكيًا.

3-7-8-9 الوزن الدائم

هو حمولة في الاتجاه الرأسي، موزع على طول محور البطانة. ويجب أن يحسب بالمعادلة التالية:

$$g_1=w_1/(2\ \pi.Rc)$$

3-7-8-10 الحمولة الإضافية للتربة

يجب تحديد تأثير الحمولة الإضافية مع الأخذ في الحسبان نقل الإجهاد إلى الأرض.

3-7-8-11 رد فعل التربة

يجب تحديد مدى تولد، وشكل توزيع، وشدة رد فعل التربة فيما يتعلق بطريقة حساب التصميم المستخدمة.

3-7-8-12 أحمال التنفيذ (الإنشاء)

يجب أن تتضمن أحمال التنفيذ المأخوذة في الحسبان لتصميم البطانة ما يلي:

1. قوة دفع رؤوس الترس الدوارة.
2. ضغط حقن الردم الخلفي.
3. حمولة تشغيل المعدات المنفذة
4. أحمال أخرى، حسبما تكون مناسبة.

3-7-8-13 الأحمال الداخلية

الحمولة الداخلية هي الحمولة التي تؤثر داخل البطانة بعد اكتمال النفق، ويجب أن تحدد حسب الظروف الفعلية.

3-7-8-14 تأثير الزلازل

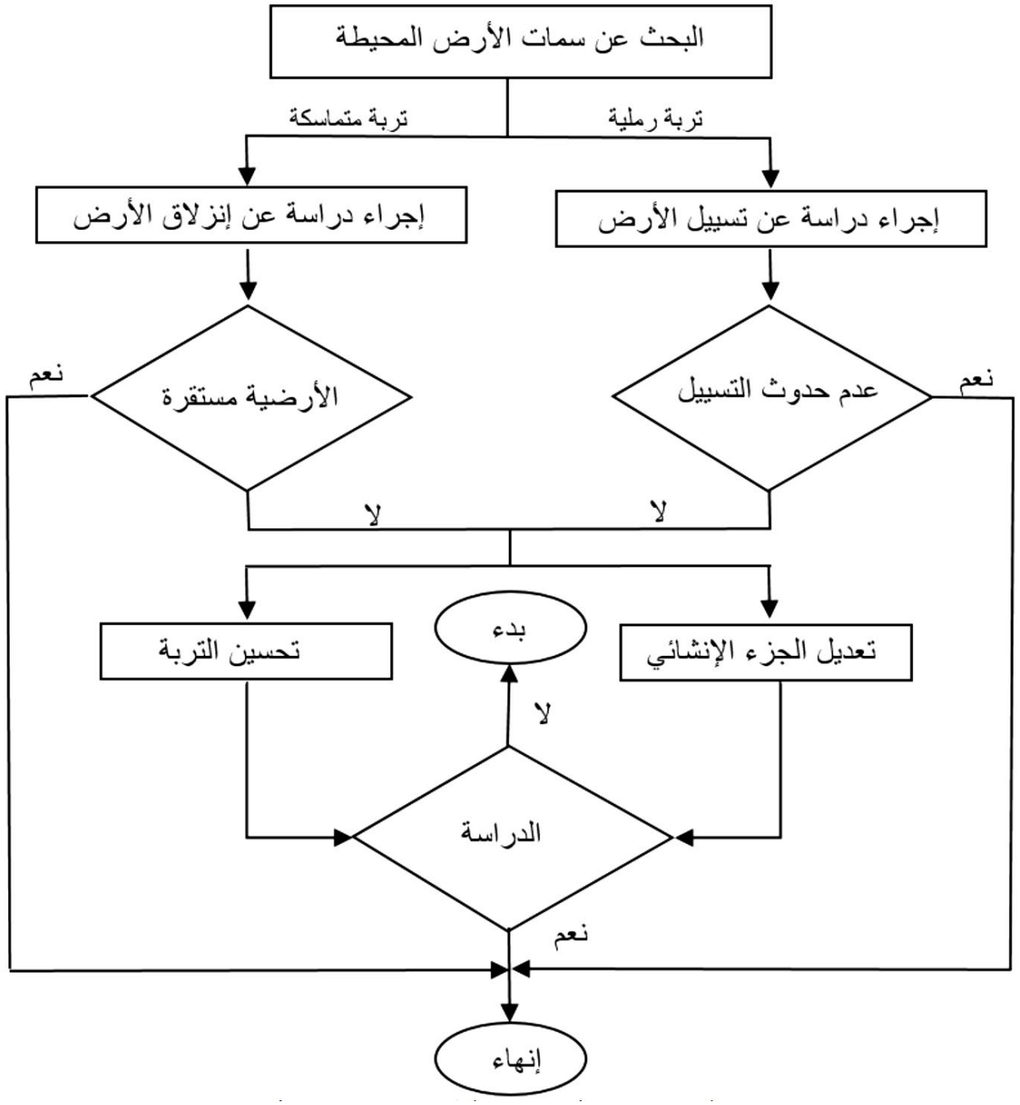
عندما يكون متوقعًا، فإنه يجب القيام بدراسات مع الأخذ في الحسبان: أهمية النفق، وحالة موقع النفق، وحالة الأرض المحيطة، والحركات الزلزالية التي وقعت في المنطقة ذات الصلة، والتفاصيل الإنشائية للنفق، والحالات الضرورية الأخرى.

ويجب القيام بدراسات متأنية في الحالات التالية:

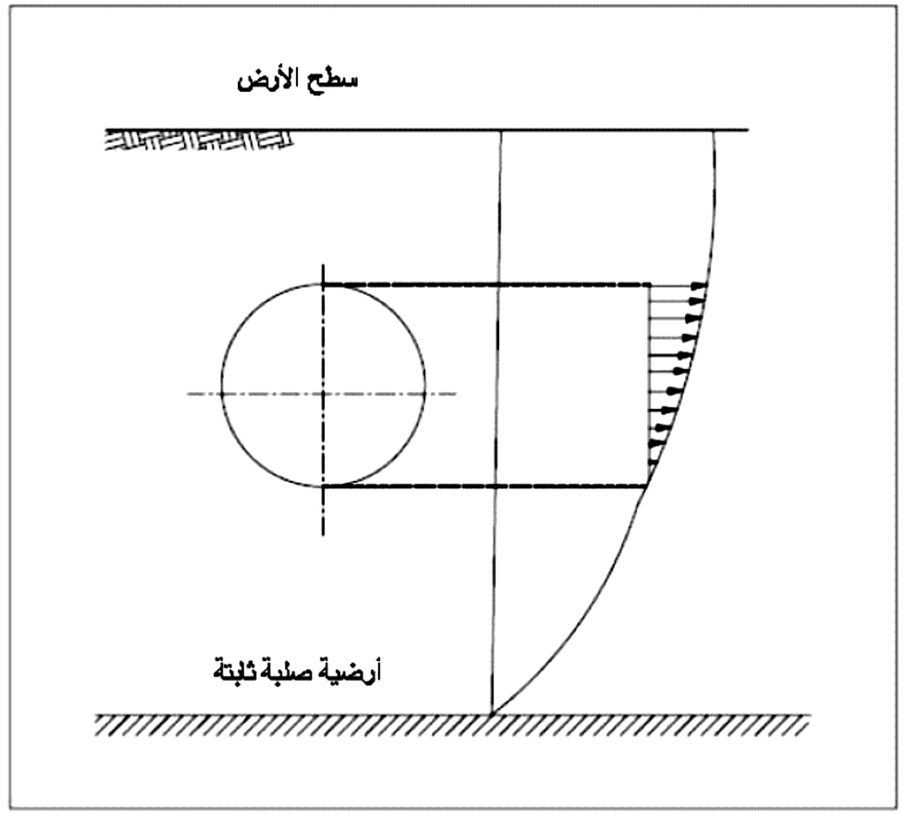
- عندما تتغير منشأة البطانة فجأة، على سبيل المثال، عند اتصال النفق تحت الأرض، وعند الاتصال مع الممرات الرأسية.
- عندما يكون النفق في أرض طرية.
- عندما تتغير ظروف التربة كالجيولوجيا، والغطاء الترابي، وعمق الصخر الصلد فجأة.
- عندما يتضمن المسار منحنيات حادة.
- عندما يكون النفق في رمل متفكك مشبع وهناك إمكانية للتميع/التسييل.(Liquefaction)

عمومًا، فإنه يتم إجراء الدراسات الزلزالية للأنفاق المنفذة بالتروس بالنظر إلى ما يلي:

1. استقرار النفق والأرض المحيطة؛ ويجب إجراء دراسات كافية حول تميع التربة المحيطة، ويجب الأخذ بقياسات وقائية مثل تحسين الأرض، إذا عُدَّ ذلك ضروريًا. ويقدم الشكل 3 - 16هيكلًا تنظيميًا لدراسة استقرار الأرض المحيطة في التصميم الزلزالي
2. يجب القيام بدراسة ديناميكية للنفق في الاتجاه العرضي باستخدام طريقة الاستجابة للإزاحة. تعطي عدد القوى وتشوه النفق عن طريق حساب انزياح الأرض عند موقع النفق وتطبيق الإزاحة الكلية أو جزء واحد منها على النفق. ويبين الشكل 3 - 17 مثالًا حيث يفترض فيه أن سطح طبقة التربة السفلى يخضع لاهتزاز قص، وأنه تم الحصول على مقدار الإزاحة لنمط اهتزازه الأول.

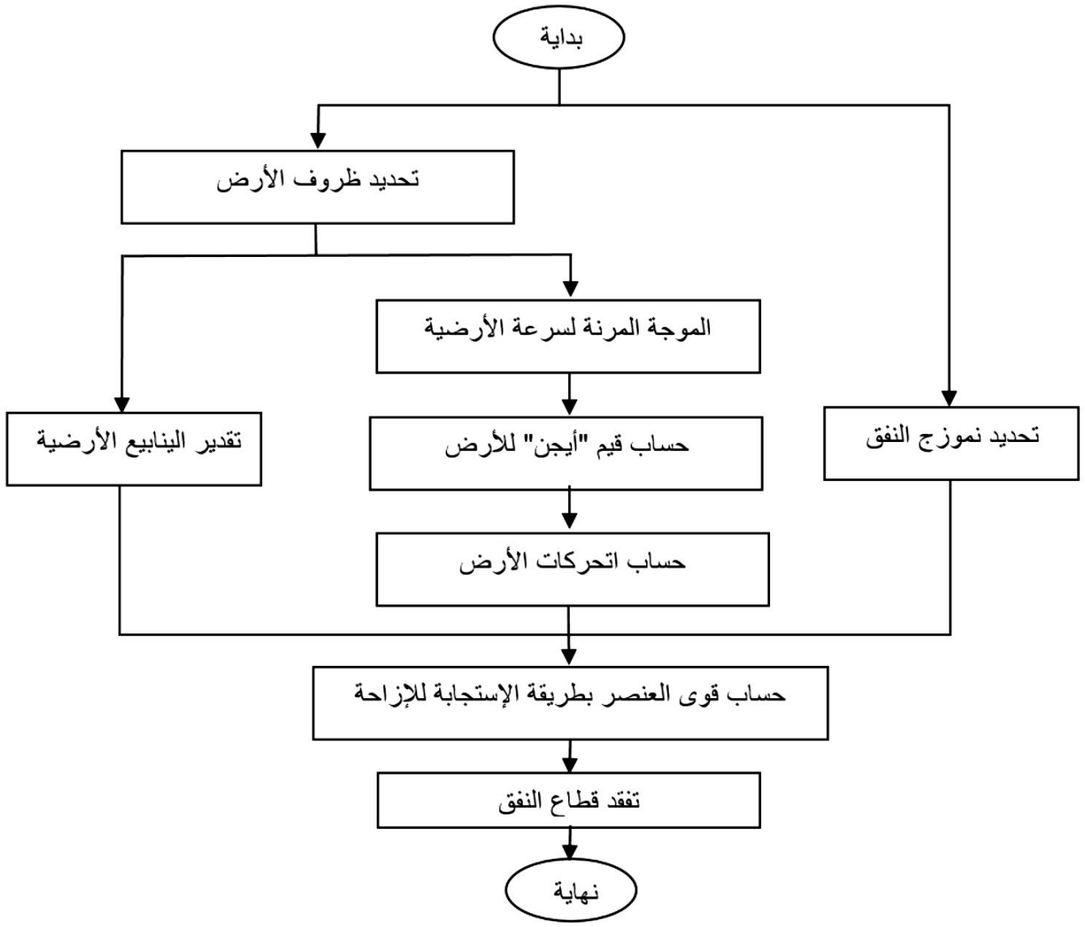


الشكل 3 - 16: دراسة عن استقرار الأرض المحيطة في التصميم الزلزالي (أخذ JSCE,2001)

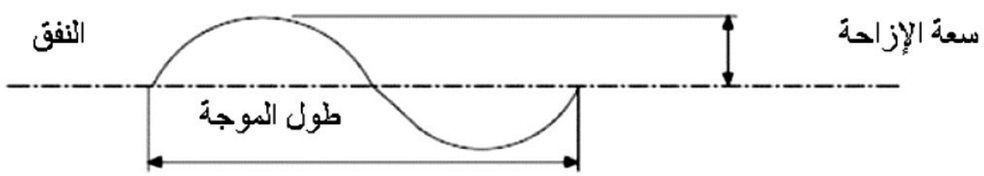


الشكل 3 - 17: الإزاحة العرضية النسبية في طريقة الاستجابة للإزاحة (بعد JSCE,2001)

3. دراسة ديناميكية للنفق في الاتجاه الطولي – يتم تحديد طول الموجة من اعتبار خصائص الأرض عند موقع النفق، عندها يتم حساب مقدار الإزاحة لاهتزاز الأرض، الذي يفترض أن يكون على موجة جيبية، بواسطة طريقة الاستجابة للإزاحة. ثم يتم حساب قوى العنصر وتشوه النفق في الاتجاه الطولي عن طريق تطبيق انزياح الأرض الذي تم الحصول عليه على النفق. ثم بيان مخطط تدفقي ومثال لدراسة زلزالية بواسطة طريقة الاستجابة للإزاحة في الشكل 3 - 18والشكل 3 - 19، على التوالي.



الشكل 3 - 18: مخطط هيكلي لطريقة الاستجابة للإزاحة (أخذ عن JSCE,2001)



الشكل 3 - 19: انتقالات (تحركات) الأرض الطولية في طريقة الاستجابة للإزاحة (أخذ عن JSCE,2001)

3-7-8-15 تأثيرات نفقين أو أكثر

عند تنفيذ نفق موازٍ لنفق موجود، فيجب على مصمم النفق أن يأخذ في الحسبان ما يلي:

1. حالة الأرض المحيطة: يجب تقدير الدرجة التي سيؤثر فيها ارتخاء الأرض على الحمولة عند استخدام آلة بواجهة مغلقة في أرض طرية بحساسية عالية أو أرض رملية باستقرار منخفض، بشكل خاص.
2. موقع النفقين فيما يتعلق أحدهما بالآخر ـ سيكون لذلك تأثير عندما يكون الخلوص (المسافة الصافية) بين النفقين أقل من القطر الخارجي للنفق الموجود، إما في الاتجاه الأفقي أو في الاتجاه الرأسي. وعندما يتم إنشاء نفق لاحق أسفل نفق موجود، فسيكون هناك زيادة في الحمولة الرأسية، سببها ارتخاء الأرض وهبوط غير متساوٍ.
3. القطر الخارجي لكل نفق: عند إنشاء نفقين أو أكثر، فإن تصميم النفق السابق يجب أن يأخذ في الحسبان تأثير القطر الخارجي لكلا النفقين، وكذلك موقع النفق السابق فيما يتعلق بالنفق اللاحق المنفذ بالتروس.
4. زمن تنفيذ النفق الجديد المنفذ بالتروس عند تنفيذ نفق لاحق حيث إن تأثيرات النفق السابق تبقى محسوسة، فيجب توجيه اهتمام كبير لزمن تنفيذ كلا النفقين لأن التفاعل بين كلا النفقين، كما هو موصوف في (1)، يعد كبيرًا.
5. نوع آلة التروس المراد استخدامها عند الإنشاء- بالنسبة لآلة تروس مغلقة الواجهة، فإن النفق اللاحق المنفذ بالتروس يقوم بدفع النفق السابق المنفذ بالتروس، على النقيض من ذلك عند استخدام آلة تروس من النوع مفتوح الواجهة، حيث يقوم النفق اللاحق المنفذ بالتروس بسحب النفق السابق المنفذ بالتروس.
6. أحمال التنفيذ للنفق الجديد المنفذ بالتروس التي تؤثر في النفق الموجود – حمولة الدفع، وضغط الحقن، وضغط الروبة وضغط الروبة الطينية.

3-7-8-16 تأثيرات الإنشاءات المجاورة

يجب أن يقدر المهندس المصمم أي تأثيرات خارجية ناتجة عن الإنشاءات المتوقعة في المنطقة القريبة جدًّا خلال أو بعد شق النفق بالتروس.

3-7-8-17 تأثيرات هبوط الأرض

يجب أن يدرس مصمم النفق تأثيرات خواص التربة في هبوط الأرض، بالإضافة إلى تأثير هبوط الأرض في النفق والفواصل بين النفق والممرات الرأسية.

1. يمكن دراسة تأثير هبوط الأرض في النفق بطريقتين؛ وذلك بدراسة ما يلي:
   - تأثير هبوط الارتصاص في النفق في الاتجاه العرضي.
   - تأثير الهبوط غير المتساوي في النفق في الاتجاه الطولي.
2. الفواصل بين النفق والممرات الرأسية ـ تميل الهبوطات النسبية إلى الوقوع عند الفواصل التي تصل النفق والممرات الرأسية، لأن أنواعًا مختلفة من المنشآت تكون موصولة في تلك المواقع. ويجب أن يمنع التصميم تركيز الإجهاد عن طريق استخدام فواصل مرنة، عندما يكون ذلك ضروريًا، أو تخفيض تأثير الهبوطات غير المتساوية بجعل أساسات الممرات الرأسية أساسات عائمة. ويكون مؤثر أيضًا في جعل القطر الداخلي أكبر، حيث يمكن تأمين المقطع العرضي المطلوب بواسطة أعمال إصلاح بسيطة.

3-7-8-18 الأحمال الأخرى

يجب القيام بفحص مسبق لتأثيرات أحمال أخرى محتملة من المرجح أن تؤثر في بطانة النفق.

3-7-8-19 الحساب الإنشائي للقطع

3-7-8-20 يجب أن يكون أساس الحساب الإنشائي كما يلي:

1. يجب أن يتم الحساب الإنشائي للنفق تحت الأحمال في كل مرحلة خلال التنفيذ وبعد التنفيذ.
2. يجب أن تحدد الحمولة التصميمية للمقطع العرضي للنفق بافتراض الحالة المحتملة الأسوأ في مقطع النفق موضوع التصميم.
3. عند حساب قوة إستاتيكية غير محددة أو تشوه مرن لقطع خرسانية، فإن مثل هذه الحساسيات يجب أن تتم بتجاهل التسليح وافتراض أن يكون كامل المقطع العرضي للخرسانة فعالاً.

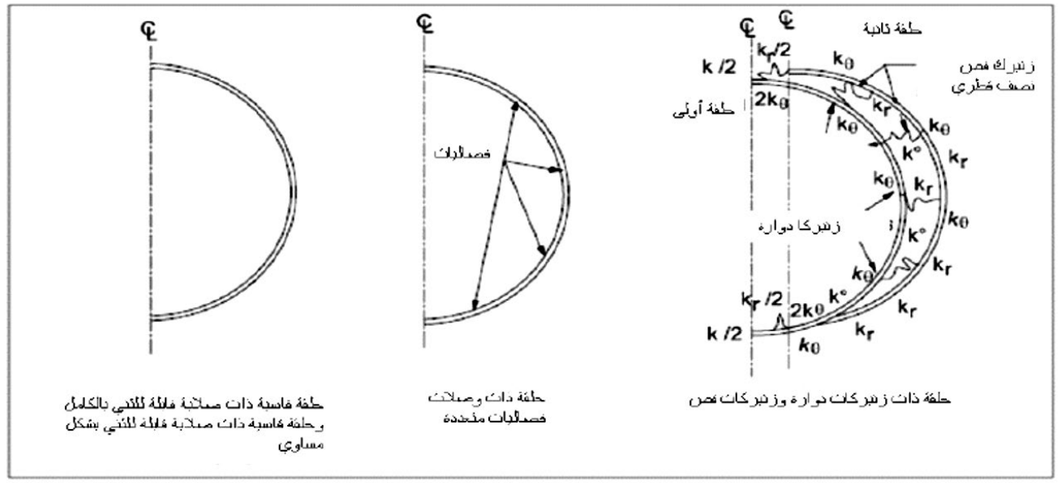
ويجب أن يتم تصميم القطع بالاهتمام بالأحمال التي يمكن أن يؤثر في النفق المراد إنشاؤه للعديد من السنوات بعد اكتماله إضافة إلى الاهتمام بما يلي:

- الاستقرار، قوى وتشوهات العنصر خلال الفترة المباشرة لاكتمال تشييد القطع وحتى تقسية مواد الردم.
- قوى العنصر للقطع وتشوهاتها بسبب قوة الدفع من قبل القطع الدوارة للتروس.
- قوى العنصر للقطع وتشوهاتها الناتجة عن ضغط الحقن.
- تنفيذ منحنيات حادة.
- حالة التغير السريع في الأرض.
- فواصل الأنفاق والممرات الرأسية.
- تأثير تقلب الحمولة، والإنشاءات في المنطقة المجاورة، والإنشاء المستقبلي.

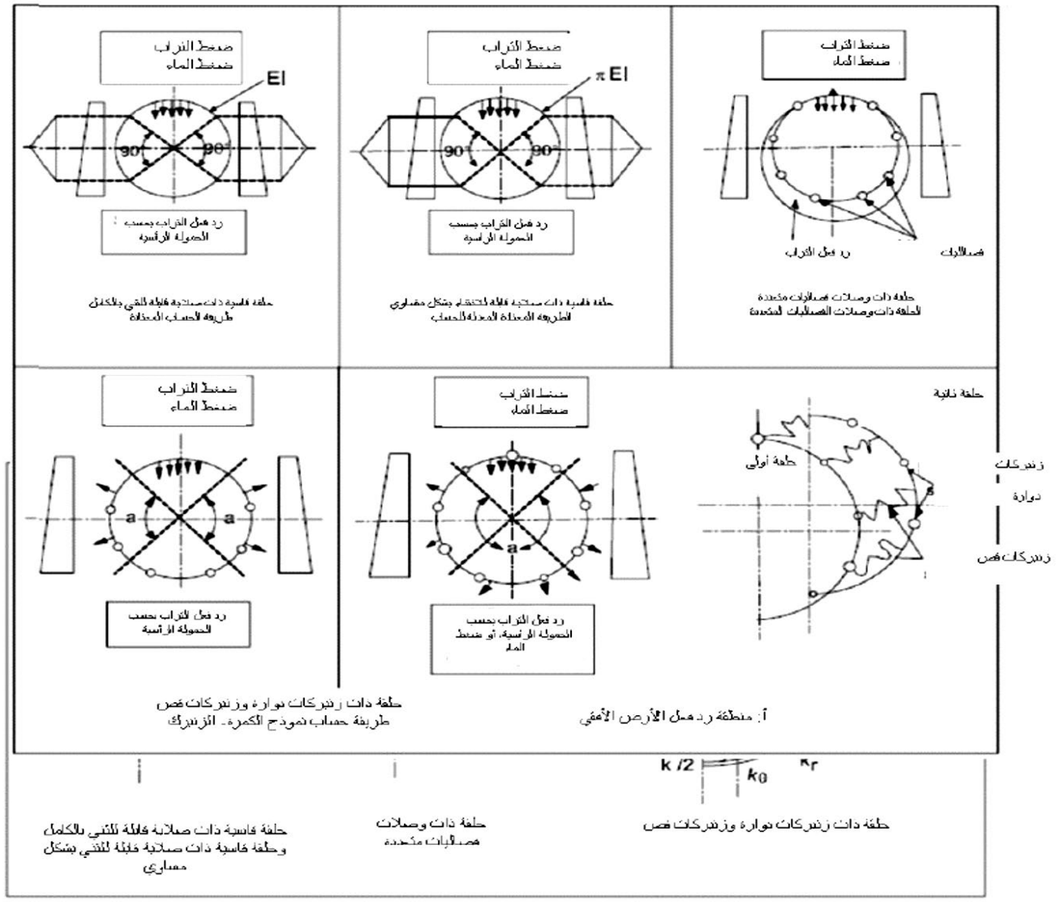
2. حساب قوى العنصر

يجب حساب قوى العنصر للقطع مع الأخذ في الحسبان خواص المنشأ. ولأن النموذج المناسب لحساب قوى العنصر يعتمد على ظروف معروفة، مثل استخدام النفق، وظروف الأرض، والأحمال التصميمية، ومنشآت القطع، والدقة المطلوبة في التحليل، فإنه يجب توجيه اهتمام كبير لاختيار النموذج.

ويبين الشكل 3 - 20 الرسومات التخطيطية لبعض النماذج الإنشائية للحلقات القطعية، كما يبين الشكل 3_21 توزيعات الأحمال التصميمية المقررة لهذه النماذج.



الشكل 3 - 20: الرسومات التخطيطية للنماذج التصميمية (بعد JSCE,2001)



الشكل 3 - 21: توزيعات الأحمال التصميمية للنماذج أعلاه (أخذ عن JSCE,2001)

معادلات القوى المقطعية الرئيسة موجودة في الجدول رقم 3 - 5.

الجدول رقم 3 - 5: معادلات قوى العنصر بالنسبة لطرق الحساب
«الحساب الاعتيادية والاعتيادية المعدلة» (أخذ عن JSCE,2001)

الحمولة	عزم الإنحناء	القوة المحورية	قوة القص
الحمولة الرأسية $(P_{et}+P_{wt})$	$M=\frac{1}{4}(1-2\sin^2\theta)P_{et}+P_{wt})R_c^2$	$N=(P_{et}+P_{wt})R_c^2\sin^2\theta$	$Q=(-P_{et}+P_{wt})R_c\ \sin\ \theta\cos\theta$
الحمولة الأفقية $(q_{et}+q_{wt})$	$M=\frac{1}{4}(1-2\cos^2\theta)P_{et}+P_{wt})R_c^2$	$N=(P_{et}+P_{wt})R_c^2\cos^2\theta$	$Q=(-q_{et}+q_{wt})R_c\ \sin\ \theta\cos\theta$
الحمولة الأفقية مثلثة الشكل $(q_{ez}+q_{wz}-q_{et}-q_{wt})$	$M=\frac{1}{48}(6-3\cos\ \theta-12\cos^2\theta+4\cos^2\theta)$ $(q_{ez}+q_{wz}-q_{et}-q_{wt})R^2_c$	$N=\frac{1}{16}\begin{pmatrix}\sin\ \theta+8\sin\ \theta\\-\cos-4\sin\theta.\cos^2\theta\end{pmatrix}$ $(q_{ez}+q_{wz}-q_{et}-q_{wt})R_c$	$N=\frac{1}{16}\begin{pmatrix}\cos\ \theta+8\cos^2\theta\\-4\cos^2\theta\end{pmatrix}$ $(q_{ez}+q_{wz}-q_{et}-q_{wt})R_c$
رد فعل التربة $q_r=k.\delta$	$0\le\theta<\frac{\pi}{4}$ $M=(0.2346-0.3536\cos\theta)k\ \delta R_c^2$ $\frac{\pi}{4}\le\theta\le\frac{\pi}{2}$ $M=(-0.3487+0.5\sin^2\theta+0.2357\cos^2\theta)k\ \delta R_c^2$	$0\le\theta<\frac{\pi}{4}$ $N=0.3536\cos\theta k\ \delta R_c$ $\frac{\pi}{4}\le\theta\le\frac{\pi}{2}$	$0\le\theta<\frac{\pi}{4}$ $Q=0.3536\sin\theta.k\ .\delta.R_c$ $\frac{\pi}{4}\le\theta\le\frac{\pi}{2}$ $Q=(\sin\theta.\cos+\cos^2\theta+0.7071\cos^2\theta\sin\ \theta)k\ \delta R_c$
الحمولة الدائمة $P_{g1}=\pi.g_1$	$0\le\theta<\frac{\pi}{2}$ $M=(\frac{3}{8}\pi-\theta\sin\theta-\frac{5}{6}\cos\theta)gR_c^2$ $\frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi$ $M=(-\frac{1}{8}\pi+(x-\theta)\sin\theta-\frac{5}{6}\cos\theta-\frac{1}{2}\pi\sin^2\theta)gR_c^2$	$0\le\theta<\frac{\pi}{2}$ $N=(\theta\sin\theta-\frac{1}{6}\cos\theta)gR_c$ $\frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi$ $M=(-x\sin\theta+\theta\sin\theta+\pi\sin^2\theta-\frac{1}{6}\cos\theta)gR_c$	$0\le\theta<\frac{\pi}{2}$ $Q=(\theta\cos\theta+\frac{1}{6}\cos\theta)gR_c$ $\frac{\pi}{2}\le\theta\le\pi$ $Q=((\pi-\theta)\cos\theta-x\ \sin\theta\cos\theta-\frac{1}{6}\sin\theta)gR_c$
التشوه الأفقي لحلقة عند خط النشاط Δ	بدون إعتبار رد فعل التربة المستمد من الوزن الدائم للبطانة $\delta=\frac{\{2(p_{et}+p_{wt})-(q_{et}+q_{wt})-(q_{ez}+q_{wz})\}R_c^4}{24(\eta.EI+0.0454k.R_c^4)}$ بإعتبار رد فعل التربة المستمد من الوزن الدائم للبطانة $\delta=\frac{\{2(p_{et}+p_{wt})-(q_{et}+q_{wt})-(q_{ez}+q_{wz})+\pi g\}R_c^4}{24(\eta.EI+0.0454k.R_c^4)}$ لكن EI: قساوة (الإنحناء) لكل وحدة عرض		

3. العرض الفعال لصفيحة السطح الخارجي واللوح الخلفي

يجب أن يبنى العرض الفعال لصفيحة السطح الخارجي واللوح الخلفي ليناسبا تركيبة القطعة.

4. إجهاد المقطع الرئيس

يجب حساب الإجهاد على المقطع الرئيس للقطعة باستخدام قوة العنصر الأعلى، بافتراض أن عنصر العارضة مستقيم.

5. حساب فواصل القطع

يجب تصميم فواصل القطع بالتوافق مع الطريقة المستخدمة في حساب قوى عنصر الحلقة القطعية.

6. حساب صفيحة السطح الخارجي أو اللوح الخلفي

إن صفيحة السطح الخارجي في القطعة من النوع الصندوقي، هي ذلك الحد الخارجي المدعوم بالعوارض الرئيسة وصفائح الوصل. وبالنسبة للقطع الفولاذية، فيتم استخدام مصطلح «صفيحة السطح الخارجي»، وبالنسبة للقطع الخرسانية المسلحة من النوع ذي الأعصاب، فإنه يتم استخدام مصطلح «اللوح الخلفي».

ويجب تصميم صفيحة السطح الخارجي أو اللوح الخلفي كعنصر إنشائي بحالات تحميل منتظمة. يجب توجيه الاهتمام المناسب للخواص المادية والإنشائية للقطع.

7. حساب العصب الرأسي

يجب تصميم العصب الرأسي لمواجهة قوة الدفع للأدوات الدوارة في الترس كعمود قصير بقوة محورية لا مركزية تؤثر فقط عند اتجاه نصف قطر النفق.

3-7-8-21 التصميم التفصيلي للقطع

1. منشأة الفواصل

يجب تصميم منشأة الفواصل للقطع مع الأخذ في الحسبان القوة، وفاعلية التجميع، وقابلية التشغيل والكتامة ضد الماء.

2. طريقة ترتيب البراغي

يجب تصميم طريقة ترتيب البراغي مع الأخذ في الحسبان قوة وصلابة الحلقة القطعية، ودقة التصنيع، وتشييد القطعة، والكتامة ضد الماء.

3. الأعصاب الرأسية

يجب تصميم الأعصاب الرأسية للقطع من النوع الصندوقي لنقل قوة الدفع للقطع الدوارة للترس إلى الحلقة القطعية المجاورة.

4. العزل المائي

كقاعدة عامة، يجب تأمين أخدود محكم الإغلاق وأخدود عزل على سطح الفواصل لمنع الماء من التسرب.

5. فتحات الحقن

يجب تأمين فتحات حقن في القطع من أجل الحقن للردم الخلفي المنتظم، حسب الضرورة.

6. حمالات القطع

يجب تأمين حمالات القطع لكل واحدة من القطع.

7. قابلية التشغيل، والترتيب، وتثبيت التسليح

1. يجب تحديد ترتيب ثني القضبان الحديدية بالنظر إلى فعالية التسليح، والإنشاء، والتعبئة الخرسانية، ووضع التسليح.
2. ويجب أن يكون التباعد الأفقي بين التسليح الرئيس أعرض من القيمة الأكبر بين: 4/5 من الحد الأعلى لحجم الحصى الخشن أو قطر التسليح. ويجب أن يكون الخلوص الرأسي بين التسليح الرأسي، إذا تم ترتيبه على طبقتين أو أكثر، أعرض من القيمة الأكبر بين: 0,8 إنش (20 ملم) أو قطر التسليح.
3.
4. ومن حيث المبدأ، فإنه لا يسمح بفواصل التسليح للقطع. وفي حالة كون الفواصل ضرورية، فإنه يجب تصميم الفواصل بناء على مواصفات وأقطار التسليح، والنوع المناسب للفاصل وخلوصات التعبئة بين التسليح مع الخرسانة. ويكون التسليح الرئيس، والكانات، وقضبان التوزيع، وقضبان التشييد وقضبان التثبيت، جميعها مطلوبة لتنفيذ القطعة. ومن الصعب ضمان الخلوص الكافي، ومن ثم فإنه يجب عدم تأمين فواصل قضبان حديدية في القطعة.
5. ويجب تثبيت نهايات التسليح في الخرسانة برباط كافٍ، أو خطافات، أو وصلات ميكانيكية.
6. ويجب تحديد تغطيات الخرسانة بالنظر إلى نوعية الخرسانة، أو أقطار التسليح، أو دقة إنتاج القطع أو البيئة الخاصة بالنفق.

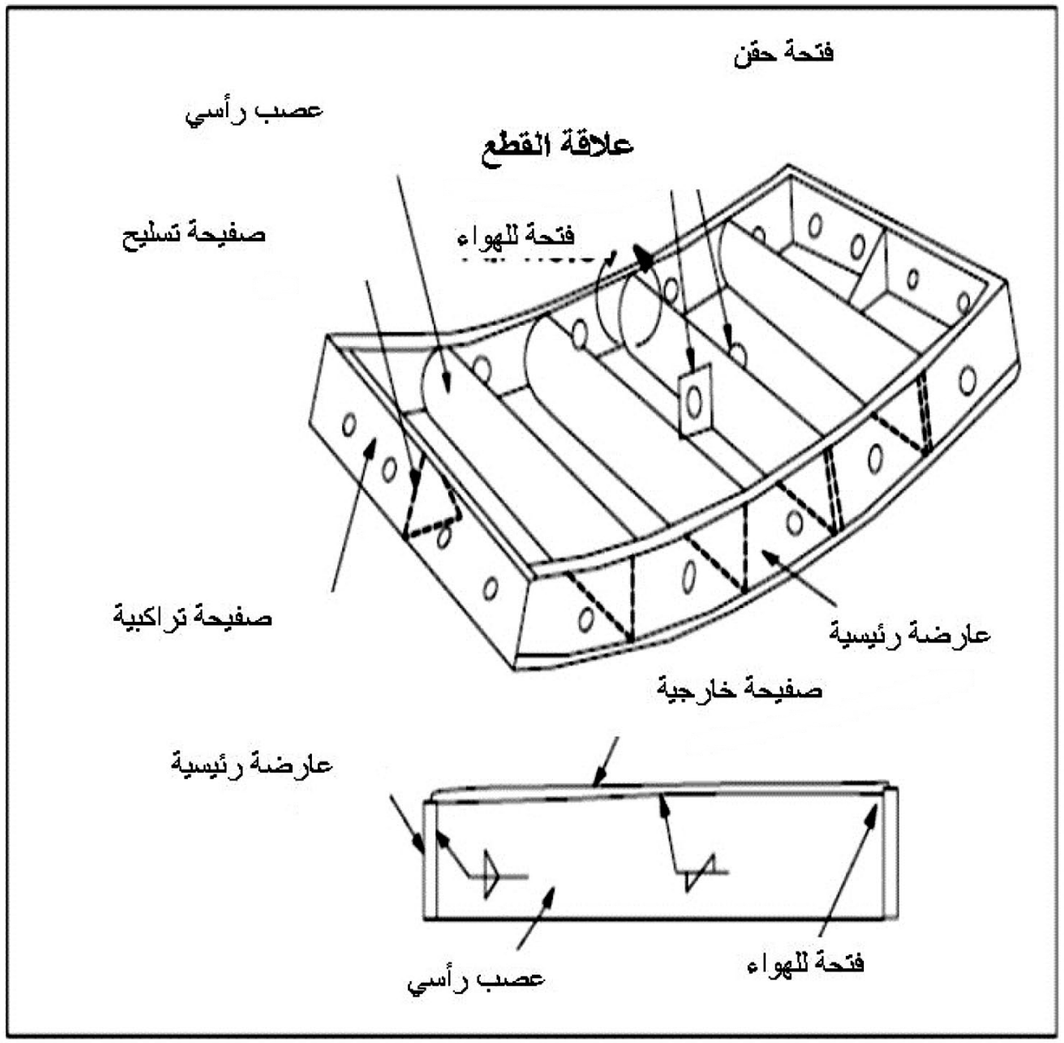
8. الحماية من التآكل والصدأ

يجب توفير إجراءات الحماية من التآكل والصدأ للقطع، حسب الضرورة.

9. تفاصيل تصميمية أخرى

- يجب تنفيذ اللحام بشكل دقيق بالتوافق مع طريقة العمل المعتمدة، وإجراءات الحصول على النوعية المحددة.
- يجب توفير فتحات هواء لإزالة الهواء خلال صب الخرسانة للبطانة الثانوية، في القطع الفولاذية وقطع الحديد الصمبوبة المرنة (اللدنة).
- صفيحة التسليح - بالنسبة لقطع الحديد، يجب توفير صفيحة تسليح لتقوية شريحة التراكب وزيادة قساوة منظومة التجميع أو الوصل، عند الضرورة.

ويجب توفير البطانة الثانوية عندما يتم استخدام القطع الفولاذية وقطع الحديد المصبوبة المرنة كبطانة رئيسة للأنفاق المنفذة بالتروس، إذ من الصعب تعبئة الخرسانة في الصناديق المحاطة بالعوارض الرئيسة والأعصاب الرأسية بسبب الفراغات الهوائية عند تركيب البطانة الثانوية. ويجب توفير فتحات هواء لإزالة الهواء عند زوايا الأعصاب الرأسية، كما هو مبين في الشكل 3 - 22.



الشكل 3 - 22: فتحات الهواء للقطع الحديدية (JSCE,2001)

9-7-3 حفر النفق باستخدام الدعامات المركزية المرحلية

1-9-7-3 مقدمة

يستخدم حفر النفق عن طريق الدعامات المركزية المرحلية لإنشاء فتحات كبيرة قليلة العمق تحت الأرض أسفل المرافق التي يجب أن تبقى في الخدمة خلال التنفيذ. وإن الطريقة، المستنبطة من طريقة دفع الأنابيب المركزية، تستخدم عادة في الأرض الطرية للأنفاق ذات الطول القصير نسبيًا، بينما طرق الـTBM أو الحفر والتغطية تعدُّ أقل تفضيلًا.

إن أسلوب حفر النفق باستخدام الدعامات المركزية المرحلية ليس جديدًا، ولكن في السنوات الأخيرة تم استخدامه لإنشاء الفتحات أولًا في أوروبا وآسيا، غالبًا تحت خطوط السكك الحديدية والطرق السريعة.

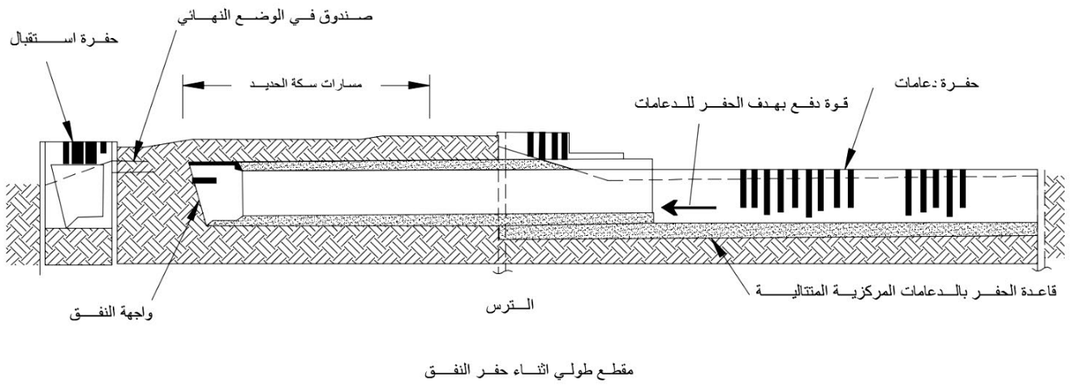
وحتى فترة قريبة، عندما تم استخدامه في مشروع نفق/الشريان المركزي (CA/T) في بوسطن، فقد بقي الأسلوب محدود الاستخدام في الولايات المتحدة. ولكن استخدامه في مشروع CA/T كان الاستخدام الأكبر من نوعه في العالم، ما أدى إلى حصوله على العديد من الجوائز والأوسمة.

وتعدُّ Ropkins (1999) and Taylor & Winsor (1999) مراجع ممتازة في مجال تصميم وتنفيذ الأنفاق المثبتة.

2-9-7-3 اختيار التقنية

يجب أن يأخذ اختيار التقنية في الحسبان ما يلي:

- مغلف خلوص النفق المطلوب.
- متطلبات الخدمات في النفق المكتمل.
- خطوط النظر للسائقين.
- المقدار المقبول من العوائق للمرافق المعتلية.
- القدرة على إعادة تسوية أو ضبط المرافق المعتلية دوريًا خلال الإنشاء.
- العمق الأمثل من سطح الأرض إلى أعلى النفق.
- ظروف الأرض بالنسبة للاستقرار عند واجهة النفق ولتوفير قوة التثبيت المطلوبة لتركيب الأنفاق.
- تدابير الصيانة للنفق المكتمل.
- تفاصيل أي منشآت أو أنفاق ملاصقة.
- المتطلبات المعمارية/الجمالية.
- صحة وسلامة الفريق المنفذ.



الشكل 3 - 23: التتابع الأساسي للحفر الخاص بتثبيت الدعامات المركزية (أخذ عن Ropkins,1999)

3-9-7-3 التعاقب الأساسي للتثبيت

يوضح الشكل 3. 23 التتابع الأساسي للتثبيت بالنسبة للأنفاق الصندوقية المثبتة، باستخدام صندوق وحيد القطعة مصبوب في الموقع.

يتم تنفيذ هيكل الصندوق على قاعدة تثبيت في حفرة التثبيت موضوعة على جانب واحد من السكة الحديدية الموجودة. وتأمين ترس شق النفق أمام نهاية الصندوق، وتأمين روافع هيدروليكية في الخلف. وشق نفق الصندوق حتى موقع أسفل مسارات السكة الحديدية بحفر الأرض من داخل الترس ودفع الصندوق للأمام.

وللحفاظ على تدعيم واجهة النفق، يتم القيام بالحفر والدفع بشكل طبيعي بالتتابع مع زيادات صغيرة في التقدم.

4-9-7-3 التصميم

1. سحب الأرض

يجب أن يتضمن التصميم تدابير للسيطرة على السحب للأسفل. والحل الممتاز بالنسبة للصناديق الأطول هي النظام المضاد للسحب (ADS)، الذي ناقشه Ropkins (1999)، الذي يفصل بشكل قوي السطح الخارجي للصندوق عن الأرض المجاورة خلال شق النفق.

ويتألف النظام للسحب من مجموعة من الحبال السلكية المتباعدة بمسافات قليلة والتي يتم استيعابها بشكل أولي داخل الصندوق بنهاية واحدة من كل حبل مربوط بحفرة التثبيت. وعندما يتقدم الصندوق، يتم سحب الحبال تدريجيًا من خلال فتحات توجيه في الترس ومن طبقة فاصلة ثالثة بين الصندوق المتحرك والأرض المجاورة. ويتم امتصاص قوى السحب بواسطة النظام المضاد للسحب والمؤخرة المنقولة إلى حفرة التثبيت. وبهذا الأسلوب يتم عزل الأرض عن قوى السحب ويبقيها دون اضطراب إلى حد كبير.

2. التراصف الرأسي

يجب أن يتضمن التصميم أيضًا تدابير للتحكم بالتراصف الرأسي. ويتمتع الصندوق الطويل باستقرار توجيهي بحكم نسبة طوله إلى عمقه الكبيرة. ويتم توجيه الصندوق خلال المراحل الأولى من التركيب بواسطة وزنه الذاتي المؤثر في قاعدة التثبيت.

وخلف قاعدة التثبيت، أسفل «مسارات» النظام المضاد للسحب، يبقي الصندوق على تراصف رأسي صحيح. وبما أن الضغط على الأرض تحت «المسارات» يكون عادة أقل من أو مشابهًا للضغط المسبق الموجود في الأرض، وبما أنه يتم التخلص من العوائق المحلية للأرض، فإنه لا يمكن حدوث هبوط للمسارات. وبتلك الوسيلة يتم منع أي توجه لصندوق نحو الغوص.

وفي حالة الصندوق القصير أو سلسلة الصناديق القصيرة، فيكون من الضروري توجيه كل صندوق عن طريق تغيير ارتفاع دفع التثبيت. ويتم القيام بذلك بواسطة مجموعات من الروافع عند كل محطة تثبيت على ارتفاعات مختلفة ضمن ارتفاع الصندوق وبواسطة مجموعات عزل منفردة منتقاة. وإن عملية التثبيت معقدة من ناحية الحاجة للتحقق، عند كل مرحلة من العملية، من تراصف كل الوحدات الصندوقية وعند الضرورة استخدام استجابة توجيه مناسبة عند كل محطة تثبيت.

3. التراصف الأفقي

يجب أن يتضمن التصميم أيضًا تدابير للتحكم بالتراصف الأفقي. فكما تمت مناقشته سابقًا تحت بند التراصف الرأسي، فإنه يكون للصندوق الطويل درجة استقرار توجيهي بحكم نسبة طوله إلى عرضه، ويتم توجيهه بشكل طبيعي خلال المراحل الأولى من التركيب عن طريق موجهات ثابتة موضوعة على قاعدة التثبيت على امتداد جانبي للصندوق. وعندما يكون مناسبًا، فيمكن أيضًا استخدام وسائل التوجيه، ويتم توفيرها عادة بواسطة مجموعة واحدة عازلة منتقاة أو أكثر من روافع الدفع الموضوعة على خلفية الصندوق. في حالة الصندوق القصير أو سلسلة من الصناديق القصيرة، فإن موجهات جانبية ثابتة تكون أيضًا مناسبة، لكن الاعتماد الأكبر يجب أن يكون على وسائل التوجيه.

4. نقص الواجهة

يجب أن يتضمن التصميم أيضًا تدابير للتتحكم ينقص الواجهة والذي يحدث عندما تتحرك الأرض المواجهة للترس باتجاه النفق كنتيجة لنقصان الضغط الجانبي في الأرض عند واجهة النفق. ومع نقص الواجهة، أثناء تقدم النفق، فإنه يتم حفر حجم أكبر من الأرض أكثر مما هو مخطط بالحجم النظري المزاح مع تقدم النفق.

في الأرض المتماسكة، يتم التحكم بنقصان الواجهة بتدعيم الواجهة في كل الأوقات بوسائل يتم تصميمها على وجه الخصوص على ترس شق الأنفاق وبتحكم حذر بكلا الأمرين: حفر الواجهة وتقدم الصندوق. ويتم تقسيم الترس عادة إلى خلايا بواسطة جدران داخلية ورفوف يتم دفعها بشكل ثبات داخل الواجهة. وفي الوضع النموذجي، يتم تشذيب 150ملم من التربة من الواجهة، حيث بعدها يتم دفع الصندوق للأمام بمقدار 150ملم. وفي العادة يتم هذا التتابع حتى تكتمل عملية شق النفق، وهكذا تتم المحافظة على التدعيم الضروري للواجهة.

قد تحتاج الأرض إلى أن تكون مستقرة مع تقدم عملية شق النفق، حيثما تكون الأرض ضعيفة أو حيثما يكون هناك مستوى عال من المياه أو ضغط ارتوازي. وتتضمن تقنيات تثبيت الأرض: الحقن، وبئر نزع الماء، والتجميد.

ويجب أن يتأكد مصمم النفق من أن إجراءات معالجة الأرض لا تسبب بنفسها درجة غير مقبولة من الاضطرابات الأرضية والحركة السطحية.

5. القطع الزائد

يجب أن يتضمن التصميم أيضًا تدابير للتحكم بالقطع الزائد في الأرض الطرية، عن طريق التأكد من أن محيط الترس يبقى مطمورًا ويقطع الأرض حسب المقطع المطلوب. لكن، تلزم درجة من القطع الزائد عند السقف والجوانب فوق الأبعاد الاسمية للصندوق وذلك لسببين:

1. يجب أن تكون الحفرة التي يتنقل من خلالها الصندوق أكبر بشكل كافٍ لتلائم الانحرافات في الأسطح الخارجية من الصندوق.
2. إنه من المرغوب تخفيض ضغوط التماس بين الأرض والصندوق، لتخفيض السحب.

يجب تخفيض مقدار القطع الزائد المطلوب إلى الحد الأدنى إذا أريد تجنب الاضطرابات الأرضية غير الضرورية والهبوطات السطحية. ويتطلب هذا الأمر تشكيل السطوح الخارجية للصندوق بشكل دقيق قدر الإمكان.

إن نسب السماح بتجاوز التشكيل النموذجي هي: ± 10ملم في الأسفل و ± 15 ملم عند الجدران والسقف.

6. عملية شق النفق

يجب مراقبة عملية شق النفق باستخدام صندوق التثبيت المدفوع كما يجب التحكم بها بحذر لضمان الأداء والسلامة المناسبتين. وطوال عملية شق النفق، فإن الانتقالات عند سطح الأرض فوق المنطقة المتأثرة بعملية شق النفق، وقوى الدفع، وتراصفات الصندوق، تخضع جميعها للمراقبة بشكل منتظم وتقارن بالقيم المحددة أو المتنبأ بها.

ويمكن ضبط عملية التثبيت أو الدفع بناءً على بيانات المراقبة.

7. تثبيت الصندوق وأحمال النظام المضاد للسحب

أ. أحمال سحب السطح البيني
يتم سحب ضغوط التماس بين التربة والصندوق وتضرب بعوامل الاحتكاك المناسبة، وتستخدم لتقدير أحمال السحب عند أسطح الاحتكاك البينية، ويتم استخدام قيمة مناسبة للإلتصاق عند السطح البيني بين الصندوق والأرض المتماسكة.

ب. حمولة التثبيت
يتم استخدام ضغوط التحمل القصوى على واجهة التدعيمات وعلى محيط الترس لحساب حمولة التثبيت اللازمة لتقدم الترس.

ج. أحمال النظام المضاد للسحب
وضع افتراضات مبسطة في نشوء أحمال النظام المضاد للسحب ونمذجة تفاعل الصندوق/النظام المضاد للسحب/التربة، والتأكد من صحة ما تم القيام به عن طريق التحليل الرجعي للأحمال والبيانات التاريخية الأخرى.

د. دفع التثبيت
يتم توفير دفع التثبيت بوسائل من أجهزة دفع هيدروليكية عالية القدرة مبنية خصيصًا. ويمكن استخدام دافعات بقوة 4448 كيلو نيوتن أو أكثر على الأنفاق الكبيرة.

ويتم تأمين قدرة كافية، عن طريق دافعات متعددة، للسماح بالتحكم التوجيهي وإمكانية الخطأ في تقدير أحمال الدفع (التثبيت).

ويتم تأمين رد فعل التثبيت الناشئ بواسطة قاعدة التثبيت أو جدار الدفع، بناء على طبوغرافية الموقع والارتفاع النسبي للنفق. وهذه المنشآت المؤقتة يجب بدورها أن تنقل الدفع نحو كتلة ثابتة من الأرض المجاورة.

ويتم تثبيت قاعدة التثبيت (الدفع) بواسطة تفاعل القص مع الأرض تحت وعلى كل جانب. وعندما يكون السطح البيني احتكاكيًا، فإنه يمكن تعزيز التفاعل بزيادة حمل قاعدة التثبيت بوسائل من مثبتات أرضية مسبقة الإجهاد أو مخلفات النفقة المدموكة. ويتم أيضًا تثبيت قاعدة التثبيت بواسطة النظام المضاد للسحب العلوي والسفلي المثبت بها.

ويتم تثبيت جدار الدفع عادة بواسطة ضغط الأرض السلبي. في نشوء رد الفعل هذا، قد يتحرك الجدار في التربة ويجب أن تؤخذ هذه الحركة في الحسبان عند تصميم منظومة التثبيت (الدفع). وعندما يتم استخدام جدار الدفع في الجوانب الرأسية من حفرة التثبيت (الدفع)، فإنه يلزم الحذر للتأكد من أن حركة جدار الدفع تحت الحمولة ان تسبب أي فقدان في الاستقرار في مكان آخر من الحفرة.

8-3 الأنفاق الصخرية

1-8-3 عام

توجد شكوك حول خواص المواد الصخرية والطريقة التي تتصرف بها المواد الصخرية والمياه الجوفية.

ويجب التغلب على هذه الشكوك عن طريق استعمال تصميم دقيق مرن وأمور ثانوية، تتضمن اختيار أو توقع طرق التنفيذ.ويجب أن يكون التصميم عملية حذرة ومتأنية تجسد المعرفة.

وانطلاقًا من قواعد عديدة؛ فإن القليل من المهندسين يعلم ما فيه الكفاية حول التصميم والتنفيذ، وعمليات التشغيل، والحسابات البيئية، والممارسات المالية العقدية، لاتخاذ جميع القرارات المهمة.

2-8-3 الفجوات (الانقطاعات) الصخرية

هناك نوعان رئيسان يجب أن يؤخذا في الحسبان:

- التكسرات، التي تنجم عن برود الماغما، أو التأثير التكتوني، أو تشكل الطيات المقعرة والطيات المحدبة، أو أي إجهادات جيولوجية أخرى.
- سطوح الانفصال التي هي عبارة عن طبقًات رقيقة نسبيًا من مواد أضعف تؤدي إلى إيجاد انقطاع واضح، وتكون منتشرة بين طبقًات مواد رسوبية أكثر كفاءة.

والتصدعات هي أي انكسار يظهر إزاحة نسبية، وهي نتيجة النشاط الزلزالي على عمق كبير. ويجب على مهندس النفق أن يأخذ في الحسبان، كلًا على حدة، تلك التصدعات التي تظهر نشاط انزياح كبير، ويؤمن الاستقرار الضروري على كل جانب من جوانب التصدع. وبشكل خاص، فإن الحركات قد تكون متقابلة بحيث يكون لها تشكيل جاف ومحكم مقابل تشكيل حامل للماء بشكل وفير، مع جريان ناتج قد يحطم المنطقة التي تجري فيها حفريات النفق، إذا لم يكن ذلك متوقعًا.

الشقوق الصخرية هي تصدعات التي لا يوجد على امتدادها انزياح ملحوظ. ويجب أن يأخذ مهندس النفق في الحسبان الشقوق المستمرة وغير المستمرة، وشكل الشقوق (وخصوصًا الشقوق المستوية)؛ وخشونة الشقوق (ناعمة، أو متشابكة؛ أو ملساء)؛ وتبدل الشقوق، وأسطح الانفصال.

3-8-3 الحركات الصخرية

يجب، في أغلب الأحيان، على مهندس النفق، في تصميم العنصر الإنشائي الأساسي (القوس الصخري أو القشرة الصخرية) أن يفترض أن الحركات المرنة غير مهمة. ويجب أن يتألف التصميم من تقييم الحركات الاستثنائية للشقوق والكتل وكيفية السيطرة عليها.

وهناك نوعان من الحركات يجب أن يؤخذا في الحسبان:

- الحركات الاحتكاكية، بمقاومة عالية، حيث يتم توفير الاحتكاك بواسطة شكل وسطح الشق، وكمية الشقوق.
- الحركات الانزلاقية، حيث تفصل المواد المترسبة الشظايا الصخرية، أو أن الصخر نفسه يكون قد تحول إلى مقاومة أضعف (مثلما هو الحال في الطبقًات السليمة]لا يوجد فيها شقوق[، وغير المتحولة] نظيف/حاد[، والمتحولة]طبقة خارجية غير مضعفة إلى تأكلات مضعفة.

وفي عملية تقييم الكتلة الصخرية، يجب على مهندس النفق أن يأخذ في الحسبان: وجود الماء؛ وظروف الموقع الأصلي؛ ومناطق الضعف الخاصة. ويعمل الماء الحر في الفجوات كزيت تشحيم وهو عائق مهم في شق النفق.

4-8-3 تسليح الصخر

هنالك نوعان من التسليح يجب أن يؤخذا في الحسبان:

- **البراغي الصخرية**: (تتضمن الخوابير الصخرية والأوتار الكابلية)؛ تكون البراغي مسبقة الشد، وتكون الخوابير غير مجهدة بشكل أولي. يجب استخدام البراغي في حالات خاصة، كالدعامات الضيقة جدًّا، حيث يعدُّ التقييد الإضافي الذي توفره قوة سبق الشد ضروريًّا. ويجب أن يكون استخدام الأوتار مقتصرًا على المسافات الطويلة بين المثبتات والسطح المحفور؛ كمثال، الثخانة غير الكافية من الصخر السليم (الكامل) المعتلى من قبل ثخانة كبيرة من الصخر غير الكفء يمكن تدعيمها عن طريق تثبيتها بطبقة اعتلاء ثانية من الصخر غير الكفء. ويجب أن يؤخذ في الحسبان كلا الأمرين البراغي الدائمة والبدائل الاقتصادية (براغي الاحتكاك).
- **الخرسانة المقذوفة**: تعمل كتسليح للصخر عن طريق شق طريقها ضمن الفسحات بين قطع الصخر البكر عندما تستخدم على الصخر بضغوط عالية، وهي تمنع التطاير، وهي بهذه الطريقة تزيل الضغط الصخري المقيد عند السطح وتقيد الحركة ضمن الكتلة. ويسمح لها حصولها السريع على القوة بالعمل بسرعة كغشاء، بعد ذلك تحصل على القوة لأن الصخر المقيد حديثًا سيكافح لتحقيق حالة توازن جديدة.

5-8-3 تصميم التدعيم الأولي

يتم تركيب التدعيم الأرضي الأولي بعد الحفر بوقت قصير، لجعل الفتحة تحت سطح الأرض آمنة حتى يتم تركيب التدعيم الدائم. وقد يعمل التدعيم الأرضي الأولي أيضًا كمنظومة أو جزء من منظومة التدعيم الأرضية الدائمة. ويجب اختيار منظومة التدعيم الأرضية الأولية من منظور وظائفها المؤقتة والدائمة.

ويجب أن يستخدم مهندس النفق أحد المنهجيات التالية لاختيار التدعيم الأرضي الأولي.

1-5-8-3 القواعد التجريبية

وتنشأ من سجل الخبرات في الأداء السابق المرضي. وإذا تم استخدام هذه المنظومات التجريبية، فمن الضروري فحص المعلومات المتوفرة عن الكتلة الصخرية لتحديد فيما إذا كانت هناك أية أنماط انهيار قابلة للتطبيق لم يتم التعامل معها بالمنظومات التجريبية. وتتضمن المنظومات التجريبية ما يلي:

1. أحمال ترزاكي الصخرية و RQD [1964]

بشكل عام، يجب عدم استخدام أحمال ترزاكي الصخرية مع طرق الحفر والتدعيم التي تخفض اضطرابات وارتخاءات الكتلة الصخرية إلى الحد الأدنى، مثل الحفر بآلة ثقب الأنفاق TBM والتدعيم الأرضي الفوري باستخدام الخرسانة المقذوفة وأوتاد التثبيت.

2. طريقة وايكمان Wichman et al.'s RSR [1972]

تتألف قاعدة بيانات الـRSR من 190 مقطع عرضي نفقي، حيث يوجد فيها ثلاثة فقط مدعمة بالخرسانة المقذوفة،

وأربعة عشر مدعمة بالبراغي الصخرية. ومن ثم، فإنه يجب استخدام الـ RSR في توصيات الأحمال الصخرية للأعصاب الحديدية.

3. التصنيف الجيوميكانيكي لبينياواسكي Bieniawsk's Geomechanics Classification [1979] RMR

إن منظومة الـRMR مبنية على مجموعة من وقائع حالات أنفاق كبيرة نسبيًّا تم حفرها باستخدام المتفجرات. وتتضمن مكونات التدعيم الأرضي براغٍ صخرية (أوتاد تثبيت)، وخرسانة مقذوفة، وشبكات من الأسلاك، وبالنسبة للصنفين الأكثر ضعفًا، فيتم استخدام أعصاب فولاذية. ويجب استخدام المنظومة لمثل هذه الحالات، ويجب عدم استخدامها للأنفاق التي تحفر بآلة الأنفاق TBM، حيث يكون تضرر الصخر أقل، وحيث إنه قد لا يكون من العملي استخدام الخرسانة المقذوفة الفورية.

4. نظام بارتون Barton et al's Q System [1974]

إن هذه المنظومة مشتقة من قاعدة بيانات لفتحة تحت سطح الأرض المحفورة بواسطة المتفجرات والمدعمة بالبراغي الصخرية (المشدودة وغير المشدودة)، والخرسانة المقذوفة، وشبكات الأسلاك والسلاسل المترابطة، والأقواس الخرسانية المصبوبة في المكان. ويتم رفع قيمة Q بعامل مقداره 5.0 للأنفاق المحفورة بطريقة بالـTBM.

2-5-8-3 الطرق النظرية وشبه النظرية

1-3-5-8-3 تحليل البراغي الصخرية

عندما تكون اتجاهات الانقطاعات الصخرية معروفة، فإنه يجب استخدام تحليل الوتد (الإسفين) من أجل تحليل البراغي الصخرية، الذي به يتم تحليل استقرار وتد (أسفين) باستخدام معادلات توازن ثنائية وثلاثية البعد. وسيبين تحليل الأسفين (انظر المثال في الشكل 3ـ 24) أي من الأسافين يمكن أن يكون غير مستقر، وسيشير إلى التوجيه المناسب للبراغي أو الخوابير (المسامير) لدعمها. ويلخص الجدول رقم 3 ـ 6 القواعد التجريبية لتصميم البرغي الصخري (أخذ عن Lang, 1961).

2. تحليل الخرسانة المقذوفة

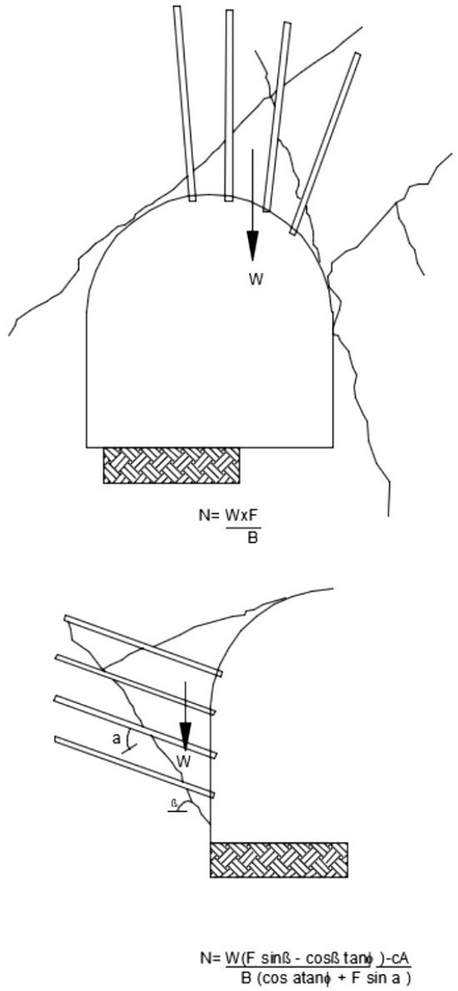
تستخدم الخرسانة المقذوفة لإحداث بطانة فورية شبه قاسية على سطح الصخر المحفور. وبواسطة قدرتها على قبول القص والانحناء وارتباطها بالسطح الصخري، فإن الخرسانة المقذوفة تمنع إزاحة كتل الصخر التي يمكن أن تسقط؛ ويمكن أيضًا أن تعمل كقشرة وتقبل أحمالاً نصف قطري. ويمكن تحليل جميع هذه الأنماط من الانهيار فقط إذا كانت الأحمال والشروط الجدية معروفة. ويجب ملاحظة أنه لا «نظرية الكتل المتساقطة» (التي بها يتم افتراض تحميل وزن الوتد الصخري على السطح الخارجي للخرسانة المقذوفة، التي يمكن بعدئذ أن تسقط بالقص، أو الشد القطري، أو فقدان الارتباط، أو الانحناء]الشكل 3 - 25 [ولا «نظرية القوس» (حيث يتم افتراض حمولة خارجية، ويتم تحليل قشرة الخرسانة المقذوفة كقوس، بانحناء وضغط)، تؤمن أي شيء باستثناء، تقريب غير متقن للاجتهادات في الخرسانة المقذوفة. وعندما يتم استخدام الخرسانة المقذوفة في طريقة شق الأنفاق النمساوية الجديدة NATM، فإنه يمكن استخدام التحليل الحاسوبي لاستخراج تعاقب التنفيذ، بما في ذلك تأثيرات تغيرات معامل وقوة الخرسانة المقذوفة مع الزمن. ومن ثم، يمكن للمرء تقدير تعاظم الحمولة في بطانة الخرسانة المقذوفة حالما تخضع الأرض لحفر إضافي، وحالما يتم استخدام طبقًات أكثر من الخرسانة المقذوفة.

3-8-5-4 الطريقة الأساسية – تصميم الأعصاب الحديدية والعوارض الشبكية

1. استخدام الأعصاب الحديدية والعوارض الشبكية

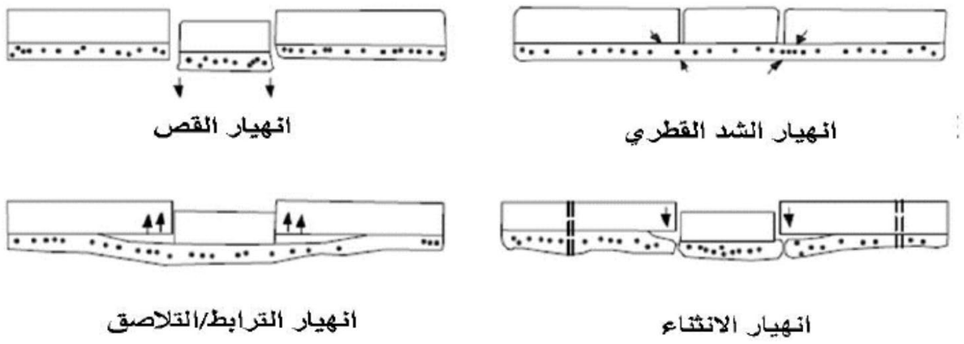
ينصح باستخدام المجموعات الحديدية كتدعيم أرضي بجانب مداخل النفق وعند التقاطعات، بالنسبة لأنفاق TBM المبتدئة، وفي الأرض الضعيفة في الأنفاق المنفذة بالمتفجرات، وفي أنفاق الـTBM في الأرض الضعيفة عندما تكون منصة رد الفعل للدفع مطلوبة. ويتألف القالب التقليدي من قوالب خشبية وأسافين (أوتاد)، مركبة بشكل محكم بين المجموعات والصخر، مع محاولة لسبق إجهاد المجموعة. وفي العهد القريب فإنه غالبًا ما يتم تحديد قوالب خرسانية أو حديدية.

يتم استخدام المقذوفة أيضًا، وعندما توضع بشكل جيد، فإنها تملأ الفراغ بين الأعصاب الحديدية والصخر، وهي تتفوق على الطرق الأخرى المقولبة شريطة التفاعل المنتظم بين الأرض والتدعيم.



N= عدد البراغي (الخوابير)
W= وزن الاسفين
F= عامل السلامة(1.5 الى3.0)
ϕ = زاوية احتكاك السطح
C= تماسك السطح المنزلق
A= مساحة السطح المنزلق
B= طاقة تحمل الحمولة للمسار (الخابور)

الشكل 3 - 24: تحليلات التثبيت الأرضي لتحديد حمولات التثبيت واتجاهها



الشكل 3ـ 25: أنماط انهيار الخرسانة المقذوفة

الجدول رقم 3 ـ 6: توصيات التصميم التجريبي (أخذ عن Lang, 1961)

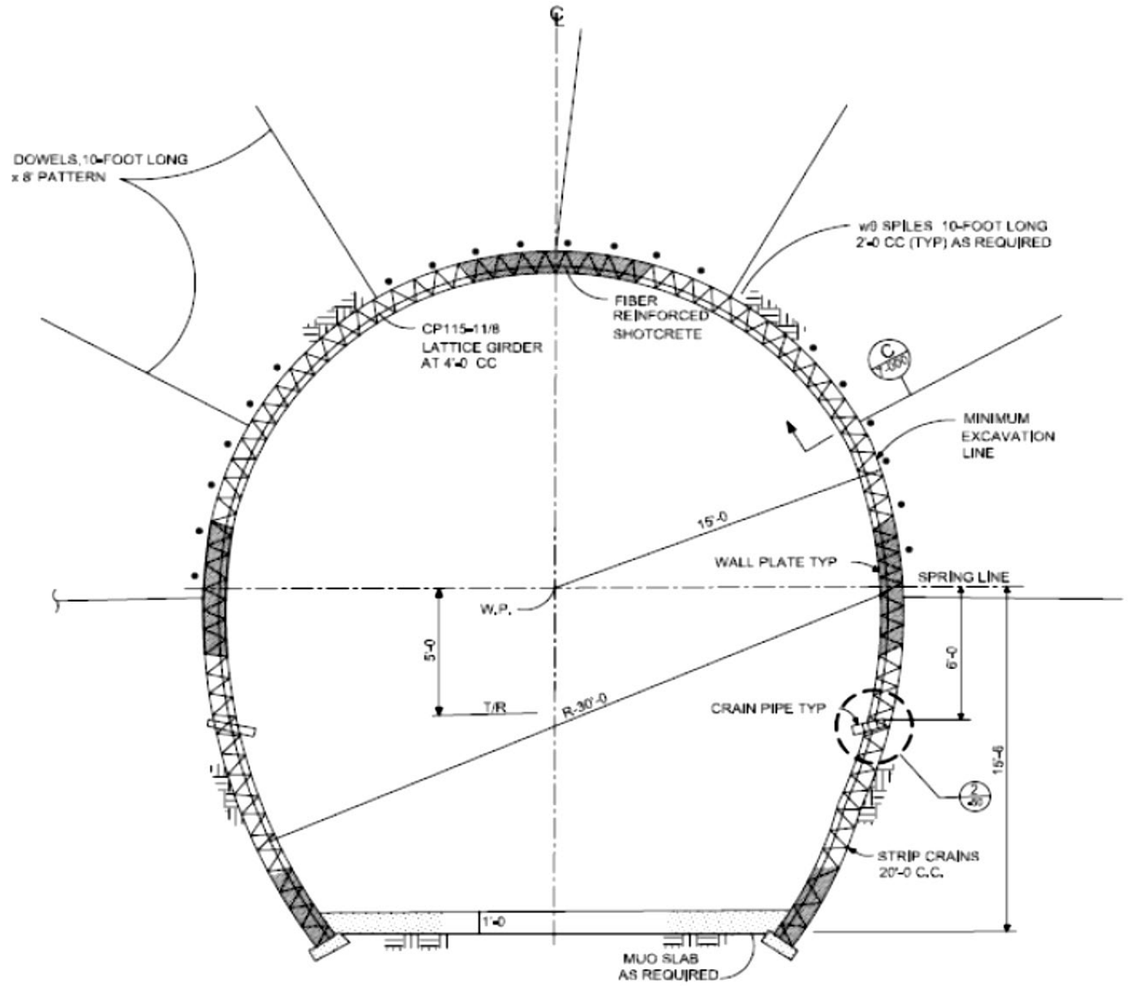
المعيار	القاعدة التجريبية
الطول الأدنى والتباعد الأعلى	
الطول الأدنى	الأكبر من:
(a)	2×التباعد بين البراغي
(b)	3×الثخانة
(c)	(الملاحظة1): بالنسبة للعناصر فوق خط النشاط: الفتحات>6م:0.5×الفتحة الفتحة بين 18 و 30م:0.25×الفتحة
(d)	بالنسبة للعناصر أسفل خط النشاط: الارتفاع>18م: كما في (c) أعلاه الارتفاع<18م: 0.2×الارتفاع
التباعد الأعلى	الأقل من:
(a)	0.5×طول البرغي
(b)	1.5×عرض الكتل الصخرية الحرجة والمتوقع تخلخلها (الملاحظة 1)
(c)	2.0م (الملاحظة 2)
التباعد الأدنى	0.9 إلى 1,2 م

الحد الأدنى لمتوسط ضغط القصور عند نقطة خضوع العناصر (الملاحظة 3)	الأكبر من:
(a)	فوق خط النشاط: كل ضغط= الحمولة الرأسية للصخر من 0.2×عرض الفتحة أو 40 كيلو نيوتن/م2
	أسفل خط النشاط:
(b)	كل ضغط=الحمولة الرأسية للصخر من 0.1×ارتفاع الفتحة أو 40 كيلو نيوتن/م2
(c)	عدد التقاطعات: 2×ضغط القصور المحدد أعلاه (الملاحظة4)

ملاحظات:

1. عندما يكون تباعد الشقوق قريبًا والفتحة كبيرة نسبيًا، فيمكن أن يكون انطباق نمطي التسليح مناسبًا (مثال، العناصر الطويلة الثقيلة على المحاور العريضة لتدعيم الفتحة، والبراغي الأقصر والأخف على المحاور الأقرب لتثبيت السطح ضد التطاير).
2. التباعد الأكبر من 2.0م يجعل ارتباط عناصر تدعيم السطح (مثال، الشبكات الملحومة أو شبكات السلاسل المترابطة) صعبًا.
3. بافتراض أن العناصر تتصرف بأسلوب لدن.
4. يجب تركيب هذا التسليح من الفتحة الأولى قبل تشكيل التقاطع. تكون تركيزات الاجتهادات عادة أعلى عند التقاطعات، والكتل الصخرية تكون حرة الحركة عند كلتا الفتحتين.

وتبدي العوارض المتشابكة قدرة عزم متماثلة عند وزن أقل من الأعصاب الحديدية القابلة للمقارنة. ومن السهل التعامل معها وإنشاؤها، وتسمح شبكاتها المفتوحة بإمكانية وضع الخرسانة المقذوفة بفراغات صغيرة أو معدومة في الأكناف خلف المنشأة الحديدية، ومن ثم يكتمل تشكيل المنشأ المركب. ويمكن أن تستخدم مع الخوابير، والسدادات، والشبكات السلكية، وكبطانة نهائية.



الشكل 3 - 26: العوارض الشبكية المستخدمة كتدعيم نهائي، مع خرسانة مقذوفة مسلحة بالفولاذ، والأوتاد (الأسافين)، والسدادات

أ. تصميم الأعصاب المقولبة

يتم رجوع مهندس النفق إلى Proctor & White (1946) من أجل تفاصيل تصميم (والرسوم التصميمية) الأعصاب الحديدية المركبة مع القالب، وإلى الأدبيات التجارية المتاحة من أجل تصميم الوصلات والتفاصيل الأخرى.

ب. العوارض الشبكية بقوالب مستمرة

تعمل نظرية الأقواس المقولبة بشكل كافٍ بالنسبة للعناصر الإنشائية المنحنية إذا كان القالب قادرًا على التشوه استجابةً للأحمال المستخدمة، شريطة أن ينقل القوس الدفع والعزم إلى نقاط نهاية القوس. وبالنسبة للقالب المستمر بواسطة الخرسانة المقذوفة، من ناحية أخرى، فإن القالب لا يخضع بشكل كبير عندما يكون لديه ثبات، ويعد توزيع الحمولة تابعًا لتداعيات الحفر والتركيب.

يجب تقدير العزوم في المنشأ المركب باستخدام إحدى الطرق التي تمت مناقشتها في القسم خ) تصميم البطانة النهائية الدائمة.

وينصح باستخدام طرق العناصر المحدودة أو الفروقات المحدودة في تقدير العزوم بالنسبة للحفر والتدعيم المتعاقبين، حيث يتم تنفيذ التدعيم الأرضي للنفق على مراحل.

وتقدم هذه التحليلات نتائج تقريبية فقط، لكنها مفيدة لتباينات الدراسة في تسلسلات التنفيذ، ومواقع العزوم وقوى الدفع العليا، وتأثيرات اختلاف خواص المواد والإجهاد الموضعي.

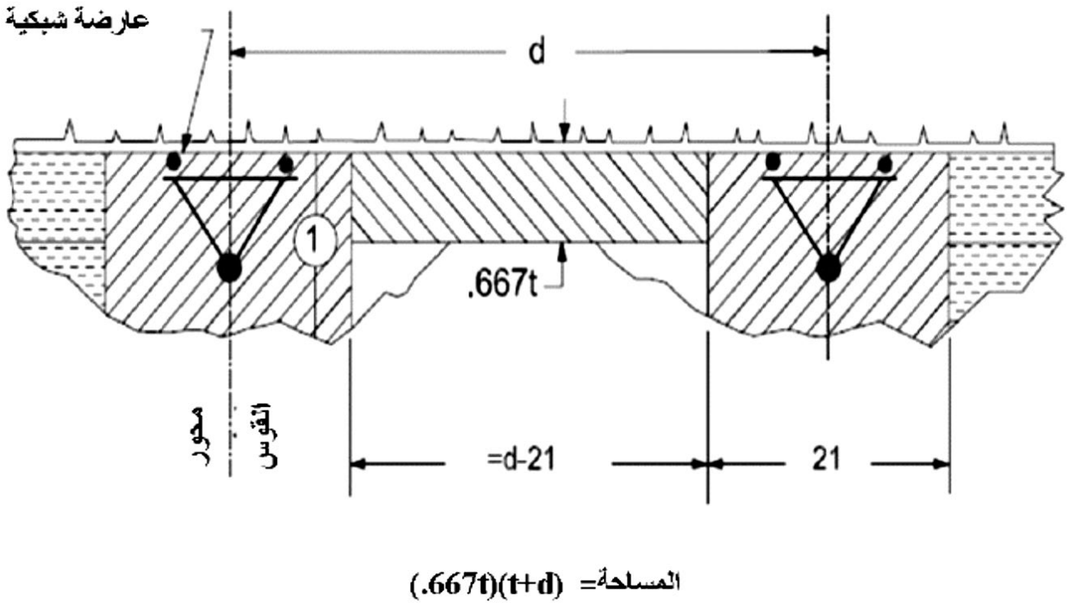
ويجب أن يشتمل التحليل على الأقل الميزات التالية:

1. عدم تحميل الصخر بسبب الحفر
2. استخدام التدعيم الأرضي

- أول استخدام الخرسانة المقذوفة
- تركيب عارضة شبكية
- تثاني استخدام للخرسانة المقذوفة
- تدعيمات أرضية أخرى (خوابير،... إلخ)، حسب مقتضى الحال

1. زيادة معامل الخرسانة المقذوفة مع الزمن أثناء جفافها.
2. الإعادة لكل تسلسلات حفر الواجهة الجزئي حتى يتم تحقيق إغلاق البطانة.

ويمكن تحليل الإجهادات في تراكيب العوارض الشبكية وبطانات الخرسانة المقذوفة بأسلوب مشابه للخرسانة المسلحة الخاضعة للدفع والانحناء (انظر الفقرة 3. 8. 7، "تصميم البطانات الدائمة النهائية"). ويبين الشكل 3. 27 مقاربة للتطبيق النموذجي للعوارض الشبكية والخرسانة المقذوفة. ويجب القيام بتحليل استيعاب العزوم باستخدام قوة الخرسانة المقذوفة القابلة للاستخدام عند الزمن الداخل في التحليل.



الشكل 3 - 27: تقدير المقطع العرضي بالنسبة للخرسانة المقذوفة المغلفة للعوارض الشبكية

6-8-3 التحليل الجيوميكانيكي

إن فهم استجابة الكتلة الصخرية لتنفيذ الأنفاق والممرات الرأسية ضروري من أجل تقدير متطلبات استقرار الفتحات وتدعيم الفتحات. وقد تم تطوير أساليب عديدة متفاوتة التعقيد لمساعدة المهندس على فهم استجابة الكتلة الصخرية. ولا تستطيع الطرق أن تأخذ في الحسبان كل المظاهر السلوكية للصخر، لكنها مفيدة في تحديد استجابة الصخر وتأمين توجيهات في تصميم التدعيم.

1-6-8-3 مفاهيم عامة

1. علاقات الإجهاد والتشوه

أ. معايير المرونة

المرونة هي النظرية الأبسط والأكثر استخدامًا فيما يتعلق بالإجهاد والتشوه في المواد. والمادة المرنة هي المادة التي يكون فيها كل التشوه مستردًا بشكل لحظي وكلي عند إزالة الإجهاد. وتمثل نظرية المرونة المادة كمادة مرنة خطيًا، منتظمة، متجانسة.

ويمكن تمثيل علاقة الإجهاد والتشوه في بعض الأحيان من منطلق مادة منتظمة مرنة خطيًا. وفي الأبعاد الثلاثة، بالنسبة لمادة منتظمة متجانسة مرنة خاضعة لإجهاد عمودي sx في الاتجاه x، تكون التشوهات في الاتجاهات x، y، z:

$$\varepsilon_x = \sigma_x / E$$
$$\varepsilon_y = \varepsilon_z = - \nu \cdot \sigma_x / E$$

حيث:

= الإجهاد المستخدم في الاتجاهx

= نسبة (معامل) بواسون

E = معامل المرونة

وبما أن قاعدة الإنطباق تطبق، فإن علاقات الإجهاد والتشوه في الأبعاد الثلاثة تكون:

$$\varepsilon_x = (\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)) / E$$

$$\varepsilon_y = (\sigma_y - \nu (\sigma_z + \sigma_x)) / E$$

$$\varepsilon_z = (\sigma_Z - \nu (\sigma_y + \sigma_x)) / E$$

بالنسبة لصخر كفاء غير مرن خطيًّا، فإنه يمكن تعميم علاقة الإجهاد والتشوه على شكل منحنى مع ميل متزايد عند مستويات إجهاد منخفضة (فيما يتعلق بإغلاق الشقوق المكروية)، أو منطقة خطية تقريبًا ذات حد أعلى للميل فوق جزئها الأوسط، ومنحنى ميل متزايد عند مستويات إجهاد قريبة من الانهيار. ولتطبيق نظرية المرونة على مثل هذه الصخور، فإنه من الضروري تحديد معامل مرونة تقريبي. والطرق المختلفة المتاحة لتحديد معامل المرونة هذا هي كما يلي:

- معامل المماس (ET) لنقطة معينة على المنحنى، أي، عند مستوى الإجهاد الذي يكون ثابتًا بعض الشيء بنسبة مئوية (عادة 50%) من الحد الأعلى للمقاومة.
- معدل ميل جزء الخط المستقيم بشكل أو بآخر من منحنى التوتر/الإجهاد.
- معامل القاطع (Es) عادة من الصفر إلى 10 لنسبة مئوية ثابتة بعض الشيء من الحد الأعلى للمقاومة.

بما أن قيمة نسبة بواسون (Poisson's Ratio) متأثرة بشكل كبير بعدم الخطية في منحنيات الإجهاد والتشوه المحورية والجانبية عند مستويات إجهاد منخفضة، فإن ASTM تقترح بأن يتم حساب نسبة بواسون من المعادلة:

n= ميل المنحني المحوري/ميل المنحني الجانبي

وبالنسبة لمعظم الصخور، فإن نسبة بواسون تقع بين 0.15 و 0.30 وبشكل عام، فإنه ما لم تتوفر معلومات أخرى، فإنه يمكن افتراض قيمة نسبة بواسون على أنها تساوي 0.25. ويتغير معامل المرونة على امتداد مجال واسع. ولغايات تقدير بسيطة، فإن عامل المرونة يساوي نحو 350 مرة من قوة الضغط أحادي المحور للصخر (Judd and Hubber 1961).

يحتاج تقدير قيم معايير المرونة التي تطبق في الميدان إلى اتخاذ قرار، ويجب أن يتم ذلك على أساس كل حالة على حده. وبالنسبة لكتلة صخرية قوية لكنها متشققة كثيرًا، فإن تخفيض قيمة E عن القيم المخبرية بجزء من قيمتها قد يكون سليمًا. ومن ناحية أخرى، فإنه عند اختبار صخور ضعيفة جدًّا (مقاومة الضغط أحادي المحور أقل من 3.5 ميغا باسكال، فإن تخريب العينة الناتجة عن إزالة عينة الصخر من الأرض قد يولد عيوب تؤدي إلى قيم منخفضة للمعامل المحدد مخبريًّا. وبالنسبة للمشاريع الحساسة، فإنه ينصح استخدام الاختبارات الميدانية لتحديد قابلية تشوه الصخر في الموقع.

ب. المعايير غير المرنة

يمكن وصف العديد من الصخور بالمرنة بدون التنازل بشكل جوهري عن تحليل أدائها. وعندما تكون الاجتهادات كبيرة بشكل كافٍ بحيث تنشأ منطقة الانهيار حول النفق، فإن التحليلات مرونة اللدائن تكون متاحة لتحليل الاجتهادات والتوترات. لكن، بالنسبة لبعض الصخور كالبوتاس، والهاليت، والصخر الصلصالي، فإن الانتقالات مع الزمن أو انتقالات الزحف قد تكون كبيرة، ويجب أن تؤخذ في الحسبان عند التكهن بالأداء (الكفاءة). لقد برهن Chabarmes (1982) نهاية الارتباط بالزمن بناءً على قانون الحالة الثابتة للزحف. وقد استخدم Lo and Yuen (1981) نماذج جيولوجية لوضع منهجية تصميم للتصميم الخطي المطبق على الصخر الصلصالي. ومن الصعب توصيف العلاقات التي تعتمد على الزمن بسبب صعوبة اختيار معايير مقاومة الصخر التي تؤدي إلى صياغة الكتلة الصخرية بدقة.

ج. قوة الصخر

إن مادة الصخر بشكل عام قوية من حيث الانضغاط، حيث يمكن أن يحدث انهيار قص بحيث تكون ضعيفة من حيث الشد. ويمكن أن يأخذ الانهيار شكل انكسار، حيث تتحطم المادة عند إجهاد معين، أو تشوه معين فوق مستوى تشوه محدد بعض الشيء.

وتبدي الصخور سلوكًا يدل على سرعة الانكسار عندما تكون حرة، لكنها تصبح أكثر لدونة عندما يزداد الحصر. وتكون الظروف في المبدان ضاغطة أصلًا، وتتباين من مناطق مجاورة لجدران النفق إلى محصورة لمسافة معينة بعض الشيء من النفق.

ولا تتأثر مقاومة الصخر فقط بالعوامل التي تتعلق ببنيتها الفيزيائية والكيميائية مثل التركيب المعدني لها، ومساميتها، والتصاقها، ودرجة تحولها أوتأثرها بالعوامل الجوية (التعرية)، ومحتواها المائي، ولكن أيضًا بطريقة الاختيار التي تتضمن عوامل مثل حجم العينة، وشكلها الهندسي، ومنهجية الاختبار، ومعدل التحميل.

د. مقاومة الضغط أحادي المحور

إن قوة الضغط أحادي المحور أو الضغط الحر هي المعيار الجيوتكنيكي الأكثر ذكرًا في توصيف السلوك الميكانيكي للصخر. ويمكن أن تكون مضللة، لأن الأداء الميداني غالبًا ما يعتمد على أكثر من مجرد مقاومة عينة بكر فقط، وهذه القيمة تكون خاضعة لعدد من العوامل المتعلقة بالتجربة التي يمكن أن تؤثر بشكل كبير في قيمتها. وتتضمن هذه العوامل حجم العينة وشكلها، ومحتوى الرطوبة، وعوامل أخرى. ويجب ألا تعتبر قوة الضغط أحادي المحور عادة معيارًا للانهيار، بل تعدُّ مؤشرًا يعطي توجيهًا على خصائص المقاومة. وهي مفيدة جدًّا كوسيلة لمقارنة الصخور وتصنيف سلوكها المحتمل.

تتوقف مقاومة الضغط لمادة الصخر على الحجم، حيث ترتفع المقاومة بانخفاض حجم العينة. ومن المفيد تعديل قيم مقاومة الضغط لتأخذ في الحسبان تأثير الحجم. وفيما يلي علاقة تقريبية بين مقاومة الضغط أحادي المحور وقطر العينة، والتي تسمح بالمقارنة بين العينات:

حيث: $\sigma_c = \sigma_{c50}\ (50/d)^{0.18}$

= مقاومة الضغط بالنسبة لقطر عينة مقداره 50ملم

d = قطر العينة (Hoeck and Brown 1980)

إن مقاومة الضغط لمادة الصخر غالبًا تنخفض عندما يكون الصخر مغمورًا في الماء. وقد تكون الإجهادات المنخفضة بسبب انحلال الملاط اللاصق الذي يربط القالب الصخري أو بسبب ضغوط الماء في الفراغ المسامي الرابط.

هـ. مقاومة الشد

بالنسبة للاستقرار تحت الأرض، فإن مقاومة الشد ليست معيارًا مهمًّا بمقدار مقاومة الضغط للصخور. وبشكل عام، تكون مقاومة الشد الصخري منخفضة بما يكفي بحيث إنه عندما يكون الصخر في حالة شد، فإنه يتفتت وتتحرر إجهادات الشد. وكقاعدة أساسية، تؤخذ مقاومة الشد لمادة الصخر غالبًا بمقدار عشر إلى واحد على اثني عشر من مقاومة الضغط أحادي المحور للصخر البكر (السليم). وفي الصخور المتشققة، قد تزيل الشقوق مقاومة الشد للكتلة الصخرية بشكل جيد جدًّا، وفي هذه الحالة يجب أن يعد صخر الموقع وكأنه ذو مقاومة شد مساوية للصفر. وتظهر قيم مقاومة الشد ومعايير جيوتكنيكية أخرى لبعض الصخور البكر (السليمة) في الجدول رقم 3 ـ 7.

و. معيار انهيار مور ـ كولومب

يطبق معيار انهيار مور ـ كولومب غالبًا إلى أبعد حد في الصخر في حالة الإجهاد ثلاثي المحور. ويقوم هذا المعيار على (1) انهيار الصخر الذي يحدث ما إن تصل مقاومة القص على طول أي مستوي إلى مقاومة قص المادة و (2) مقاومة القص على طول أي مستوي حتى تكون تابعة للإجهاد العمودي n على ذلك المستوى، و (3) مقاومة القص

تكون مستقلة عن الإجهاد الرئيس الوسطي. ويظهر مخطط الشكل العام للإجهاد العمودي مقابل إجهاد القص في الشكل 3 - 28. وكتقريب فوق المجالات المحدودة للإجهاد العمودي، يتم تحديد إجهاد القص كعلاقة خطية من الإجهاد العمودي كما يلي:

$$\tau = c + \sigma_n \times \tan \Phi$$

حيث:

τ = قوة القص

σ_n = الإجهاد العمودي المطبق

c = تماسك الصخر

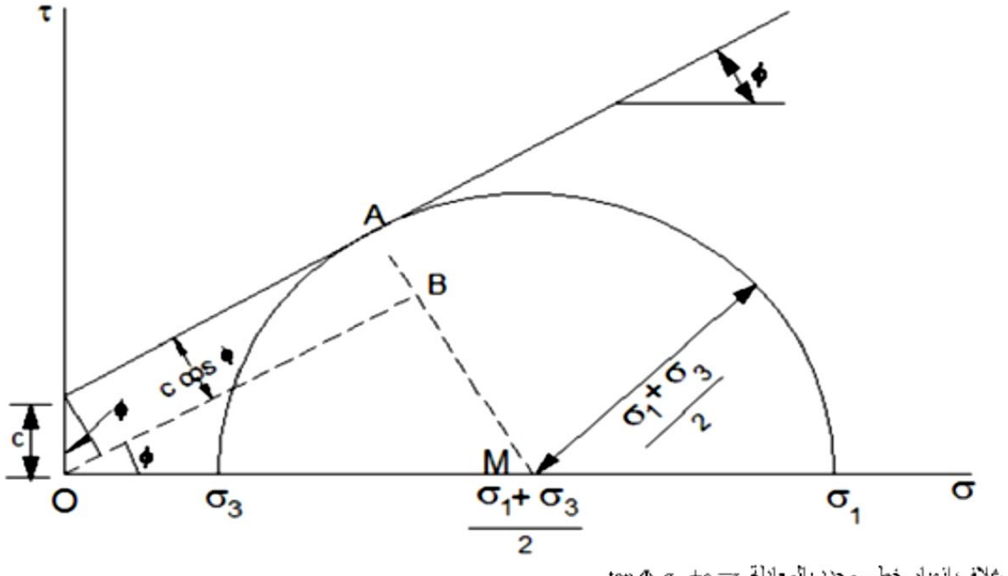
Φ = زاوية الاحتكاك الداخلي

الجدول رقم 3 - 7: البارمترات الجيوتكنيكية لبعض الصخور البكر (أخذ عن Lama and Vutukuri 1978)

Rock Type	Location	Mg/m	Modulus,Gpa	Strength,MPa	MPa
Amphibolite	California	2.94	92.4	278	22.8
Andesite	Nevada	2.37	37.0	103	7.2
Basalt	Michigan	2.70	41.0	120	14.6
Basalt	Colorado	2.62	32.4	58	3.2
Basalt	Nevada	2.83	33.9	148	18.1
Conglomerate	Utah	2.54	14.1	88	3.0
Diabase	NewYork	2.94	95.8	321	55.1
Diorite	Arizona	2.71	46.9	119	8.2
Dolomite	Illinois	2.58	51.0	90	3.0
Gabbro	New York	3.03	55.3	186	13.8
Gneiss	Idaho	2.79	53.6	162	6.9
Gneiss	NewJersey	2.71	55.2	223	15.5
Granite	Georgio	2.64	39.0	193	2.8
Granite	Maryland	2.65	25.4	251	20.7
Granite	Colorado	2.64	70.6	226	11.9
Graywacke	Alaska	2.77	68.4	221	5.5
Gypsum	Canada	.	.	22	2.4
Limestone	Germany	2.62	63.8	64	4.0
Limestone	India	2.30	27.0	53	4.1

Rock Type	Location	Mg/m	Modulus,Gpa	Strength,MPa	MPa
Schist	Alaska	2.89	39.3	130	5.5
Shale	Utah	2.81	58.2	216	17.2
Shale	Pennsylvania	2.72	31.2	101	1.4
Siltstone	Pennsylvania	2.76	30.6	113	2.8
Slate	Michigan	2.93	75.9	180	25.5
Tuff	Neveda	2.39	3.7	11	1.2
Tuff	Japan	1.91	76.0	36	4.3

بشكل عام، يتم تحديد مقاومة القص في المختبر من اختبار عينات الصخر البكر في حالة الضغط. ولا تأخذ القيم المأخوذة بهذه الطريقة في الحسبان الشقوق والفجوات الأخرى والتي تؤثر ماديًا في سلوك مقاومة الكتلة الصخرية.



غلاف انهيار خطي محدد بالمعادلة $\tau = c + \sigma_n \tan \Phi$

إن الإجهاد عند نقطة في حالة انهيار وشيك تمثله الدائرة إلى النقاط التي تمثل الحد الأدنى من الإجهاد الأساسي σ3 و الحد الأعلى من الإجهاد الأساسي σ1 عند تلك النقطة.

C= تماسك الصخر

Φ= زاوية الاحتكاك الداخلي للصخر

الشكل 3 - 28: معيار انهيار مور – كولومب

ز. معيار انهيار هوك ـ براون

للتغلب على الصعوبات في تطبيق نظرية مور ـ كولومب على الصخور، أي، لا خطية مغلف الانهيار الفعلي وتأثير الفجوات في الكتلة الصخرية، وضع هوك وبراون (1980) Hoeck and Brown معيار انهيار تجريبي. ويقوم معيار انهيار هوك ـ براون على فكرة اجتماع الحسابات الميدانية، والمخبرية، والنظرية، بالإضافة إلى الخبرة. وقد وضع المعيار لوصف استجابة العينة البكر للمجال الكلي لحالات الإجهاد المتوقع مصادفتها. وتتراوح هذه الحالات من إجهاد الشد أحادي المحور إلى إجهاد الضغط ثلاثي المحور. كما أن هذا المعيار يوفر المقدرة على احتواء تأثير مجموعة متعددة من الفجوات. قد يكون هذا السلوك متباينًا إلى حد كبير.

يظهر معيار انهيار هوك ـ براون كما يلي:

$$\sigma_1 = \sigma_3 + \sigma_c \sqrt{m\frac{\sigma_3}{\sigma_c} + s}$$

حيث:

σ_1 = الإجهاد الرئيس الكبير عند الانهيار

σ_3 = الإجهاد الرئيس الصغير عند الانهيار

σ_c = مقاومة الضغط أحادي المحور لمادة الصخر البكر (المعطى بـ $\sigma_3 = 0$ و s=1)

وإن m و s هي ثوابت تعتمد على خواص الصخر وامتداده حتى ينكسر قبل خضوعه للإجهادات σ3 و σ١ s .

ومن حيث القص والإجهادات العمودية، فإنه يمكن تجسيد هذه العلاقة كالتالي:

$$\tau = (\sigma \times \sigma_3) \sqrt{} (1\times m\ \sigma_c / 4\tau_m)$$

حيث:

$$\tau_m = 0.5\ (\sigma_1 - \sigma_3)$$

وقد وضع هوك وبراون (1988) Hoeck and Brown تقديرات لقوى الكتل الصخرية بناءً على الخبرة المتراكمة من مشاريع كثيرة. وتظهر التقديرات التي تغطي مجالاً واسعًا لظروف الكتل الصخرية في الجدول رقم 3 - 8.

2. ظروف الإجهاد في المكان

الإجهادات في الأماكن البكر أو غير المضطربة هي الإجهادات الطبيعية التي توجد في الأرض قبل أي حفر. ويتم تحديد شدتها واتجاهاتها عن طريق وزن الطبقة المعتلية والتاريخ الجيولوجي للكتلة الصخرية. وتكون اتجاهات الإجهادات الرئيسة غالبًا رأسية وأفقية. ومن المحتمل أن تكون مماثلة في الاتجاه والشدة النسبية لتلك الإجهادات المسببة لأغلب التشوهات الحديثة.

ويمكن تقييم بعض أبسط الدلائل على اتجاه الإجهاد من معرفة الجيولوجيا الإنشائية للمنطقة وتاريخها الجيولوجي الحديث. ومن المهم معرفة الإجهادات للأماكن غير المضربة. في تحدد الشروط الحدية من أجل تحليل (swss) والإجهادات والتشوهات المؤثرة التي تنشأ عند صنع الفتحة. وتتطلب المعلومات الكمية التي يتم الحصول عليها من تحليلات الإجهاد أن تكون الظروف المحيطة معروفة. وتنشأ الشكوك في التحليلات بسبب المعرفة المحدودة بالإجهادات

في المكان.وبالرغم من أنه يمكن إجراء تقديرات أولية بناءً على أدلة بسيطة، إلا أن القياسات الميدانية للإجهادات في المكان هي فقط الدليل الصحيح بالنسبة للمنشآت الحساسة.

أ. الإجهاد الرأسي في المكان

بالنسبة للكتل الصخرية غير المضطربة جيولوجيًا، فإن الجاذبية الأرضية توفر العنصر الرأسي للإجهادات الصخرية. وفي الكتل الصخرية المتجانسة، عندما تكون كثافة الصخر ر ثابتة، فإن الإجهاد الرأسي يكون هو الضغط المبذول من قبل كتلة العمود أو الصخر المؤثر فوق المنسوب.

عندها يكون الإجهاد الرأسي بسبب الصخر المعتلي هو:

$$\sigma_z = \gamma\ h$$

حيث ر تمثل كثافة وحدة الوزن للصخر وتمتد عادة بين 20 و 30 كيلو نيوتن/م3.

الجدول 3 - 8: العلاقة التقريبية بين نوعية الكتلة الصخرية وثوابت المادة القابلة للتطبيق على الأعمال تحت سطح الأرض

	Carbonate Rocks with Well Developed Crystal Cleavage *dolomite, limestone, and marble*	**Lithified Agrillaceous Rocks** *mudstone, siltstone, shale, and slate (normal to cleavage)*	**Arenaceous Rocks with Strong Crystals and Poorly Developed Crystal Cleavage** *sandstone and quartzite*	**Fine-Grained Polymineralic Igneous Crystalline Rocks** *andesite, dolerite, diabase, and rhyolite*	**Coarse-Grained Polymineralic Igneous and Metamorphic Crystalline Rocks** *amphibolite, gabbro, gneiss, granite, norite, quartz-diorite*
Intact Rock Samples *Laboratory specimens free from discontinuities* RMR = 100, Q = 100	m = 7.00 s = 1.00	10.00 1.00	15.00 1.00	17.00 1.00	25.00 1.00
Very Good Quality Rock Mass *Tightly interlocking undisturbed rock with unweatherd joints at 1 to 3 m* RMR = 85, Q = 100	m = 4.10 s = 0.189	5.85 0.189	8.78 0.189	9.95 0.189	14.63 0.189
Good Quality Rock Mass *Several sets of moderately weathered joints spaced at 0.3 to 1 m* RMR = 65, Q = 10	m = 2.006 s = 0.0205	2.865 0.0205	4.298 0.0205	4.871 0.0205	7.163 0.0205
Fair Quality Rock Mass *Several sets of moderately weathered joints spaced at 0.3 to 1 m* RMR = 44, Q = 1	m = 0.947 s = 0.00198	1.353 0.00198	2.030 0.00198	2.301 0.00198	3.383 0.00198
Poor Quality Rock Mass *Numerous weathered joints at 30-500 mm, some gouge; clean compacted waste rock* RMR = 23, Q = 0.1	m = 0.447 s = 0.00019	0.639 0.00019	0.959 0.00019	1.087 0.00019	1.598 0.00019
Very Poor Quality Rock Mass *Numerous heavily weathered joints spaced < 50 mm with gouge; waste rock with fines* RMR = 3, Q = 0.01	m = 0.219 s = 0.00002	0.313 0.00002	0.469 0.00002	0.532 0.00002	0.782 0.00002

Empirical Failure Criterion:

$$\sigma_1' = \sigma_3' + \sqrt{m\sigma_c\sigma_3' + s\sigma_c^2}$$

σ_1' = major principal effective stress

σ_3' = minor principal effective stress

σ_c' = uniaxial compressive strength of intact rock, and *m* and *s* are impirical constants

CSIR rating: RMR

NGI rating: Q

3-8-6-2 طريقة حجز الالتقاء

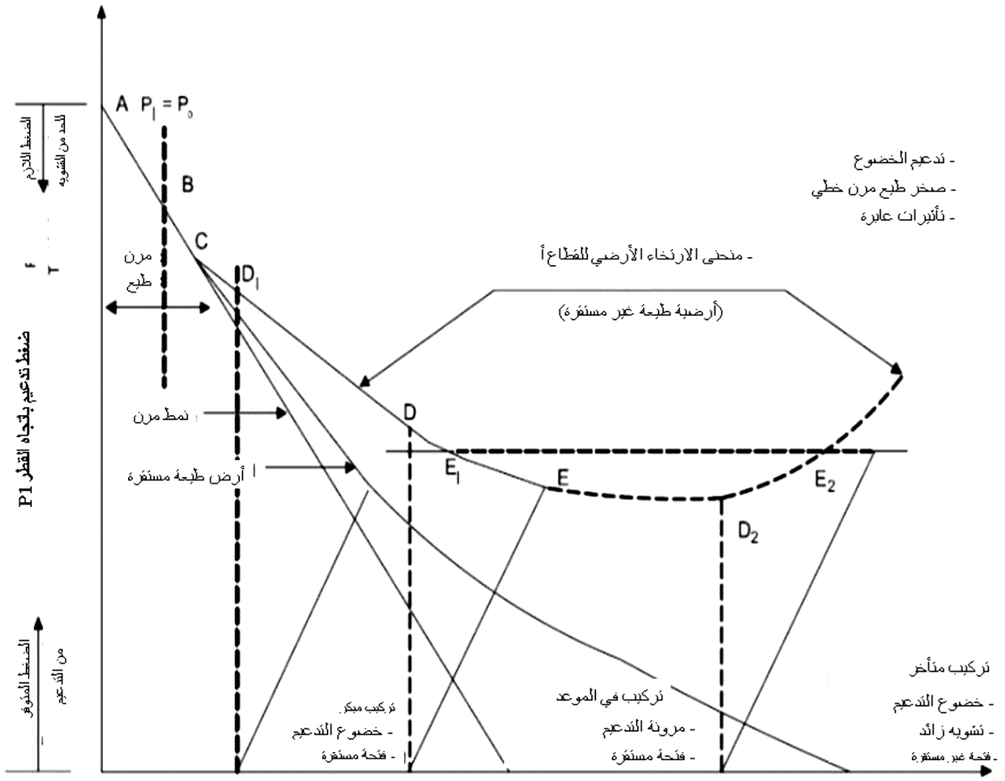
وتشمل مفاهيم ارتخاء الأرض وقساوة التدعيم لتحديد التفاعل بين الأرض والتدعيم الأرضي. ويوضح الشكل 3. 29 حتى الشكل 3. 31 مفهوم تفاعل التدعيم الصخري في نفق دائري محفور بواسطة الـTBM. ويبين المثال منحنى ارتخاء الأرض الذي يمثل صخرًا ضعيفًا بحاجة إلى تدعيم لمنع عدم الاستقرار أو الانهيار.

المراحل الموصوفة في الشكل 3 - 29 حتى الشكل 3 - 31 هي:

- التركيب المبكر للتدعيم الأرضي (النقطة D1) يقود إلى تصعيد زائد للحمولة في التدعيم.
- في منظومة التدعيم اللين، التدعيم سيلين من دون انهيار؛ ليصل إلى نقطة التوازن E1.
- التركيب المتأخر للتدعيم (النقطة D2) يقود إلى تشويه زائد في النفق وانهيار التدعيم (النقطة E2).

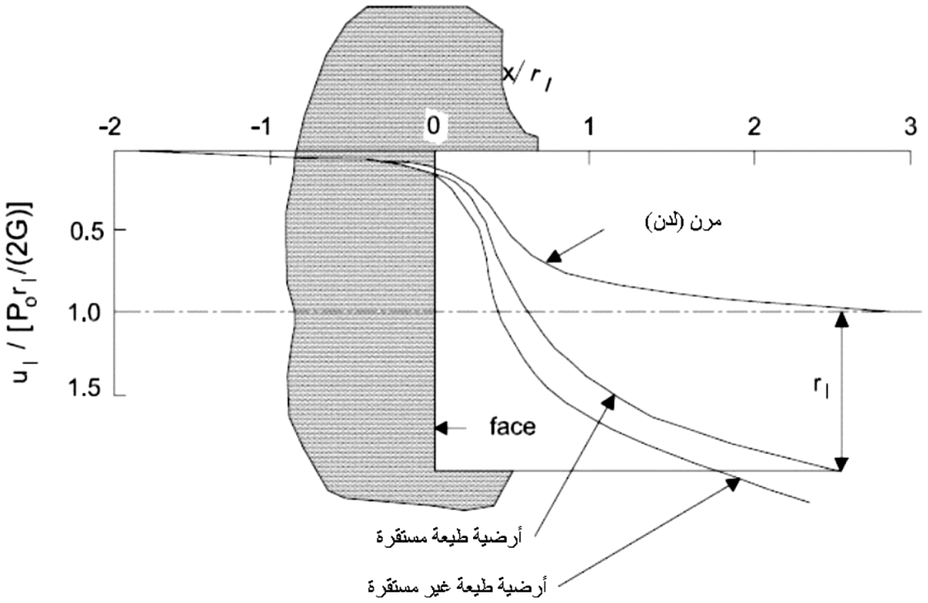
ويستطيع مصمم النفق أن يحسن تركيب التدعيم للسماح بانتقالات مقبولة في النفق وأحمال مقبولة في التدعيم.

وتعد طريقة حجز الالتقاء أيضًا أداة مفاهيمية فعالة تزود المصمم بإطار عمل من أجل فهم سلوك التدعيم في الأنفاق والممرات الرأسية. لاحظ أن حلول الشكل المغلق أو تحليل الاستمرارية هي طرق حجز التقاء، لأنها تصوغ تفاعل الصخر ـ المنشأ. ويمكن أيضًا تحديد منحنى ارتخاء وتفاعل الأرض عن طريق القياسات في المكان.



الشكل 3 - 29: تفاعل التدعيم الصخري

الشكل 3 - 30: إزاحة باتجاه القطر لفتحة النفق، u



الشكل 3 - 31: تفاعل التدعيم الصخري

3-6-8-3 تحليل الإجهاد

إن تنفيذ منشأة تحت أرضية ضمن كتلة صخرية يختلف عن أغلب أنشطة البناء الأخرى. وبشكل عام، تبنى المنشأة فوق الأرضية في بيئة غير مجهدة بأحمال تطبق عندما تنفذ المنشأة وتصبح جاهزة للعمل.

وبالنسبة لمنشأة تحت أرضية، فإن الحفر يُحدث فراغًا ضمن بيئة مجهدة. ويوفر تحليل الإجهاد رؤية أوضح حول التغيرات في توازن الإجهاد الموجود مسبقًا الناتج عن الفتحة. فهو يفسر سلوك الفتحة من حيث تركيز الإجهادات والتشوهات المرافقة لها، ويعمل كأساس منطقي في تعيين كفاءة متطلبات التصميم. وتعد خواص الكتل الصخرية معقدة، ولا يوجد نظرية واحدة متاحة تشرح تصرف الكتل الصخرية. لكن نظريات المرونة واللدونة تقدم نتائج وثيقة الصلة بتركيز الإجهادات التي يتم التوصل إليها حول الفتحات، كما أنها توفر خطوة أولى في تقدير توزيع الإجهادات حول الفتحات. قبل الحفر، تكون الإجهادات في المكان في الكتلة الصخرية في حالة اتزان. وفور القيام بالحفر، يعاد توزيع الإجهادات بجوار الفتحة وينشأ تركيز الإجهادات. وتستطيع الإجهادات المعاد توزيعها زيادة إجهاد أجزاء الكتلة الصخرية وجعلها تخضع (تلين). وإن حالات الإجهاد الأولي في الصخر، وبنيته الجيولوجية وقوة انهياره، وطريقة الحفر، والتدعيم المركب، وشكل الفتحة هي العوامل الرئيسة التي تحكم إعادة توزيع الإجهاد حول الفتحة.

1. ترتيبات الحفر وحالة الإجهاد في المكان

إن شكل الحفرية والإجهادات في المكان تؤثر في توزيع الإجهاد حول الفتحة، لأن تركيز الإجهادات غالبًا يكون حساسًا في السقف والجدران الجانبية للحفريات. وقد حدد Hoeck and Brown (1980) الإجهادات المماسية على سطح الحفرية عند قمة القوس، وفي الجدار الجانبي لفتحات مختلفة الأشكال بالنسبة لمجموعة من نسب الإجهاد في المكان. وتظهر هذه النسب في الشكل 3- 32. وهي ليست بالضرورة الإجهادات الأعلى الناشئة حول الفتحة. إذ تحدث الإجهادات الأعلى في الزوايا، حيث تستطيع أن تسبب عدم استقرار موضعي مثل التشظي.

2. ضغوط المياه الجوفية على التربة والصخر

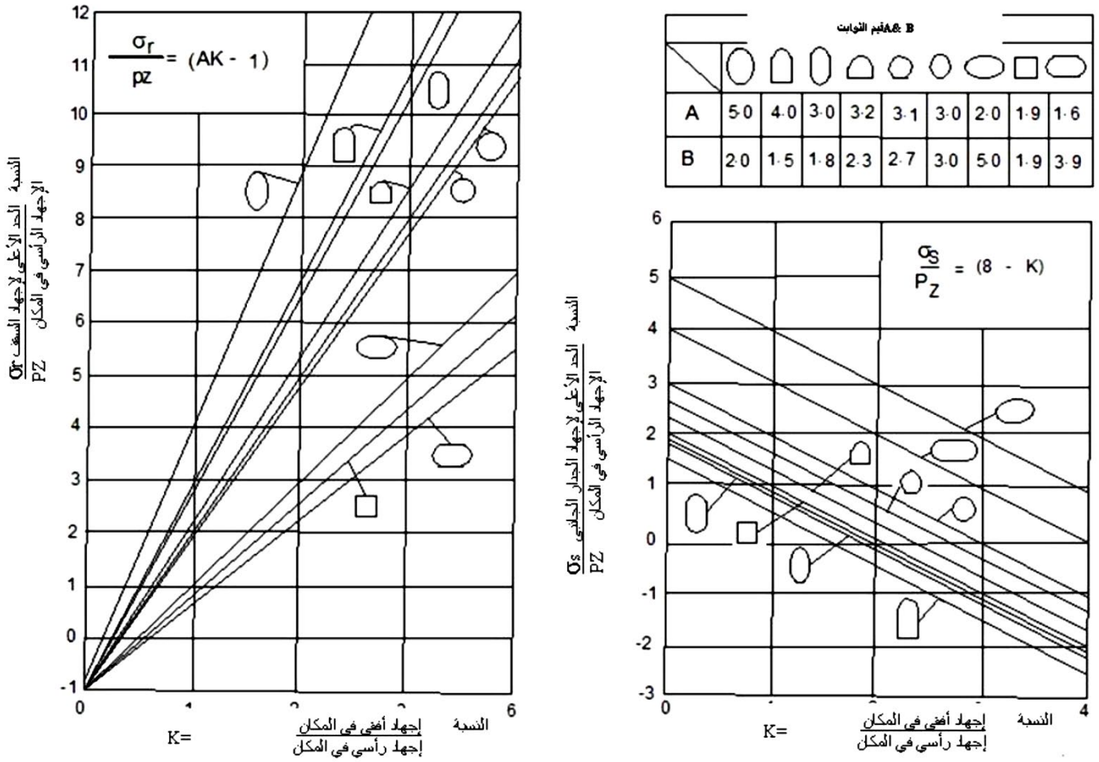
لقد كان يتم تقليديًا إجراء تحليل الإجهاد داخل الكتلة الصخرية لحفر الأنفاق من حيث الإجهادات الكلية مع توجيه اهتمام ضئيل لضغط المياه الجوفية على التربة والصخر. إلا أنه مع تحسن طرق التصميم بالنسبة للصخور الضعيفة النفاذية، فإنه يجري تطوير طرق تصميم من حيث تحليل الإجهاد الفعال

(Fernandez and Alvarez 1994: Hashash and Cook 1994)، انظر الفقرة 3-8-6-4 .

3. الفتحة الدائرية في مادة مرنة

يؤمن الحل المرن لنفق دائري عميق رؤية أفضل في الإجهادات والانتقالات المتشكلة بواسطة الحفرية. ويتم اعتبار النفق «عميقًا" إذا لم يؤثر السطح الحر في الإجهادات والانتقالات حول الفتحة. ويتم اعتبار المسألة مسألة توترات مستوية، ويتم افتراض أن الصخر منتظم (متسق الاتجاهات)، ومتجانس، ومرن خطيًا. ويتجاهل حل كيرش Terzaghi and Richart (1952) Kirschفوق الكتل وتأثير الحدود عند سطح الأرض. أما حل Mindlin الشامل (1939)، الذي يأخذ الحدود في الحسبان، ويأخذ الجاذبية في الحسبان، يبين بأن التقريب يعطي قبولًا جيدًا جدًّا بالنسبة للإجهادات ذات الأعماق الأكبر من أربعة أمثال قطر النفق. وإن القيم المطلقة للإجهاد والتشوه هي نفسها بغض النظر عن تسلسل تطبيق الحمولة والحفر؛ إلا أن الانتقادات النسبية التي نصادفها عندما يتم شق النفق، يمكن فقط أن تحدد نظريًا. وقد قدم Pender (1980) حلولًا شاملة لمسألة التشوه المستوى المرن خطيًا وهي ملخصة في

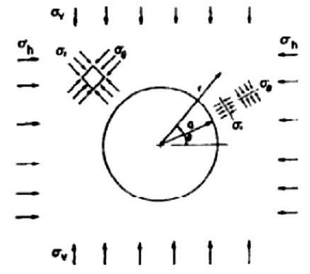
الشكل 3-33.



قيم الثوابت A & B									
A	5·0	4·0	3·0	3·2	3·1	3·0	2·0	1·9	1·6
B	2·0	1·5	1·8	2·3	2·7	3·0	5·0	1·9	3·9

الشكل 3 - 32: الإجهادات المتنبأ بها بالتحليل المرن (أخذ عن Hoeck & Brown, 1980)

الرموز المستخدمة لوصف الإجهادات حول فتحة دائرية في مجال إجهاد ثنائي المحور



a	نصف قطر عمود النفق
r	مسافة نصف القطر إلى أية نقطة
Θ	مسافة زاورية إلى أية نقطة
σ_h, σ_V	مجال الإجهاد الأصلي (قبل حفر النفق) عند مستوى النفق
σ_θ, σ_r	الإجهادات النصف قطرية النهائية (بعد الحفر) حول النفق
E	معامل يونغ للصخر
υ	نسبة بويزن
u_a	الإزاحة النصف قطرية عن نصف القطر a
v_a	

الإجهادات هي:

الإجهادات النصف قطرى

الإجهاد المحيطى

إجهاد القص

$$\sigma_r = 0.5(\sigma_V + \sigma_h)(1 - a^2/r^2) + 0.5(\sigma_V - \sigma_h)(1 + 3a^4/r^4 - 4a^2/r^2)\cos 2\Theta$$

$$\sigma_\theta = 0.5(\sigma_V + \sigma_h)(1 + a^2/r^2) - 0.5(\sigma_V - \sigma_h)(1 + 3a^4/r^4)\cos 2\Theta$$

$$\tau_{r\theta} = 0.5(\sigma_h - \sigma_V)(1 - 3a^4/r^4 + 2a^2/r^2)\sin 2\Theta$$

الحالة ١ الإجهادات المستخدمة عند منطقة بعيدة، مناسبة للحالة التي تكون فيها عمولة سطحية كبيرة مستخدمة بعد إنشاء النفق

الإزاحات هي:

$$Eu = (1-\upsilon^2)[0.5(\sigma_V + \sigma_h)(r + a^2/r) - 0.5(\sigma_V - \sigma_h)(r - a^4/r^3 + 4a^2/r)\cos 2\Theta] - \upsilon(1+\upsilon)[0.5(\sigma_V + \sigma_h)(r - a^2/r) - 0.5(\sigma_V - \sigma_h)(r - a^4/r^3)\cos 2\Theta]$$

$$Ev = 0.5(\sigma_V - \sigma_h)[(1 - \upsilon^2)(r + 2a^2/r + a^4/r^3) + \upsilon(1+\upsilon)(r - 2a^2/r + a^4/r^3)]\sin 2\Theta$$

عند أطراف النفق، فإن الإزاحات هي:

$$Eu_a = (1-\upsilon^2)a[(\sigma_V + \sigma_h) - 2(\sigma_V - \sigma_h)\cos 2\Theta]$$

$$Ev_a = 2(1-\upsilon^2)a(\sigma_V - \sigma_h)\sin 2\Theta$$

الحالة ٢ نفق محفور في وسط سابق الإجهاد، مناسب لتحليل حفر النفق

الإزاحات هي

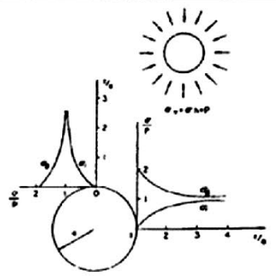
$$Eu = 0.5(1+\upsilon)[(\sigma_V + \sigma_h)(a^2/r) - (\sigma_V - \sigma_h)((1-\upsilon)4a^2/r - a^4/r^3))\cos 2\Theta]$$

$$Ev = 2(1+\upsilon)(\sigma_V - \sigma_h)2a^2/r + a^4/r^3))\sin 2\Theta$$

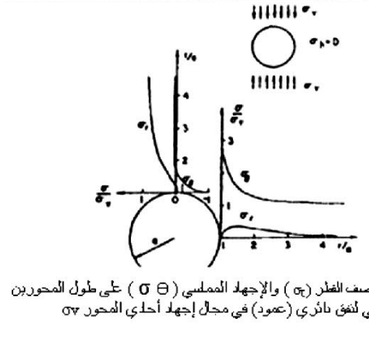
في المنطقة المحيطة بالنفق، تكون الإزاحات على النحو التالي:

$$Eu_a = 0.5(1+\upsilon)a[(\sigma_V + \sigma_h) - (3-4\upsilon)(\sigma_V - \sigma_h)\cos 2\Theta]$$

$$Ev_a = 6(1+\upsilon)(\sigma_V - \sigma_h)\sin 2\Theta$$



الإجهاد باتجاه نصف القطر (σ_r) والإجهاد المماسي (σ_Θ) حول نفق دائري (عمود) في إجهاد هيدروستاتيكي (P)



الإجهاد باتجاه نصف القطر (σ_r) والإجهاد المماسي (σ_Θ) على طول المحورين الرأسي والأفقي لنفق دائري (عمود) في مجال إجهاد أحادي المحور σ_V

الشكل 3 - 33: الإجهادات حول فتحة دائرية في مجال إجهاد ثنائي المحور

إن بساطة الحل المرن بالنسبة للإجهادات والانتقالات حول فتحة دائرية توفر رؤية أفضل حول أهمية المعايير المتنوعة، ويمكن استخدامه لفهم مقدار الإجهادات والتشوهات المتشكلة حول الفتحة.

4. النموذج الطيع/اللين (الخاضع)

إن إجراء حفرية تحت الأرض يؤدي إلى اضطراب مجال الإجهاد. وفي حالة الصخور الضعيفة أو حتى المتماسكة المعرضة لإجهادات عالية، فإن الإجهادات المتشكلة يمكن أن تتجاوز مقاومة الصخر مؤدية إلى انهياره. ويأخذ الانهيار شكل إغلاق تدريجي للحفرية، أو تشظي موضعي، أو تساقط السقف، أو انقسام الجدان الجانبية إلى بلاطات، أو، في الحالات الزائدة، تفجر الصخر. وفي الحالات التي لا يكون فيها التحرر العنيف للطاقة عاملاً يؤخذ في الحسبان، فإن هذا يؤدي إلى نشوء منطقة مكسرة حولة الحفرية التي ستحتاج إلى تثبيت. وفي الصخور القوية حيث يحدث انكسار سريع أو تخفيف في حدة التوتر، فإنه يمكن تدعيم الطبقة نسبيًا بسهولة عن طريق تحريك القوة المتبقية للطبقة المشوهة بواسطة ضغوط تدعيم منخفضة. وفي الصخور الأضعف المعرضة لإجهادات عالية حيث يحدث تصرف لدن أو تصلب، ربما على امتداد فترة من الزمن، فإنه يكون من المطلوب تقييد أعلى بكثير لتدعيم الطبقة كجزء من نشوء منطقة خاضعة (لينة)، أو قد تحدث لدونة أساسية، أو تشوهات مع مرور الزمن. ولتقدير هذه التأثيرات، فإنه يتم حساب الإجهادات والتشوهات من التحليلات للطواعية والمرونة. والحالة الأبسط هي تلك الخاصة بنفق دائري محفور (مدفوع) في صخر متجانس، منتظم، مرن بشكل أولي خاضع لمجال إجهاد هيدروستاتيكي. ويكون التحليل متماثل المحاور. ويفترض الحل حالات توتر مستوية في الاتجاه المحوري وأن الإجهاد المحوري يبقى إجهادًا متوسطًا رئيسًا. وبما أن الإجهادات ناشئة بواسطة تجاوز الفتحة لقوة خضوع الصخر، فإن منطقة الخضوع بنصف قطر R، تنشأ حول النفق، بينما يبقى الصخر خارج منطقة الخضوع مرنًا. ويظهر التحليل موضحًا في الشكل 3ـ 34، والشكل 3 - 40، والفقرة 3-8-6-4-1. ويميل الصخر للتمدد أو التوسع حتى ينكسر، وتكون انتقالات جدار النفق أكبر من تلك التي تتنبأ بها نظرية المرونة. وتعود متطلبات التدعيم نظريًا إلى انتقال الحفرية. ويتم الحد من التشوهات بواسطة استخدام ضغط تدعيم عالٍ، في حين أنه يتم تخفيض ضغوط التدعيم حتى تحدث التشوهات. ويجب أن تعالج هذه التدابير النظرية بالحكمة الهندسية، لأن التشوه الزائد يمكن أن يؤثر بشكل عكسي في الاستقرار وتؤدي إلى متطلبات تدعيم زائدة لم يكن متنبأ بها بواسطة التحليل. وقد تم تلخيص الحلول المرنة اللدنة لتوزيع الإجهادات والتشوهات حول الفتحات الدائرية ـ الأسطوانية تحت سطح الأرض في الشكل 3ـ 34 إلى الشكل 3ـ 40. وقد تم افتراض أن الفتحة تكون بعيدة جدًا عن سطح الأرض حيث يمكن افتراض أن مجال الإجهاد متجانس وأن حقل الإجهاد الحصوي الساكن موجود. ولا تؤخذ قوى الجسد في الحسبان. ويتم افتراض أن المادة إما لدنة عديمة الاحتكاك (f=0) أو احتكاكية (ـ f)

Elasto Plastic Solution

Reference: Salencon 1969.

$p_z = \sigma_v = \sigma_n$ $\quad$ p_i = Internal Pressure

yield condition: $p_z \geq (p_i + c \cos \phi) / 1-\sin \phi$

radius of yield zone:

$R = a.[(1- \sin \phi)(p_z + c. \cot \phi) /(p_i + c \cot \phi)]^{1/(Kp-1)}$

where $K_p = (1 + \sin \phi) / (1 - \sin \phi)$

ELASTIC ZONE:

stresses: $\sigma_r = p_z - (p_z - \sigma_{cp}) (R_o/r)^2$

$\sigma_\theta = p_z + (p_z - \sigma_{cp})(R_o/r)^2$

$\sigma_{cp} = p_z (1 - \sin \phi) - c.\cos \phi$ = Radial stress at the Elasto-Plastic interface

deformations: $u_r = (p_z .\sin \phi + c.\cos \phi).(R^2/r) /(2G)$

PLASTIC ZONE:

stresses: $\sigma_r = -c.\cot \phi + (p_i + c.\cot \phi).(r/a)^{Kp-1}$

$\sigma_\theta = -c.\cot \theta + (p_i + c.\cot \phi).K_p.(r/a)^{Kp-1}$

$\sigma_y = (\sigma_r+\sigma_\theta)/2 = c.\cot\phi+(p_i+c.\cot \phi).(1-\sin\phi)^{-1}.(r/a)^{Kp-1}$

deformations: $u_r = r/(2G).\ \chi$

where $\chi = (2v-1).(p_z+c.\cot \phi) + (1-v).[(K_p^2-1) (K_p+ K_{ps})] .\ (p_i + c.\cot \phi).\ (R/a)^{(Kp-1)}.(R/r)^{(Kps+1)}$

$+ [\ (1-v\ ).(K_p.K_{ps}+1)/(K_p+ K_{ps})-v].(p_i + c.\cot \phi).(r/a)^{(Kp-1)}$

and $K_{ps} = (1 + \sin \psi_s) /(1 - \sin \psi s)$ and $G = E/2(1+v)$

الشكل 3 - 34: الحل الطبيع اللدن

Elasto Plastic Particular Solutions

Particular Solutions to Elastoplastic Problem - c-ϕ Material - Dilation Angle stresses in the elastic and plastic zones are the same as given in Box 8-2.

CASE 1: $\Psi = \phi$, Associated flow rule, $K_p = K_{ps}$
deformations: $u_r = r/(2G).\ \chi$
where $\chi = (2v-1).(p_z+c.\cot \phi) + (1-v).(K_p^2-1)/(2.k_p) .\ (p_i + c.\cot \phi).\ (R/a)^{(Kp-1)}.(R/r)^{(Kp+1)}$
$+ [(1-v).(K_p^2+1)/(2k_p) -v] .\ (p_i + c.\cot \phi).(r/a)^{(Kp-1)}$

CASE 2: $\Psi = 0$, No dilation, $K_p = 1$

deformations: $u_r = r/(2G).\ \chi$

where $\chi = (2v-1).(p_z+c.\cot \phi) + (1-v).(K_p -1).(p_i + c.\cot \phi).\ (R/a)^{(Kp-1)}.(R/r)^2 + (1-2.v) .(p_i + c.\cot \phi).\ (r/a)^{(Kp-1)}$

Particular Solutions to Elastoplastic Problem - c-ϕ Material

CASE 3: $\phi = \phi$, and c = 0 , Frictional Material

PLASTIC ZONE:

stresses: $\sigma_r = p_i.(r/a)^{Kp-1}$

$\sigma_\theta = p_i.K_p.(r/a)^{Kp-1}$

$\sigma_y = (\sigma_r + \sigma_\theta)/2 = p_i.[(1+Kp)/2].(r/a)^{Kp-1}$

deformations: $u_r = r/(2G).\ \chi$

for $\psi = \phi$
$\chi = (2v-1).p_z+(1-v).(K_p^2-1)/2.K_p.p_i.(R/a)^{(Kp-1)}.(R/r)^{(Kp+1)} + [(1-v).(K_p^2+1)/(2.K_p)-v].p_i.\ (r/a)^{(Kp-1)}$

for $\psi = 0$
$\chi = (2v-1).p_z + (1-v).(K_p -1).p_i.\ (R/a)^{(Kp-1)}.(R/r)^2 + (1-2.v).pi.(r/a)^{(Kp-1)}$

CASE 4: $\phi = 0$, c = c

yield condition: $p_z \geq p_i + c$

radius of yield zone: $R = a\ .\ \exp\ [\ (p_z-p_i)/(2.c) - 1/2\ ]$

PLASTIC ZONE:

stresses: $\sigma_r = p_i + 2.c.\ \ln(r/a)$

$\sigma_\theta = p_i + 2.c.(1 + \ln(r/a))$

$\sigma_y = (\sigma_r + \sigma_\theta)/2 = p_i + c.(1 + 2.\ln(r/a))$

ELASTIC ZONE:
stresses: $\sigma_r = p_z - c.(a/r)^2\ .\ \exp\ [(p_z - p_i)/c\ -1]$

$\sigma_\theta = p_z - c.(a/r)^2\ .\ \exp\ [(p_z - p_i)/c\ -1]$

$\sigma_y = 2.v.p_z$

deformations:

$u_a = c\ (1+v).[1 - c\ (1+v)/2.E\ ].\ \exp\ [(p_z-p_i)/c\ -1] \sim [c(1+v)/E]\ .\ \exp\ [(p_z-p_i)/c\ -1]$

الشكل 3 - 35: الحلول المرنة اللدنة الخاصة

3-8-6-4 تحليل الاستمرارية باستخدام طرق الفروقات المحدودة، أو العناصر المحدودة، أو العناصر الحدية

إن التقدم في تقنيات تحليل الاستمرارية وظهور الحواسيب السريعة منخفضة التكاليف أدى إلى تكاثر برامج تحليل الاستمرارية الموجهة لحل المجال الواسع لمسائل الجيو ـ ميكانيك التي تتضمن حفر وإنشاء الأنفاق والممرات الرأسية. وبالنسبة للغاية من هذا الدليل، فإن تحليل الاستمرارية يشير إلى تلك الطرق أو التقنيات التي تفترض أن الوسط الصخري مستمر ويحتاج لحل مجموعة كبيرة من المعادلات الآنية لحساب حالات الإجهاد والتشوه في كل مكان من الوسط الصخري. وتتضمن التقنيات المتاحة طريقة الفروقات المحدودة (Cundall 1976) (FDM)، وطريقة العناصر المحدودة (1982) (Bathe) (FEM)، وطريقة العناصر الحدية (Venturini 1983) (BEM). وعندما يكون هناك مزايا بسيطة لطريقة على أخرى بالنسبة لبعض التطبيقات المتخصصة، فإن الطرق الثلاثة تكون مفيدة بالدرجة لحل المسائل نفسها التي نصادفها في الواقع. وتستخدم كل واحدة من هذه الطرق الرقمية الثلاث لحل مسألة حفرية في الوسط الصخري الذي يتم فيه توصيف وتمثيل الحقل قيد الدراسة بتشكيلة من العناصر. ويتم حساب التغيرات في الحالة الإجهادية والتشوهات عند منسوب العنصر في ظل وجود (غير المحمل (المنفذ) تاريخه وخواص مادته. وتقدم هذه التقنيات العددية للمصمم أدوات قوية يمكن أن توفر رؤية استثنائية حول مسألة تفاعل تدعيم نفق أو ممر رأسي خلال التنفيذ وبعده. وتلخص الفقرة 3ـ 8ـ 6ـ 4ـ 1 الخطوات المتبعة في إنجاز تحليل الاستمرارية. وتشرح الفقرات التالية هذه الخطوات وكيف يتم اعتبار تحليل الاستمرارية جزءًا من عملية التصميم. ويتم شرح المزايا إضافة إلى قيود التقنيات الرقمية.

1. خطوات تتبع تحليل الاستمرارية لحفريات النفق والممرات الرأسية

أ. تحديد الحاجة والهدف من تحليل الاستمرارية

الخطوة الأولى في القيام بتحليل الاستمرارية هي تحديد فيما إذا كان التحليل مطلوبًا. ولا تكون التقنيات الرقمية لـ FEM، أو FDM، أو BEM بدائل عن الطرق التقليدية لتصميم التدعيم. ومن ثم فإن تحليل الاستمرارية يستخدم لدراسة تأثير تتابع التنفيذ والتشوه الأرضي على نقل الأحمال للتدعيمات. ويجب عدم استخدام عوامل الأمان وعوامل التحميل المستخدمة بشكل شائع في الطرق التقليدية في التحليلات العددية. ويمكن لتحليل الاستمرارية أن يشتمل على تفاصيل لا يمكن حسابها باستخدام الطرق التقليدية مثل طبقة الصخر غير المتجانس والإجهاد الابتدائي غير المنتظم في المكان، ومن هنا فهو يؤمن إرشادًا من أجل التعديلات المطلوبة في منظومة التدعيم. ويمكن لطرق الاستمرارية أن تقدم أفضل خدمة لتحسين تصميم التدعيم عن طريق الفرصة التي توفرها لدراسة أنواع الحالات التي يمكن أن تنشأ منها الإجراءات العملية العامة (مثال، Hocking 1978). وتتضمن أنماط السلوك التي يمكن افتراضها باستخدام تحليل الاستمرارية ما يلي:

- تفاعل الأرض أو التدعيم الطيع والمرن الطيع. ويمكن إنشاء منحنيات حصر الالتقاء باستخدام تحليل الاستمرارية.
- دراسة أنماط الانهيار.
- تحديد تركيزات الإجهاد.
- تقدير المناطق الطيعة التي تحتاج إلى تدعيم.
- تحليل بيانات المراقبة.

ب. تحديد متطلبات الشيفرة (الكود) الحاسوبية

هناك مجال واسع من البرامج التجارية والمنزلية المتاحة لنمذجة تنفيذ نفق وممرات رأسية. وقبل إنجاز التحليل باستخدام شيفرة حاسوبية خاصة، فإنه يجب على المستخدم أن يحدد ملاءمة البرنامج. وهنالك أمثلة على تحليل للمسائل التي يكون فيها حل الشكل المغلق متاحًا (كتلك الواردة في الفقرة 3ـ 8ـ 6ـ 3) حيث يجب إجراؤها كما يجب التحقق من نتائج التحليل بمقارنتها بتلك الحلول. ويجب أن يتأكد المستخدم من أن البرنامج قادر على صياغة (نمذجة) عملية الحفر بشكل صحيح، وقادر على تمثيل عناصر التدعيم المختلفة كالبطانة الخرسانية والخرسانة المقذوفة، والعوارض الشبكية، والبراغي.

ج. نمذجة الوسط الصخري

تعمل تقنيات الـFEM، وFDM، وBEM على صياغة (نمذجة) الكتلة الصخرية على أنها مستمرة. هذا التقريب مناسب عندما تكون الكتلة الصخرية نسبيًا خالية من الفجوات (الانقطاعات). ولكن هذه الطرق يمكن أن تبقى مستخدمة لنمذجة الكتل الصخرية المتشققة باستخدام خواص مواد مكافئة تعكس تخفيض القوة بسبب الشقوق (مثال، Zhu and Wang 1993:Pariseau 1993) أو نموذج مادة يشتمل على مستويات الضعف مثل نموذج الشقوق الموجودة في كل مكان (Ubiquitous Joint Model:ITASCA 1992). ويمكن أن تستخدم عناصر السطح البيني لنمذجة الانتقالات على طول الفجوات إذا اعتقد بأنها عامل مهم في سلوك المنظومة. ويجب أن يستخدم المصمم أولًا نموذجًا بسيطًا قدر الإمكان ويتجنب إضافة التفاصيل التي يمكن أن تكون ذات تأثير بسيط على سلوك المنظومة ككل.

وتكون الحالة الابتدائية للإجهاد في الكتلة الصخرية مهمة في تحديد التشوه بسبب الحفرية والحمولة اللاحقة المحمولة بواسطة منظومة التدعيم. وفي الكتلة الصخرية غير منتظمة المقطع (في الطوبوغرافيا الأفقية) حيث تكون خواص المادة ثابتة في المستوى الأفقي، فإنه يمكن توصيف حالة الإجهاد بعنصر رأسي للإجهاد v بسبب وزن الصخر وعنصر أفقي للإجهاد h. Ko=σv×Ko وهو نسبة الإجهاد الجانبية في المكان. وفي الحالات حيث تكون الكتلة الصخرية غير منتظمة، أو بدون طبقة أفقية، أو عندما يكون سطح الأرض منحدرًا (مثل أرض مائلة)، فإن طرقًا كتلك التي اقترحها Amdei and Pan (1992)، و Pan and Amadei (1993) يجب أن تستخدم لتعيين الحالة الابتدائية للإجهاد في الصخر. وتعتبر هذه الطرق ضرورية لأن الإجهادات الابتدائية في الكتلة الصخرية تتضمن عناصر إجهاد قص لا صفرية.

يعتمد اختيار نموذج مادة لتمثيل الوسط الصخري على الخواص المتاحة التي تم الحصول عليها من المختبر وبرامج الاختبار في المكان والدقة المطلوبة في التحليل. ويتوفر للعديد من برامج تحليل الاستمرارية المتاحة مراجع كثيرة من الممكن استخدامها. وتتضمن هذه المراجع نماذج مرنة خطيًا ومرنة ـ طيعة لا خطية، وقد تكون ذات تدابير تحتوي على الزحف والسلوك الحراري. وتتضمن قواعد المادة أو القوام المتاحة لنمذجة الوسط الصخري ما يلي:

- المرونة الخطيّة.
- المرونة اللاخطيّة (نموذج زائدي القطع).
- المرونة اللزجة.
- المرونة ـ اللدونة (معايير انهيار مور ـ كولومب مع قاعدة تدفق مرافق أو غير مرافق يتحكم بالتوسع الحجمي للمادة، ومعايير انهيار هوك وبراون).
- المرونة ـ اللدونة اللزجة.
- مرونة السطح الحدي (Whittle 187).

ويمكن إجراء تحليل الاستمرارية بافتراض إما سلوك الإجهاد الفعال أو سلوك الإجهاد الكلي للمادة. وقد يكون استخدام سلوك الإجهاد الفعال أكثر ملاءمة للاستخدام في الكتل الصخرية المشبعة أو تلك الكتل ذات المنشأ الرسوبي مثل الصخور المتشكلة من الصلصال أو الحجارة الرملية. هناك دليل كافٍ في الأدبيات يدعى استخدام قاعدة الإجهاد الفعال لبعض الصخور (مثال، Bellwald 1992, Berge و Bonner 1993, Wang Warpinski and Teufel 1993,) ويمكن إيجاد أمثلة عن تحليل الإجهاد الفعال للأنفاق في .Cheng,Abousleiman, and Roegiers(1993)

إن حجم الحقل الصخري (حجم الشبكة) والشروط الحدية المطبقة على طول الأطراف البعيدة حقليًا للنموذج تعتمد عل حجم الفتحة والظروف الهيدرولوجية. وكقاعدة أساسية، يوضع الحد البعيد حقليًا على مسافة 5 - 10 مرات من قياس الفتحة بعيدًا عن المحور. وتتأثر الشروط الحدية للضغط المسامي على طول أطراف النموذج وعلى طول سطح الأرض بحالة السحب المتنبأ بها. وتعاظم الضغط المسامي، وجريان الماء في الفتحة.

د. التحليل الثنائي والثلاثي الأبعاد

يمكن استخدام التقنيات الرقمية المتاحة لحل مسألة حفرية ممر رأسي أو نفق في بيئة ثنائية أو ثلاثية الأبعاد. فالتحليل الثنائي الأبعاد (2 - D) مناسب لنمذجة مقاطع الأنفاق على طول الجريان المروري للنفق. والتحليل الثلاثي الأبعاد (3 - D) يمكن أن يكون مفيدًا لفهم السلوك عند تقاطعات النفق والممرات الرأسية.

إلا أن التحليل ثلاثي الأبعاد 3 - D مرهق ويتضمن معالجة كميات كبيرة من البيانات. ومن المفضل أن يستخدم المحلل نموذج مبسط ثنائي الأبعاد 2 - D ويتوصل إلى فهم جيد لاستجابة المنظومة قبل البدء بالتحليل الثلاثي الأبعاد 3 - D المرهق جدًا. وهناك أمثلة على التحليل الثنائي 2 - D والثلاثي 3 - D الأبعاد في الشكل 3 - 36 و الشكل 3 - 37.

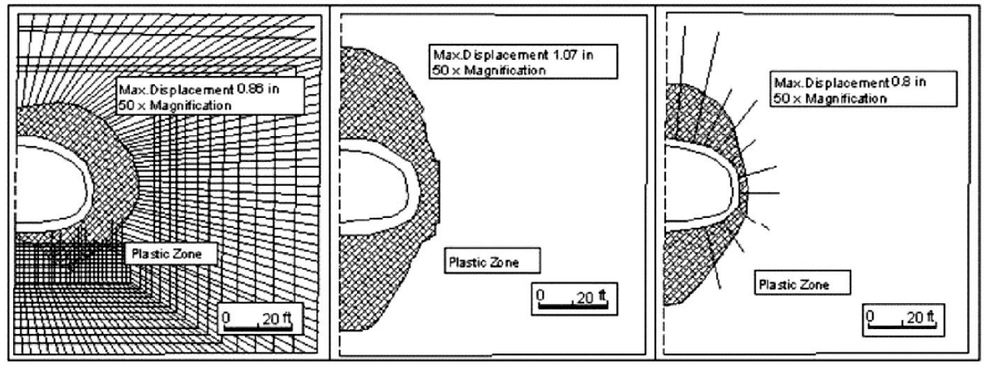
تحليل ثنائي البعد لمقطع بيضوي للنفق

الهدف: دراسة تأثير نسبة الإجهاد الأولي الجانبي في المكان، K، على الإجهادات وتطور المناطق الطيعة حول مقع نفق بيضوي

الوسط الصخري: صخر ثابور مارل الطفلي المشبع، التماسك الفعال c' = ٣٤٤ كيلوباسكال وزاوية احتكاك Phi' =٣٠° سلوك الإجهاد الفعال، مادة طيعة، ممتازة المرونة مع معايير انهيار كور-كولومب

نوع الدعم: مدعم وغير مدعم مع خوابير محقونة بالكامل و بطانة خرسانة مقذوفة سماكة ٣٠سم

نوع التحليل: تحليل فروق محدود (FLAC Program, 2-D)



مناطق نشوه وخضوع، $K_0 = 1$ | مناطق نشوه وخضوع، $K_0 = 1.5$ | مناطق نشوه وخضوع، $K_0 = 1.5$

نتائج التحليل: تؤدي الزيادة في K أيضاً إلى زيادة في مدى مناطق الخضوع في التاج والتركيب السفلي للخوابير (خوابير أطول في التاج والتركيب السفلي مقارنة بالشبكة) وتظل البطانة مجال الخضوع

المرجع: Hashhash, Y.M.A. and Cook, R.f. (1994) "Effective Stress Analysis of Supercollider Tunnels," 8th Int. Conf. Assoc. Comp Methods and Advances in Rock Mechanics, Morgantown, West Virginia

الشكل 3 - 36: تحليل ثنائي الأبعاد لمقطع نفق بيضوي الشكل

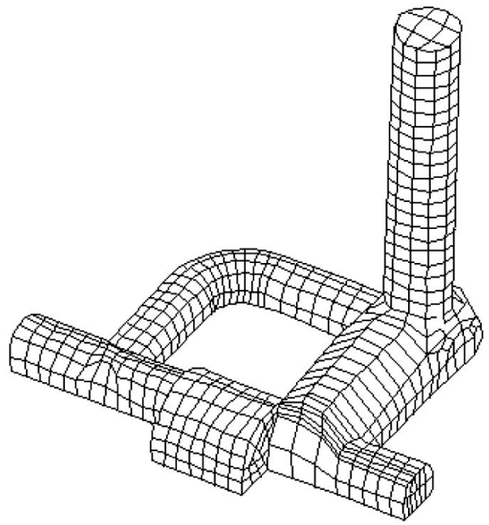
Three- Dimensional Analysis of a Shaft and Tunnel Intersection

Objective: Study the stress distribution at shaft intersection with tunnel and ancillary gallries

Rock Medium: Eagle Ford Shale overlain by Austin Chalk. Total Stress behavior, linear elastic material

Support Type: No Support

Analysis Type: Finite Element Analysis (ABAQUS Program 3-D)



Analysis Results: Stress concentrations occur at tunnel/shaft intersections at zones experiencing a sudden change in geom. otry. The extent of the stress concentration is used estimate the required dowel length in these areas.

Refrence: Clark G.T., and Schamidt.B. (1994) "Analysis and Design of SSC Underground Structures" Proceedings Bostan Society of Civil Engineers.

الشكل 3 - 37: تحليل ثلاثي الأبعاد لتقاطع ممر رأسي ونفق

هـ. نمذجة التدعيمات وتعاقب التنفيذ

إن تعاقب تنفيذ نفق أو ممر رأسي معقد ويتضمن تفاصيل كثيرة. ويعد من غير العملي احتواء كل هذه التفاصيل في الحل الرقمي.

ويجب تبسيط إزالة المواد وتركيب البطانة والأسافين إلى خطوات منفصلة.وفيما يلي بعض الأمثلة للتبسيطات الممكنة:

- تدعيم النفق: يمكن أن يكون تدعيم النفق خرسانة مصبوبة في المكان، أو عناصر خرسانية مسبقة الصنع، أو خرسانة مقذوفة، أو مجموعات فولاذية. ويمكن نمذجة التدعيم باستخدام نفس الأنواع من العناصر المستخدمة لنمذجة الصخر، ولكن باستخدام نماذج وخواص مواد تطابق مواد التدعيم. وبما أن ثخانة التدعيم تكون عادة أقل بكثير من قياس الفتحة، فإنه يمكن استخدام العناصر الإنشائية (عوارض) لنمذجة البطانة. وفي كثير من الحالات، يتم تشكيل هذه العناصر حسب أفضلية سحبها لسلوك الانحناء للتدعيم.

- **استخدام الخرسانة المقذوفة:** هناك عادة زمن تأخير بين استخدام الخرسانة المقذوفة ونشوء المقاومة الكلية للخرسانة المقذوفة. ويتم القيام بطريقة مبسطة بإدخال هذا التأثير في نموذج الاستمرارية لمحاكاة «تركيب» الخرسانة المقذوفة عند المرحلة التي تصل فيها الخرسانة المقذوفة إلى مقاومتها الكاملة.
- **محاكاة الحمولة المنقولة إلى بطانة النفق في تحليل ثنائي الأبعاد 2 - D:** خلال عملية شق النفق، يتم تركيب التدعيم بالقرب من وجه النفق. وفي الوقت الذي يتقدم فيه الوجه، فإن الصخر يرتخي أكثر وتخدم الحمولة على التدعيمات. وتعد هذه المسألة ثلاثية الأبعاد بطبيعتها. وفي النموذج الثنائي الأبعاد 2ـ D، يتم السماح للصخر بأن يتشوه بنسبة من تشوهه الحر الآخر قبل «تركيب» التدعيم. وتتراوح هذه النسبة بين 50 إلى 90% Einstein (1980) Schwartz,Azzouz, and بناء على مدى تركيب التدعيمات خلف وجه النفق. وتناقش الفقرة 3-8-6-3 نشوء التشوهات عند وجه النفق في سياق حصر الالتقاء.
- **الخوابير المحقونة كليًا مع صفائح التحمل:** إن الوظيفة الرئيسة لعنصر التدعيم هذا هي تقوية الصخر ولصفيحة التحمل دور ثانوي نسبيًا في تأمين التدعيم للمنظومة ككل. وفي النموذج الرقمي، يمكن تجاهل صفيحة التحمل؛ وما يلزم تمثيله هو فقط هو عنصر الإسفين المحقون كليًا.
- **محاكاة البراغي والعوارض الشبكية في التحليل الثنائي البعد 2 - D:** يتم تركيب البراغي والعوارض الشبكية عادة بنموذج نمطي في مقطع النفق أو الممر الرأسي وعلى تباعدات محددة على طول الحفرية. وعليه، تكون البراغي والعوارض الشبكية عبارة عن عناصر تدعيم فيزيائية ثلاثية الأبعاد. وفي التحليل الثنائي البعد 2ـ D، تكون خواص البراغي والعوارض الشبكية «منتشرة بلا انتظام» على طول النفق. وتكون خواص البراغي والعوارض الشبكية المستخدمة في النموذج تساوي تلك الخاصة بالتدعيمات الفعلية الموسطة عن طريق تباعد التدعيم على طول النفق أو الممر الرأسي (أي، الخواص المكافئة في وحدة الطول من النفق أو الممر الرأسي).

و. طريقة (أسلوب) التحليل

طوال عملية بناء النموذج وإجراء التحليل، من المهم إبقاء عدد التفاصيل والتحاليل في حده الأدنى. ويجب إعداد وتعديل مجموعة الدراسات المعيارية المحددة جيدًا عندما يجري فحص نتائج التحليل. ويجب أن يحافظ المحلل على الاتصال مع الفريق المصمم. والخطأ الشائع هو توقع أن يقدم التحليل حلًا أو دقة أعلى من البيانات المدخلة.

ز. تفسير نتائج التحليل

عند إنجاز التحليل الأول، يجب على المحلل فحص النتائج بشكل حذر.

والخطوة الأولى هي التحقق مما إذا كانت النتائج معقولة. وبعض الأسئلة التي يجب الإجابة عنها هي كما يلي:

- هل يتشوه الصخر كما هو متوقع؟
- هل توزيع الحمولة في منظومة التدعيم متوافق مع التشوهات الصخرية؟
- هل التغير في حالة الإجهاد في الصخر متوافق مع معايير الانهيار وخواص المواد الأخرى؟
- هل الحل متقارب رقميًا؟

إن الإجابة عن هذه الأسئلة ومثيلاتها قد يكشف عن وجود خطأ في البيانات المداخلة. ويعد التحقيق المفصل من النتائج الرقمية ضروري للتحليل الأول. ويلزم إجراء فحص أقل صرامة للتحليلات اللاحقة، ولكن بالرغم من ذلك، يجب أن يتحقق المحلل من أي شذوذ محتمل في النتائج.

يتضمن تقييم نتائج تحليل الاستمرارية ومضامينها فيما يتعلق بتفاعل الصخر ـ التدعيم فحص التالي:

- **التشوه حول الفتحة:** تتصل التشوهات في الكتلة الصخرية بالحمولة المنقولة لمنظومة التدعيم. ويمكن استخدام البيانات التي يتم الحصول عليها من التحليل الرقمي لإنشاء منحنيات رد فعل الأرض (الفقرة 3ـ 8ـ 6ـ 3). يمكن استخدام دراسات معيارية لإنشاء مخططات التصميم العامة المطبقة على أكثر من قياس فتحة أو ترتيب تدعيم.
- **الأحمال في منظومة التدعيم**: يمكن أن يقدم التحليل توزيعات قوى العزم، والدفع، والقص في البطانة، ويمكن استخدام البيانات المقدمة للتعامل مع التعديلات المحتملة في البطانة، مثل إدخال روابط مسامير لتقليل العزوم الزائدة. ويمكن أيضًا استخدام بيانات حمولة الخوابير لمراجعة التوزيع وتعديل قدرة الخوابير المطلوبة. ويوفر التحليل معلومات عن تأثير الفتحة على المنشآت المجاورة كالأنفاق المجاورة أو الأبنية السطحية التي قد تكون أصيبت بسبب تنفيذ النفق أو الممر الرأسي. وتشير التشوهات الزائدة إلى الحاجة لمنظومة تدعيم فعالة أكثر أو تغيير في طريقة أو تعاقب التنفيذ لتخفيف الضرر المحتمل.
- **المناطق الصخرية الخاضعة والمجهدة بشكل زائد**: تشير هذه المناطق إلى احتمال تشظي الصخر وتساقطه إذا وجدت قرب السطح المحفور. وتشير المناطق الكبيرة الخاضعة إلى شعف عام في الصخر والحاجة لتوفير تسليح. ويمكن استخدام المناطق لتقدير التسليح الصخري (البراغي والخوابير).
- **توزيع الضغط المسامي وجريان الماء**: سيوفر هذا معلومات عن اتجاه التدفق المحتمل للماء، بالإضافة إلى التغيرات المتوقعة في الضغوط المسامية في الصخر. وتكون المعلومات مناسبة في الكتل الصخرية ذات الفجوات، وكذلك في الصخور المنتفخة. وتكون الخطوط الكونتورية لتوزيع الضغط المسامي مفيدة في هذا المجال. تكون العديد من الكودات التجارية المتاحة ذات معالجات سريعة تزود المستخدم بمجال واسع من القدرة على إصدار مخرجات تتضمن بيانات مجدولة، وخرائط كونتورية، وخرائط شبكات مشوهة، وصور ملونة. وقد أضحت هذه المعالجات أدوات مفيدة يمكنها نقل نتائج التحليل بأسلوب موجز خصوصًا للمراجعين الخارجيين.

ح. تعديل تحليل منظومة التدعيم

- يوفر تحليل الاستمرارية رؤية أوضح في سلوك منظومة التدعيم ككل وتلائم منظومة التدعيم. ويمكن للتحليل أن يلقي الضوء على بعض الاختلالات أو احتمال المبالغة في التصميم في منظومة التدعيم المطلوبة. ويمكن لعدد من إعادات التحليل أن تكون مطلوبة لتحسين التصميم.
- جوانب قصور تحليل الاستمرارية: تعد تقنيات تحليل الاستمرارية أدوات متعددة الجوانب توفر مقدارًا وافرًا من فهم المسائل التي تنطوي على منشآت تحت سطح الأرض، ولكنها ذات جوانب قصور عديدة يجب أن تؤخذ في الحسبان لاستخدام هذه التقنيات بشكل فعال. تقنيات تحليل الاستمرارية ليست بديلًا عن تقنيات التصميم التقليدية والرأي الهندسي الصحيح. لا يستطيع تحليل الاستمرارية أن يقدم تنبيهًا عن الظواهر الغريبة مثل التشظي الموضعي. يعد تحليل الاستمرارية في التطبيقات الجيوتكنيكية مختلفًا بشكل كبير عن التطبيقات في المجال الإنشائي. ويعد تحليل الاستمرارية في التطبيق الإنشائي جيدًا لموافقة متطلبات الكود، حيث يتم تحديد المعايير بشكل جيد. يتضمن تحليل الاستمرارية في التطبيقات الجيوتكنيكية العديد من العوامل غير المعروفة ويحتاج قدرًا وافرًا من الحكمة من جانب المستخدم. ويكون تعقيد تحليل الاستمرارية غالبًا محصورًا بتوافر البيانات الجيوميكانيكية وخواص الصخر. ويجب أن يتجنب المصمم وضع افتراضات متعددة أكثر مما ينبغي فيما يتعلق بخواص المواد في النموذج، بينما لا يزال يتوقع الحصول على معلومات مفيدة من التحليل. ويتنبأ تحليل الاستمرارية بالإجهادات، والتشوهات، والانتقالات، ولكنه عمومًا لا يكشف عن أي شيء

حـول الاسـتقرار وعوامـل الأمـان. ويمكـن لبعـض البرامـج المتخصصـة توفـير تنبـؤات عـن الاسـتقرار (مثـال، Sloan 1981).

- أمثلـة علـى التطبيقـات: يوضـح الشـكل 3ـ 37 اسـتخدام تحليـل الاسـتمرارية لمسـائل الممـرات الرأسـية والأنفـاق عنـد تطبيقهـا علـى المنشـآت تحـت سـطح الأرض عاليـة الإدارة وعاليـة التعـارض.

3-8-6-5 تحليلات عدم الاستمرارية

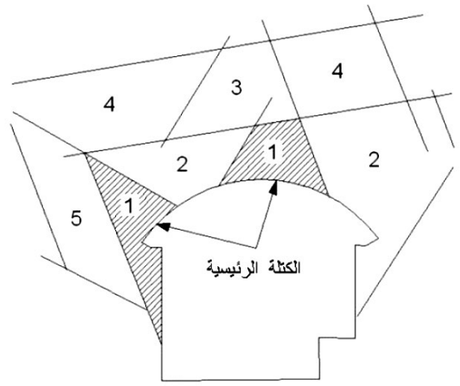
إن حلـول الشـكل المغلـق وتحليـل الاسـتمرارية لمسـائل الأنفـاق والممـرات الرأسـية في الصخـر تتجاهـل مواطـن الضعـف والتصدعـات التـي تقاطـع اسـتمرارية الكتلـة الصخريـة. ويجعـل وجـود مواطـن ضعـف في الصخـر مجموعـة مـن الكتـل المتراصـة بإحـكام. وهكـذا فـإن الصخـر يُظهـر سـلوكًا مختلفًـا عـن المـادة السـليمة. ويصـف هـذا المقطـع طـرق تحليـل الفتحـات في الصخـر الـذي يتـصرف بعـدم اسـتمرارية.

1. نظرية الكتلة الرئيسة

إن أفضـل نظريـة معروفـة في تحليـل عـدم الاسـتمرارية في الصخـور هـي نظريـة الكتلـة الرئيسـة المبتكـرة مـن قبـل Good-man and Shi (1985). ففـي تحليـل الكتلـة الرئيسـة، يكـون الغـرض هـو إيجـاد الكتـل المهمـة الناشـئة بفعـل تقاطعـات الفجـوات في كتلـة صخريـة محفـورة عـلى طـول سـطوح محـددة. ويمكـن أن يتجـاوز التحليـل العديـد مـن تركيبـات الشـقوق ويبـدأ مباشـرة بأخـذ كتـل حرجـة محـددة رئيسـة في الحسـبان. وإذا كانـت هـذه الكتـل مسـتقرة، فـلا يمكـن للكتـل الأخـرى أن تسـقط في الفتحـة. والافتراضـات الرئيسـة هـي كالتـالي:

- جميـع السـطوح المتشـققة تكـون مسـتوية. ويمكـن بالتالي اسـتخدام تحليـل المتجـه الخطـي لحـل المسـألة.
- تمتـد السـطوح المتشـققة عـبر الحجـم الكامـل للكتلـة الصخريـة. لا توجـد فجـوات تنتهـي ضمـن الكتلـة. لا توجـد فجـوات جديـدة يمكـن أن تنشـأ بسـبب التشـقق.
- تكـون الكتـل البكـر (السـليمة) المجـددة بواسـطة الفجـوات صلبـة. وتكـون التشـوهات بسـبب حركـة الكتلـة وليـس تشـوه الكتلـة.
- تكـون سـطوح الفجـوات والحفريـة محـددة. وإذا كانـت اتجاهـات مجموعـة الشـقوق تنتـشر فعـلًا حـول هـدف مركـزي، فإنـه يجـب اختيـار اتجـاه واحـد لتمثيـل المجموعـة.

يوضـح الشـكل 3 - 38 تصـور تحليـل الكتلـة الرئيسـة. ويمكـن تنفيـذ تحليـل الكتلـة باسـتخدام طـرق الإسـقاط السـتيوغرافي التصويـري أو الطـرق الشـعاعية (المنجهيـة). ويوضـح (Hatzor and Goodman 1993) اسـتخدام التحليـل عـلى نفـق Colora-do,Glenwood Canyon ,Hanging Lake. وقـد تـم تضمـين طـرق التحليـل في برامـج حاسـوبية.



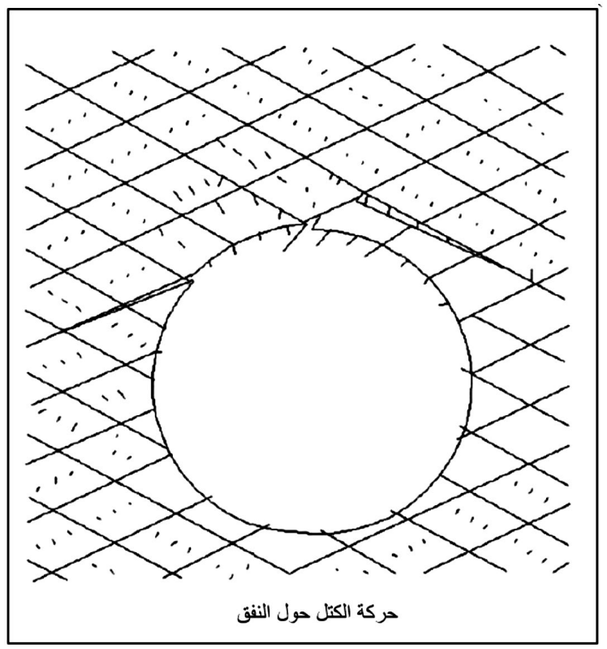
الشكل 3 - 38:ى تحليل الكتلة الرئيسة

2. طرق العناصر المنفصلة

- يقـترح Cundall and Hart (1993) أن مصطلـح طريقـة العنـاصر المنفصلـة يطبـق عـلى الطـرق الحاسـوبية التـي تسـمح بالانتقـالات والدورانـات المحـدودة للأجسـام المنفصلـة، المتضمنـة انعـزالًا كامـلًا، وتعـرف التماسـات جديـدة بشـكل آلي عنـد تقـدم عمليـة الحسـابات. وهنالـك أربعـة أصنـاف رئيسـة تتوافـق مـع هـذا التعريـف:
- طـرق العنـاصر المميـزة: إذ تسـتخدم زحـف الزمـن الواضـح لحـل مسـائل الحركـة بشـكل مبـاشر. ويمكـن للأجسـام أن تكـون صلبـة، أو أن نقـاط التـماس القابلـة للتشـوه تكـون مشـوهة.
- الطـرق الشـكلية: إذ تكـون مشـابهة لطـرق العنـاصر المميـزة في حالـة الأجسـام الصلبـة، لكـن بالنسـبة للأجسـام القابلـة للتشـوه، فيتـم اسـتخدام الانطبـاق الشـكلي.
- طرق التشوهات المتقطعة: في هذه الطرق، تكون التماسات صلبة، والأجسام قد تكون صلبة أو قابلة للتشوه.
- طـرق تبـادل العـزم: في هـذه الطـرق، يكـون كلا الالتماسـات والأجسـام صلبًـا؛ ويتـم تبـادل العـزم بـين جسـمين متماسـين خـلال الصـدم اللحظـي. ويمكـن تمثيـل الانـزلاق الاحتـكاكي.

ويبـين الشـكل 3ـ 39 تحليـل فتحـة نفقيـة في كتلـة صخريـة متشـققة باسـتخدام طريقـة العنـاصر المميـزة والبرنامج الحاسـوبي UDEC.

إن طـرق تحليـل نظريـة الكتلـة والعنـاصر المميـزة مفيـدة في تحليـل الكتـل غـير المناسـبة في الحجـرات الكبـيرة تحـت سـطح الأرض. وفي الفتحـات الأصغـر كالممـرات الرأسـية والأنفـاق، تكـون هـذه الطـرق أقـل فائـدة. وقـد حـول اعتبـارات التكلفـة دون اسـتخدام تحليـل الانقطاعـات في الفتحـات الصغـيرة بسـبب ضوابـط الميزانيـة. وإن الفتحـات الكبـيرة التـي تكـون معتـادة أن تصبـح مـأوى لتجهيـزات باهظـة الثمـن تكـون ذات ميزانيـة كافيـة لإنجـاز هـذه التحليـلات، وإن طـرق الانقطاعـات محـدودة بعـدم وجـود بيانـات كافيـة أثنـاء التصميـم. ويمكـن اسـتخدام الطـرق أثنـاء التنفيـذ بعـد وضـع خريطـة الانقطاعـات لتحديـد الكتـل غـير المسـتقرة المحتملـة المحتاجـة للتدعيـم (NATM).



الشكل 3 - 93: تحليل العناصر المميزة، Cundell and Hart 1993

3-8-7 تصميم التبطينات الدائمة، النهائية

3-8-7-1 اختيار التبطين:

يجب على مهندس النفق أن يأخذ في الحسبان خيارات التبطين التي تشتمل على ما يلي:

1. الخرسانة غير المسلحة.
2. الخرسانة المسلحة.
3. قطع من الخرسانة.

ويجب اختيار نوع التبطين المناسب من خلال الأخذ في الحسبان:

1. المتطلبات الوظيفية.
2. الجيولوجيا والهيدرولوجيا.
3. قابلية التنفيذ.
4. الجوانب الاقتصادية.

ويلخص الجدول رقم 3 - 9 الخيارات الشائعة للتبطين النهائي.

الجدول رقم 3 - 9: ملخص الأنواع الرئيسة للتبطين (أخذ عن O'Rourke,1984:COE EM 1110 ـ 2 ـ 2901,1997)

نوع التبطين	أبرز المميزات
الصخور غير المدعمة	مناسب للصخر ذي النوعية الجيدة جدًّا. ويجب أن يتكيف مع قيود الإجهاد في المكان. وقد يتطلب التجفيف والتكسية بالبلاطات عند السطوح الصخرية إجراء إغلاقات سطحية لكبت التلف طويل الأمد.
منظومات تسليح الصخر	قد تكون الخوابير غير المشدودة مناسبة للصخر ذي النوعية الجيدة. البراغي الصخرية المشدودة أكثر غلاءً، لكنها تؤمن فاعلية أكبر. وتستخدم الدعامات لتقوية الأرض وزيادة زمن تحملها قبل أن تنهار. الإسمنت والملاطات الراتنجية تؤمن إرساءً دائمًا وحماية من التآكل. تسليح الصخر غالبًا مدعم بالخرسانة المقذوفة أو الشبكات لاحتواء الصخور الحرة والسيطرة على التشظي.
التبطين بالخرسانة المقذوفة	سيؤمن تدعيمًا وقد يفيد في تحسين التسرب والخواص الهيدروليكية للنفق. إنها أيضًا تحمي الصخر من التآكل والفعل المؤذ الذي يحدثه الماء. لحماية الأرض الحساسة للماء، يجب أن تكون الخرسانة المقذوفة مستمرة وخالية من التشققات ومسلحة بشبكة من الأسلاك أو الألياف. كما في الأنفاق غير المبطنة، تكون الأنفاق المبطنة بالخرسانة المقذوفة عادة مجهزة بخرسانة مقلوبة مصبوبة في المكان.

المنظومات المقطعة	تتركب القطع عادة من خرسانة مسبقة الصنع أو الحديد. غالبًا تتم السيطرة على التسرب من خلال سدادات مغلقة مضغوطة. الحلقات القطعية، غير المغلقة مع حلقات محقونة تكون مناسبة لبعض الأنفاق في الصخر.
التبطينات الخرسانية غير المسلحة	هذا مقبول إذا كان الصخر في حالة اتزان قبل صب الخرسانة، والأحمال على التبطين يتوقع أن تكون منتظمة وشعاعية؛ وإذا كان التسرب من خلال الانكماش الثانوية والشقوق الحرارية مقبولًا. غير مقبولة في الصخر المضغوط بشكل سيئ، والذي يستطيع أن يسبب أحمال انتقال غير منتظمة.

ويجب أن يأخذ تصميم التبطين في الحسبان احتمال التسرب الزائد مع مرور الزمن من خلال السمات الجيولوجية للنفاذية والفجوات بواسطة مظفار (إزميل) الحفر. ويجب أن يهتم بتفاعل البطانة مع الصخر، ويشمل ذلك أنماط الانهيار والأحمال التالية التي تستمر بشكل مستقل عن الانتقال.

تتأثر تبطينات الأنفاق الصخرية السطحية نسبيًّا قبل كل شيء بأحمال الجاذبية التي تمثل وزن الأسافين الصخرية المجاورة لمحيط النفق. ويتم تحديد هذه الأحمال بوحدة الوزن من الصخر ونظام التشققات والفجوات التي تتقاطع مع اكتلة الصخرية. ويمكن تقدير الأحمال على التبطين المستمر بواسطة الأخذ في الحسبان التجميعات المختلفة للشقوق التي تكون متناغمة مع الجيولوجيا وتشكل أسافين معتلية أو مجاورة للنفق. ويكون الحد الأعلى لحمولة التدعيم هو وزن الإسفين الحرج الأكبر، مطروحًا منه المقاومة الاحتكاكية والتشابكية الناشئة على طول مستويات الانزلاق. وهناك العديد من الدراسات المفيدة حول الأسافين الحرجة ومتطلبات التدعيم للفتحات تحت سطح الأرض، وتشمل هذه الدراسات .Cording and Hoek and Brown (1980) ,Ward(1987), Brierley (1975), Deere (1972) وتلعب خواص الشقوق (مثل، الاتجاه، والتكرار، والثخانة، والاحتكاكية أو مقاومة التماسك، ودرجة التشابك على طول السطوح المتشققة) دورًا مهمًّا في تحديد مقدار أحمال الجاذبية وتوزيعها. وهكذا، فإن التحريات الجيوتكنيكية تكون ضرورية لتوصيف المنشأة الصخرية وإجراء تقدير كمي لخواص الصخر والشقوق من أجل تقدير الحمولة.

لقد تم اقتراح طرق الاختيار منظومات التدعيم الصخري على أساس علاقات تجريبية بين التدعيم والأصناف النوعية والكمية المختلفة للكتلة الصخرية (Terzaghi, 1946: Deere, Merritt and coon,1969: Wickman, Tiedemann and Skin-ner,1974, Barton, Lien and Lunde,177, Bieniawski,1979). وتعد منظومات التصنيف هذه مفيدة في الحصول على تقدير احتياجات التدعيم. ويحتاج المصمم عادةً تقديرًا أكثر تفصيلًا لتحديد نوع التبطين الدائم وأبعاده. ويوجز Cording and Ma-her (1978) طريقة عامة تؤمن تحديدًا شاملًا أكثر، بالتوافق مع الخطوات التالية: 1. تقدير الجيولوجيا والخواص المهمة لمؤشر كفاية الصخر. 2. تقدير الأحمال الصخرية المتوافقة مع عملية إجراء التنفيذ ونماذج السلوك الصخري للمحيط الجيولوجي المعطى والشكل الهندسي للحفرة. 3. اختيار التدعيم الأكبر ملاءمة لعملية إجراء التنفيذ والخدمات الدائمة للمرافق.

تغير حفرية النفق حالة الإجهاد في الكتلة الصخرية. ونتيجة ذلك، فإن تبطينات النفق نادرًا ما تصمم على الأحمال المكافئة للحالة الإجهادية في المكان؛ وتكون مثل هذه الحمولة غالبًا غير عملية للتدعيم وعادة لا تكون موجودة في وقت تنفيذ التبطين النهائي.

يتم غالبًا التعبير عن تخفيض الإجهاد في المكان على شكل منحنى استجابة أرضية. حيث يكون فيه الضغط الشعاعي عند السطح البيني التبطين ـ الأرض مرسومًا كتابع للانتقال الشعاعي المتجه نحو الداخل.

وقد تم وضع منحنيات الاستجابة الأرضية لمختلف نماذج السلوك المادي، كما تمت مناقشته من قبل Brown et al.(1983) وفي الأنفاق الصخرية ذات العمق السطحي، فإن انتقالات صغيرة جدًّا تكون كافية للتسبب بتخفيضات أساسية في الإجهاد الشعاعي. وفي الأنفاق المحفورة تحت ظروف الإجهاد العالي المكاني في الصخر ذي القوة المنخفضة

نسبيًّا، فإن السلوك اللدن قد يقود إلى حركة أساسية متجهة نحو الداخل قبل أن تستطيع الكتلة الصخرية أن تحرك قوة قص كافية لتخفيض الضغط الشعاعي. ويتم استخدام منحنيات الاستجابة الأرضية لهذا النوع من حالات الضغط الأرضي على أساس مبادئ لتسوية تركيب التدعيم الابتدائي وقياسات التقارب المتجه نحو الداخل خلال تنفيذ العديد من أنفاق الطرق السريعة الأوروبية (مثال، Rabcewicz, 1969 Rabcewicz,1975, Steiner, Einstein and Azzouz, 1980).

إن المادة الأكثر أهمية لاستقرار النفق هي الكتلة الصخرية، التي تقبل معظم أو كل الخطر الناتج عن حفر فتح النفق عن طريق إعادة توزيع الإجهاد حول الفتحة. ويساهم التدعيم الصخري والتبطين على الأغلب بتوفير قياس الحصر (التقييد). فالتبطين الموضوع في الفتحة المحفورة التي وصلت إلى الاستقرار (مع أو من دون تدعيم صخري إبتدائي) لن يلاقي إجهادات باستثناء الإجهاد الناشئ عن الوزن الذاتي. ومن ناحية أخرى، فإن التبطين الموضوع في فتحة محفورة في كتلة صخرية مرنة في الوقت الذي يكون فيه 70% من كل الحركة الكامنة قد حدثت سيلاقي إجهادات من تحرير الـ30% المتبقية من الانتقال. وستعتمد الإجهادات والانتقالات الفعلية على معامل الكتلة الصخرية وعلى مادة تبطين النفق، وإذا كان المعامل أو الإجهاد في المكان غير منتظمين، فإن التبطين سوف يتشوه، حيث تتشوه مادة التبطين بمقدار ارخاء الصخر. وبمقدار ما تدفع مادة التبطين مقابل الصخر، تزداد حمولة الصخر.

3-7-8-2 أنماط انهيار التبطينات الخرسانية

تعتمد الحمولة الصخرية المؤثرة في التدعيم الأرضي للنفق على التفاعل بين الصخر والتدعيم الصخري، ويمكن غالبًا تخفيف الإجهاد الزائد بجعل التدعيم الصخري أكثر مرونة. من الممكن إعادة تحديد عامل الأمان للتبطين بواسطة نسبة الإجهاد الذي يحدث انهيارا والإجهاد الفعلي الناشئ لميكانيكية انهيار محددة. وتتضمن أنماط انهيار التبطينات الخرسانية الانهيار، والتسرب الزائد، والتآكل المتسارع. ويعتبر خضوع الضغط في حديد التسليح أو الخرسانة أيضًا نمط انهيار؛ولكن شقوق الشد في الخرسانة لا تؤدي عادة إلى كفاءة غير مقبولة.

3-7-8-3 الأحمال اللاحقة

توجد هذه الأحمال بشكل مستقل عن الانتقال، وتتضمن، مثلاً، الحمولة الهيدروستاتيكية الناشئة من تشكل الماء؛ والأحمال الناتجة من انتقالات انتفاخ وانضغاط الصخر، والتي عادة لا تكون موحدة ويمكن أن تؤدي إلى تشوهات أساسية وانهيار انحناء للتبطينات النفقية.

3-7-8-4 التبطينات الخاضعة للانحناء والتشوه

في أغلب الحالات، يتم تثبيت الصخر في الوقت الذي يتم فيه صب الخرسانية، وستقبل البطانة الأحمال الناشئة فقط من ضغط الماء. لكن، قد تدعو الحاجة لتصميم البطانات الخرسانية المسلحة من أجل الانحناء المحيطي لتقليل التشقق إلى حده الأدنى وتجنب التشوهات الزائدة. ويبين الشكل 3ـ 40 بعض التوصيات العامة لاختيار الأحمال من أجل التصميم.

توصيات عامة للأحمال والتشوهات

1. حمولة بحد أدنى للانثناء: تتوزع الحمولة الرأسية بشكل منتظم على عرض النفق، ويكون ذلك متساويًا لارتفاع الصخر بـ0.3 مرات من ارتفاع النفق.
2. تأمين استقرار منطقة التشظي مسبقًا: تكون الحمولة الرأسية المنتظمة مساوية لـ0.6 مرات من ارتفاع النفق.
3. الصخر المضغوط: استخدم ضغط يساوي بين 1.0 إلى 2.00 مرة من ارتفاع النفق، ويعتمد ذلك على مقدار توزيع الانتقال والضغط المسموح به قبل وضع الخرسانة. ومن ناحية أخرى، استخدم تحليل المرونة ـ اللدونة المبني على التقديرات، حيث لا يزيد نصف قطر اللدونة عن قطر نفق واحد.
4. بالنسبة للحالات 3،2،1، استخدم ضغوطات جانبية مساوية لنصف الضغوط الرأسية، أو حسبما يجري تحديده بالتحليل مع معاملات أفقية مختارة. وللحفر باستخدام المواد المتفجرة، تتم زيادة القيم بنسبة 30%.
5. الصخر المنتفخ، المشبع في المكان: استخدم نفس ما هو وارد في «3» أعلاه.
6. الصخر المنتفخ، غير المشبع بالأنهايدرات، مع سهول الوصول إلى الماء: استخدم ضغوط الانتفاخ التي يجري تقديرها من اختبارات الانتفاخ.
7. النفق غير الدائري (حذوة الحصان): قم بزيادة الحمولات الرأسية بنسبة 50%.
8. بالنسبة لحمولة الحقن غير المنتظمة، أو الحمولات الناشئة عن الفراغ خلف البطانة: استخدم الحد الأعلى من ضغط الحقن المسموح به فوق منطقة مساوية لربع قطر النفق، بحد أقصى يساوي 1.5 متر (5 أقدام).

الشكل 3 - 40: توصيات عامة من أجل الأحمال والتشوهات

إن الحالات المسببة لانحناء محيطي في البطانات هي كما يلي:

- التدعيم المتفاوت الناتج عن طبقة من الصخر ذات معامل أخفض بكثير من الصخر المحيط، أو فجوة متروكة خلف البطانة.
- التحميل المتفاوت الناتج عن مقدار من الصخر بعد التنفيذ، أو ضغط مائي محلي محبوس في فجوة خلف البطانة.
- انتقالات من الانتفاخ أو الانضغاط المتفاوت للصخر.
- أحمال التنفيذ، مثل الأحمال من ضغوط الحقن غير المنتظمة.

الأنواع الأكثر أهمية لطرق تحليل البطانات النفقية على الانحناء والتشوه هي:

- الحلقة الحرة الوقوف الخاضعة لأحمال رأسية وأفقية (لا يوجد تفاعل أرضي).
- ميكانيكا الاستمرارية (الحلول المغلقة).
- الحلقة المحملة المستندة على نوابض تحاكي التفاعل الأرضي (العديد من الكودات الهندسية الإنشائية).
- ميكانيكا الاستمرارية (الكودات الرقمية).

يجب أن يختار المصمم الطريقة التي تكون أكثر تقاربًا مع طبيعة وتعقيد الحالات وشكل النفق وحجمه.

1ـ ميكانيكا الاستمرارية، الحلول المغلقة

تكون العزوم الناشئة في البطانة متوقفة على قساوة البطانة نسبة لتلك الخاصة بالصخر. ويمكن أن تدرس العلاقة بين القساوة النسبية والعزم باستخدام الحل المغلق للتفاعل المرن بين الصخر والبطانة. وتظهر المعادلات الخاصة بهذا الحل والافتراضات الأساسية في الشكل 3ـ 40. ونادرًا ما نصادف هذه الافتراضات في الحياة الحقيقية، باستثناء

عندما يتم تركيب البطانة مباشرة خلف الواجهة المتقدمة للنفق أو الممر الرأسي، قبل أن تصل الإجهادات المرنة إلى حالة التوازن المستوى للإجهاد. مع ذلك، فإن هذا الحل مفيد لفحص تأثيرات تباينات المعايير المهمة. لاحظ أنه يتم التحكم بالحد الأعلى للعزم بواسطة نسبة المرونة.

تحليل العزوم والقوى باستخدام الـFEM

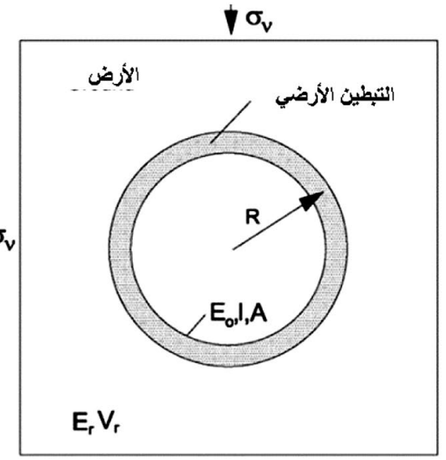
يمكن تحديد العزوم والقوى في بطانات الأنفاق الدائرية باستخدام البرامج الحاسوبية لـFEM الإنشائية. ولهذا التحليل المزايا التالية:

- يمكن منح سمات متنوعة للصخر بالإضافة إلى عناصر البطانة.
- يمكن التعامل مع الحدود والأشكال غير المنتظمة.
- يمكن تحليل أحمال التنفيذ المتزايدة، والتي تتضمن، على سبيل المثال، الأحمال من حقن الردم الخلفي.
- يمكن أيضًا تحليل تفاعل بطانتين بممرين.

ويبين الشكل 3ـ41 نموذج الـ FEM لمنظومة بطانتين ذات ممرين. فالبطانة الابتدائية هي بطانة خرسانية قطعية مفتوحة (غير مثبتة بالبراغي)، والبطانة النهائية هي خرسانة مسلحة مصبوبة في المكان مع غشاء كتيم مانع لتسرب الماء.

تستخدم الوصلات الصلبة للوصل بين البطانتين عند عقد متعاقبة. وتنقل هذه الوصلات الأحمال المحورية فقط وليس لديها قساوة انثناء وحد أدنى من التشوه المحوري. وتوضع المفاصل عند أعلى قمة قوس النفق، والقلب والخطوط النابضية للبطانة الابتدائية لتمثيل الشقوق بين القطع.

التبطين في أرض مرنة، ونموذج الاستمرارية



الافتراضات:
الإجهاد المستوي، ضغوط التبطين النصف قطري المرن تساوي للإجهادات في المكان، أو نسبة منها

يشمل رابطة مماسية بين التبطين والأرض

تشوه التبطين والانضغاط اللذين يتعرضان لمقاومة تفاعلات الأرض $K_o\sigma_v$

الحد الأعلى/الأدنى لعزم الانثناء

$$M = \mp \sigma_v(1-k_o)\, R^2/(4+\frac{3-2Vr}{3(1+Vr)(1+Vs)}\cdot\frac{E_rR^3}{Ec\ I}$$

الحد الأعلى/الأدنى للانتقال النصف قطري

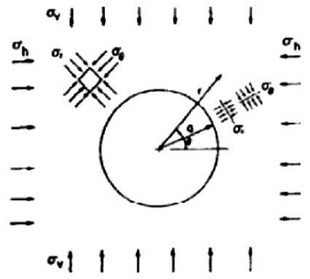
$$N = \sigma_v(1-k_o)\, R/(2+(1+k_o)\frac{2(1-Vs)}{(1-Vr)(1+V)}\frac{Es.R}{Ec.A} \mp \sigma_v(1-k_o)\, R/(2+\frac{4E_rVrR^3}{(3-4Vs)(12(1+Vr)EcI+Er.R^3)})$$

الحد الأعلى/الأدنى للانتقال النصف قطري

$$\frac{u}{R} = \sigma_v(1-k_o)R^3/(\frac{2}{1+Vs}E_rR^3+2\,Ec.A\,R^2+2\,Ec\ I) \mp \sigma_v(1-k_o)R^3/(12\,Ec\ I+\frac{3-2Vs}{(1+Vr)\ (3-4Vr)}E_rR^3)$$

الشكل 3 - 41: التبطين في الأرض المرنة، نموذج الاستمرارية (أخذ عن US Army COE EM 1110 ـ 2 ـ 2901,1997)

الرموز المستخدمة لوصف الإجهادات حول فتحة دائرية في مجال إجهاد ثنائي المحور



a	نصف قطر عمود النفق
r	مسافة نصف القطر إلى أية نقطة
Θ	مسافة زاورية إلى أية نقطة
σ_h, σ_v	مجال الإجهاد الأصلي (قبل حفر النفق) عند مستوى النفق
σ_θ,σ_r	الإجهادات النصف قطرية النهائية (بعد الحفر) حول النفق
E	معامل يونغ للصخر
υ	نسبة بويزن
u_a	الإزاحة النصف قطرية عن نصف القطر a
v_a	

الإجهادات هي:

الإجهادات النصف قطرى
$$\sigma_r = 0.5(\sigma_v + \sigma_h)(1 - a^2/r^2) + 0.5\,(\sigma_v - \sigma_h)(1 + 3a^4/r^4 - 4a^2/r^2)\cos 2\Theta$$

الإجهاد المحيطى
$$\sigma_\theta = 0.5(\sigma_v + \sigma_h)(1 + a^2/r^2) - 0.5\,(\sigma_v-\sigma_h)\,(1 + 3a^4/r^4)\cos 2\Theta$$

إجهاد القص
$$\tau_{r\theta} = 0.5(\sigma_h - \sigma_v)(1 -3a^4/r^4 + 2a^2/r^2)\sin 2\Theta$$

الحالة ١ الإجهادات المستخدمة عند منطقة بعيدة، مناسبة للحالة التي تكون فيها عملية سطحية كبيرة مستخدمة بعد إنشاء النفق

الإزاحات هي:

$$Eu = (1-\upsilon^2)\{0.5(\sigma_v + \sigma_h)(r + a^2/r) - 0.5(\sigma_v - \sigma_h)(r - a^4/r^3 + 4a^2/r)\cos 2\Theta\} - \upsilon(1 + \upsilon)\{0.5(\sigma_v + \sigma_h)(r - a^2/r) - 0.5(\sigma_v - \sigma_h)(r - a^4/r^3)\cos 2\Theta\}$$

$$Ev = 0.5(\sigma_v - \sigma_h)\{(1 - \upsilon^2)(r + 2a^2/r + a^4/r^3) + \upsilon(1+\upsilon)(r - 2a^2/r + a^4/r^3)\}\sin 2\Theta$$

عند أطراف النفق فإن الإزاحات هي:

$$Eu_a = (1-\upsilon^2)a\{(\sigma_v+\sigma_h) - 2(\sigma_v - \sigma_h)\cos 2\Theta\}$$

$$Ev_a = 2(1-\upsilon^2)a(\sigma_v - \sigma_h)\sin 2\Theta$$

الحالة ٢ نفق محفور في وسط سابق الإجهاد، مناسب لتحليل حفر النفق
الإزاحات هي

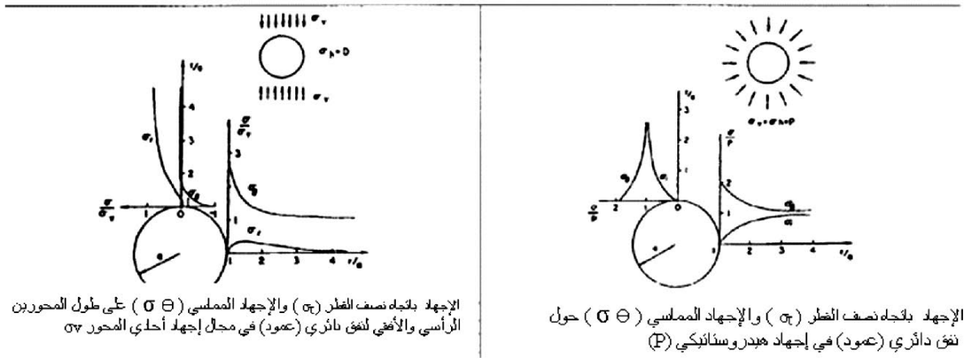
$$Eu = 0.5(1+\upsilon)\{(\sigma_v + \sigma_h)(a^2/r) - (\sigma_v - \sigma_h)((1-\upsilon)4a^2/r - a^4/r^3))\cos 2\Theta\}$$

$$Ev = 2(1+\upsilon)(\sigma_v - \sigma_h)2a^2/r + a^4/r^3))\sin 2\Theta$$

في المنطقة المحيطة بالنفق، تكون الإزاحات على النحو التالي:

$$Eu_a = 0.5(1+\upsilon)a\{(\sigma_v+\sigma_h) - (3-4\upsilon)(\sigma_v - \sigma_h)\cos 2\Theta\}$$

$$Ev_a = 6(1+\upsilon)(\sigma_v - \sigma_h)\sin 2\Theta$$



الإجهاد باتجاه نصف القطر (σ_r) والإجهاد المماسي ($\sigma\,\Theta$) حول نفق دائري (عمود) في إجهاد هيدروستاتيكي (P)

الإجهاد باتجاه نصف القطر (σ_r) والإجهاد المماسي ($\sigma\,\Theta$) على طول المحورين الرأسي والأفقي لنفق دائري (عمود) في مجال إجهاد أحادي المحور σ_v

الشكل 3 - 42: (a) تفصيل منظومة بطانتين من أجل التحليل، (b) العزوم والقوى

2. تحليل الاستمرارية، الحلول الرقمية

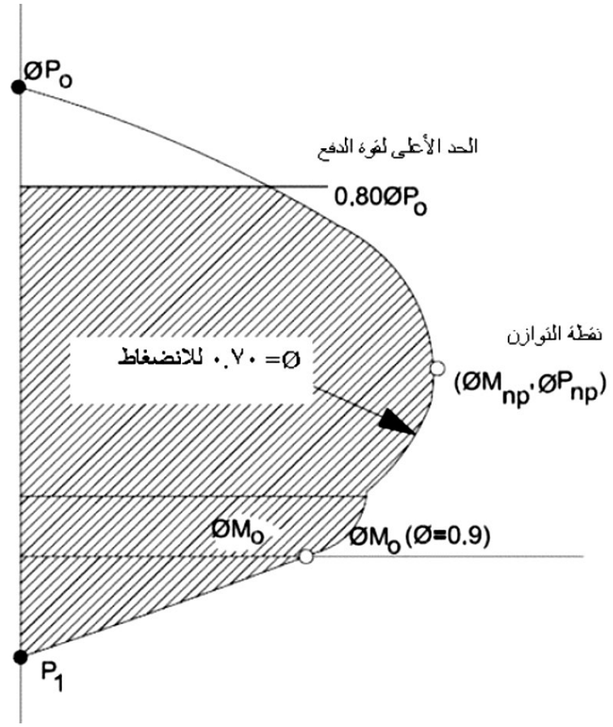
يوفر تحليل الاستمرارية حالة الإجهاد الكامل عبر الكتلة الصخرية ومنشأة التدعيم. وتستخدم هذه الإجهادات لحساب القوى وعزوم الانحناء في مكونات منشأة التدعيم.

وتعطي القوى والعزوم المصمم معلومات عن الحمولة العاملة المراد تطبيقها على المنشأة، ويمكن أن تستخدم في تصميم الخرسانة المسلحة. ويبين الشكل 3ـ 42 (b) عينة مخرجات من توزيع العزم والقوة في بطانة لنفق دائري في حالتي حفر مختلفتين.

3. تصميم المقطع العرضي الخرساني على الانحناء والقوى العمودية

حالما يتم تحديد عزم الانحناء والدفع الحلقي في بطانة، أو تقدير تشوه بطانة، بناءً على تفاعل الصخر ـ المنشأ، فإنه يجب تصميم البطانة لتحقيق كفاءة مقبولة.

وبما أن البطانة تكون خاضعة لقوة عمودية مركبة وانحناء، فإنه يتم القيام بالتحليل بشكل ملائم باستخدام منحنى الطاقة ـ التفاعل، الذي يدعى أيضًا مخطط العزم ـ الدفع. ويمكن استخدام إجراء إنشاء المخطط في القسم (5) أو في ACI 318ـ05 (ACI Committee 318,2005). ويظهر مخطط التفاعل مغلف المجموعات المقبولة لعزوم الانحناء والقوى المحورية في عنصر خرساني مسلح أو غير مسلح. وكما هو مبين في الشكل 3ـ 43، فإن العزم المسموح به بالنسبة لقيم منخفضة من الدافع يزداد مع الدفع لأنه يخفض الشد الحدي عبر مقطع العنصر. ويتم الوصول إلى الحد الأعلى للعزم المسموح به عند النقطة المسماة نقطة التوازن. ولتحقيق دفع أعلى، فإن اجتهادات الضغط تخفض العزم المسموح به. وتظهر المعادلات العامة لحساب نقاط مخطط التفاعل في القسم (5).



الشكل 3 - 43: منحنى الطاقة ـ التفاعل

تفسير النتائج التحليلية:

بالنسبة لجميع الطرق التحليلية، فإن من المهم الإقرار بأن دقة التحليل تتجاوز كثيرًا الدقة التي يمكن فيها تحديد الخواص المسيطرة للأرض. وعلاوة على ذلك، تستخدم منظومة البطانة الوحيدة بشكل شائع لطول كبير من النفق حيث توجد فوقه تغيرات مهمة في خواص الأرض.

وتكون الخواص التحليلية من ثم مفيدة من أجل تحري حساسية مقاطع البطانة تجاه تغيرات المعايير المستقلة، ومن أجل وضع قيود على سلوك البطانة المحتمل. ويجب عدم افتراض أن تحليل بطانة النفق يمكن أن يحدد التحليل الإنشائي لإطارات البناء الخاضعة لأحمال محددة جيدًا.

وقد عملت دراسات عديدة على تقييم كيفية ارتباط نتائج النماذج النظرية المختلفة بالفعالية الحقلية للبطانات الفعلية. وتم تقديم خلاصة عامة عن النماذج التصميمية للبطانات، بناءً على مبادئ ميكانيكا الاستمرارية، وذلك من قبل Dud-deck and Erdman (1982)، وتم تحري عدد من الافتراضات التصميمية ومقارنتها مع واقع ممارسة شق الأنفاق من قبل Schmidt (1984). وقد ناقش Kuesel (1983) القيود العملية على تطبيقات النماذج، ولخص علاقات عديدة مبسطة بين الأحمال الأرضية وأبعاد منظومات البطانات النموذجية.

استخدام الكودات:

يجب استخدام الكودات الإنشائية بحذر. فقد تمت كتابة معظم الكودات من أجل المنشآت فوق الأرضية على أساس افتراضات لا تأخذ في الحسبان تفاعل الأرض ـ البطانة. وعلى ذلك، فإن التطبيق الأعمى لكودات التصميم الإنشائي من المرجح أن يؤدي إلى قيود على قدرة البطانات تكون غير مصرح بها في ضوء الإسهامات الأساسية من الأرض والتأثير المهم لطريقة التنفيذ على كل من قدرة وتكلفة البطانات.

ويمكن مقارنة إجهادات القص الناتجة عن التحليل مباشرة مع قوة القص المحسوبة من الفقرة (2ـ 8ـ 5) من القسم (5) أو ACI 318ـ05 التي تأخذ في الحسبان تأثير الدفع. وإذا كان جزء من البطانة الذي يتم فيه التحقق من القص بالقرب من زاوية أو ركبة قوس واللتين يمكن أن تعدًا استنادًا للعنصر، فإنه يجب التحقق من القص على مسافة تساوي العمق الفعال من وجه الاستناد. وإذا لم يكن هناك مثل هذا الاستناد، كما في النفق الدائري، فإنه يجب التحقق من القص عند نقطة قيمته الأعلى.

ويمكن أن تضاف قوة القص للدعامات الفولاذية المدفونة إلى قوة المقاطع الخرسانية. ومن غير المفضل تأمين تسليح قص كالكانات (أتاري)، ومن ثم، يتم تعديل الثخانة عادة لمقاومة القص عند الحاجة.

وقد تسبب الأحمال المركزة من الأوتاد الصخرية قصًا عاليًا عند أطرافها، ويجب التحقق من هذه الحالة.

8-8-3 طرق الحفر

يجب على المهندس المصمم أن يقيم طرق الحفر الثلاثة التالية، والتي يمكن أن تستخدم بشكل منفصل أو مجتمع:

- TBM، بالنسبة للواجهة الكاملة، المقاطع الدائرية فقط.
- الغاطسة الطرقية، بالنسبة لتقدم الواجهة الجزئية، أي مقطع عرضي، أو واجهة كاملة من أجل المقاطع الصغيرة.
- الثقب ـ والتفجير، بالنسبة لتقدم واجهة كاملة أو جزئية، أي مقطع عرضي.

3-8-8-1 حفر الـTBM

بشكل عام، تكون أنفاق الـTBM ذات تكاليف تشغيل (قبل الحفر) عالية وزمن استمرار طويل، ويخفض المعدل العالي من التقدم التكلفة النهائية المترية للحفر. وقد يصل الطول الكلي للآلة (الـTBM الأصلي زائد ناقل الحركة الذيلي الضروري) إلى 305 م.

إن القيد الأساسي للغاطسات الطرقية هو أنها حاليًا قابلة للاستخدام فقط في صخر ذي قوة ضغط أقل من 83.000 كيلو نيوتن/م2. ويمكن أن يقص أو يقطع الصخر الأقوى بعيدًا إذا كان متكسرًا بشكل كافٍ. ومع وجود تركيبة ملائمة للتربة وآلة ذات حجم ومجهزة بشكل مناسب، فإنها قادرة على التقدم حتى 30.5م في اليوم. ويؤدي أسلوب القص إلى قياس صغير نوعًا ما بشظايا كثيرة. وبتجميعها ميكانيكا في الغطاء المقلوب للغاطسة الطرقية، فإنه يتم توصيلها إلى مؤخرة الآلة عن طريق ناقل مكمل (متحد مع الآلة).

3-8-8-2 الحفر بالثقب والتفجير

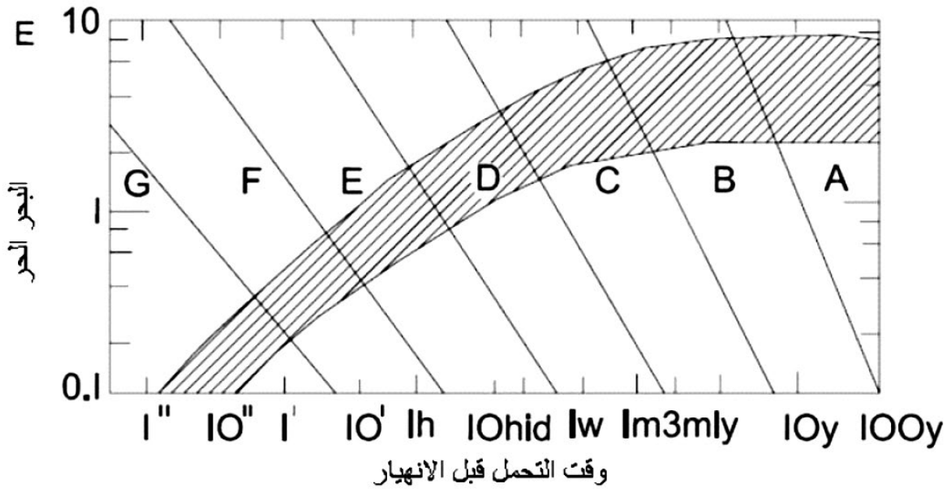
وهي الطريقة التقليدية للمقاطع العرضية غير الدائرية وأيضًا للأنفاق الدائرية القصيرة جدًا للتخلص من تكاليف التشغيل الأولي العالية لـTBM. ويجب أيضًا استخدام طريقة الثقب ـ والتفجير عند مواجهة تنوع جيولوجي كبير، أو حالة خاصة أخرى، مثل: واجهة مختلطة، أرض ضاغطة،... إلخ.

3-8-8-3 تقدم الواجهة

يجب أن ينصح باستخدام تقدم الواجهة الكلية (حفر المقطع الكامل للنفق بعملية واحدة)، عندما يكون ذلك ممكنًا، اعتمادًا على تركيب الأرض، و»البحر الفعال» للفتحة (عرض النفق، أو المسافة من التدعيم إلى الواجهة، أيهما أقل)، و»زمن تحمل الأرض قبل أن تنهار» (الزمن الذي تستطيع فيه الفتحة الصمود من دون تدعيم). ويعرض مخطط لاوفر Lauffer (الشكل 3 - 44) بشكل نوعي، مجال أزمنة تحمل الأرض بالنسبة لمختلف الأوساط الجيولوجية.

الشكل مبني على الخبرة في الألب؛ حيث 'A' تمثل «أفضل كتلة صخرية»، و'G' تمثل «أسوأ كتلة صخرية، وتشير المنطقة المظللة إلى العلاقات العملية.

وهكذا، فإن الزيادة في حجم النفق تؤدي إلى انخفاض شديد في زمن التحمل؛ لأن الحجم المسموح للواجهة بوضوح يجب أن يكون مقترنًا بالبحر الفعال.



الشكل 3ـ 44: البحر الفعال مقابل زمن الإنجاز (Brekke and Howard,1972)

3-8-8-4 النفق الأفقي والمنصة

عندما يكون زمن التحمل قبل الانهيار غير كافٍ لتركيب التدعيم، فإنه يجب تقصير الطول الدائري أو يجب استخدام تقدم الواجهة الجزئية لتقليل زمن الدورة. وتعد الطريقة الأكثر شيوعًا هي النفق الأفقي والمنصة.

إذ يتم أولًا حفر نفق أفقي علوي؛ ويمكن أن يزيد ذلك الطول الكلي للنفق أو قد يكون قصيرًا بقدر طول دائري مفرد. ويجب أن يعتمد قياس النفق الأفقي على الزمن المطلوب لتركيب التدعيم الضروري أو التسليح للقوس. وحالما يتم تأمين السقف أو المؤخرة، فإنه يمكن حفر المنصة.

3-8-8-5 تقدم الجروف المتعدد

إذا كان زمن التحمل قبل الانهيار غير كافٍ لتقدم النفق الأفقي والمنصة، إما بسبب الجيولوجيا أو البحور الكبيرة، فإن النفق الأفقي العلوي يجب أن يقسم إلى جرفين أو أكثر.

تتضمن فوائد ذلك ما يلي:

1. زيادة في زمن التحمل قبل الانهيار من البحر المنخفض.
2. تخفيض زمن التلوث بالوحل من تخفيض الحجم.
3. تخفيض في الزمن المطلوب لتركيب التدعيم أو التسليح.

3-8-8-6 طريقة شق الأنفاق النمساوية الجديدة NATM

تمت مناقشة هذه الطريقة سابقًا في الفقرة 3ـ 7، «حفر الأنفاق في الأرض الطرية». وحسبما تناقش هنا، فهي طريقة جروف متعددة مبنية على إجراءات متعلقة بالمشاهدة للتحقق من كفاية التدعيم المركب. يتم الجمع بين أفضل الأحكام والخبرة السابقة لاختيار قياس الجرف الابتدائي ومنظوممة التثبيت المرافقة. ويتم إجراء القياسات لتحديد فيما إذا كانت الانتقالات نحو الداخل قد انخفضت أو إذا كان من الضروري إجراء تثبيت إضافي لها. لقد تطورت النظرية تدريجيًّا وتم تقييم حالات أرضية أكثر صعوبة.

ويجب استخدام الخرسانة المقذوفة والبراغي الصخرية، فهي متاحة، ورخيصة، ويمكن زيادتها بسهولة عندما يكون من الواجب تسليح الكسوة الابتدائية. ويمكن أيضًا استخدام الخرسانة المقذوفة لتثبيت الواجهة بكل تقدم بشكل مؤقت، عند الضرورة.

العوارض الشبكية مكون دائم في الـNATM، وتتألف من ثلاثة أو أربعة قضبان تسليح خرسانة ضخمة ترتب في مقطع مثلثي أو شبه منحرف، مسبقة الانحناء على كامل محيط الحفرية، ومرتبطة مع بعضها في وحدة مسبقة الصنع مع قضبان شبكية مستمرة صغيرة القطر. وبعد التشييد، تملأ العارضة وتكسى بالخرسانة المقذوفة، وتصبح جزءًا متكاملًا من غشاء التدعيم الابتدائي.

3-8-8-9 تأثير طريقة الحفر على التصميم

ما لم تشر مواصفات النفق بوضوح إلى تفوق طريقة حفر واحدة على الأخرى، فإن وثائق العقد يجب أن تترك الخيار للمقاول. لكن، يجب على مصمم النفق أن يأخذ في الحسبان ويتوقع ما يلي:

- استخدام نماذج تثبيت مختلفة من أجل دفع الـTBM عنها من أجل الحفر بالثقب ـ و ـ التفجير (مثلًا، استخدام الأعصاب الحديدية على طول الحفرية، مفضلًا ذلك على استخدامها فقط عند الحاجة عند الأرض السيئة).
- منع الخرسانة المقذوفة ضمن 152م عن الرأس القاطع لـTBM لأن جسم الآلة يمنع الوصول لجدران النفق وارتداد الخرسانة المقذوفة سيوحل الـ TBM.

- استخدام التثبيت بالبراغي النموذجية في الصخر ذي القوة الثقلية العالية، بينما تتقدم الـ TBM بشكل عادي عن طريق الاندفاع خارجًا بشكل جانبي بمكابس ماسكة لتأمين المقاومة المطلوبة لدفع دورات مكبس الـ TBM.
- حفر الطول الكلي لنفق الـ TBM من أجل الحصول على القطر الأكبر المطلوب (أي، منظومة الأعصاب الحديدية أو ما يشبهها) عندما تأخذ الأنفاق مجالاتها الجيدة والسيئة. فمنظومة الأعصاب أو ما يشبهها يجب عندئذ أن تستخدم بالطول الكلي، ما لم يتم إدراج السطح الخارجي لذيل الـ TBM للسماح بتركيب البراغي الصخرية، أو يتم تزويدها بكلتا منظومتي مكابس الدفع والدفع الماسك ويؤخذ الوقت للتبديل بين منظومة وأخرى، عند الضرورة.

9-3 الأرض ذات الواجهة المختلطة أو الصعبة

يجب أن يأخذ مصمم النفق في الحسبان العوامل المتعلقة بـ:

1. عدم الاستقرار:

ويمكن أن ينشأ ذلك من فقدان زمن التحمل قبل الانهيار في: الترب الرملية والحصوية غير المتماسكة (خصوصًا أسفل مستوى الماء) والترب المتماسكة الضعيفة ذات المحتوى المائي العالي، أو في الصخر ممتلئ الجسم والسيئ؛ أو الاتجاه المعاكس للشقوق ومستويات الانكسار، أو تأثيرات الماء الجاري.

2. التحميل الثقيل:

بالنسبة لنفق محفور في عمق صخر ضعيف، فقد تتم مصادفة انهيار الانضغاط، أو الفرقعة، أو الانفجار للكتلة الصخرية بسبب التحميل الثقيل. وبالنسبة لتجميعات الأنفاق المتوازية والمتقاطعة، فإنه يجب تقدير الأحمال بحذر من قبل مصمم النفق.

3. العوائق والقيود:

يجب توجيه اهتمام خاص للعوائق الطبيعية، مثل: طبقًات الجلاميد، بالترافق مع السيلت الجاري والتجاويف في الحجارة الجيرية (الكلسية). وفي المناطق الحضرية، فإن القيود المحتملة تتضمن: الأساسات والخوازيق المهجورة، منظومات التدعيم للأبنية قيد الاستخدام من أجل التطور المستقبلي.

4. الظروف الفيزيائية:

يجب أن يأخذ المصمم في الحسبان احتمال وجود غازات ضارة في المناطق المتأثرة بالفعاليات المعمارية الحديثة أو الفعالية الحرارية الأرضية المستمرة، والصخر ذي المنشأ العضوي، ودرجات الحرارة المرتفعة، والتربة الملوثة.

5. الأنفاق ذات الواجهات المختلطة

يجب الأخذ بهذا المصطلح للإشارة إلى حالات، مثل:

- عندما يكون الجزء الأسفل من الواجهة العاملة في الصخر بينما الجزء الأعلى في التربة، أو العكس.
- عروق صخر قاسٍ في منشأ طري.
- أو طبقًات صخر قاسٍ متناوبة مع صخر طري، أو متحلل، أو مجوى (معرض للعوامل الجوية).
- أو تربة حبيبية غير متماسكة فوق الغضار القاسي.
- جلاميد في منبت طري؛ أو مضمنات عُقَدِيَّة قاسية في صخر طري (طبقًات صوان في الحجارة الكلسية الطباشرية، أو عقيق أحمر في صخر بركاني صفائحي).

ويجب توجيه الاهتمام لاحتمال تدفق الماء إلى النفق حالما يتم انكشاف الحالة المختلطة، وتزايد احتمال زعزعة إضافية. ويجب استخدام السيطرة على المياه الجوفية والتدعيم الكافي المستمر للمواد الضعيفة لتثبيت المصادر الخطرة. وإن أفضل وقت لعزل المياه الجوفية هو قبل بدئها بالتدفق إلى النفق؛ وإلا، فإنه يلزم وجود حاجز وقائي لإيقاف التدفق من دخول النفق.

6. شق الأنفاق عن طريق الثقب ـ و ـ التفجير

في الأرض الضاغطة، فإن المقاربة إلى أقرب شكل دائري للنفق تقدم استقرارًا محسنًا وعمرًا أطول للنفق على مجموة من التباينات في شكل حذوة الحصان المقدم بهذه الطريقة التقليدية.

ويجب أن يأخذ مصمم النفق في الحسبان التقنيات المضادة للتحميل الأرضي الزائد على النفق، مثل:

- الجروف المملوءة بالخرسانة.
- التدعيمات الفولاذية.
- واستخدام التدعيمات المطواعة (اللينة) عندما تجعلها الظروف الأرضية إلزامية لاتخاذ الإجراءات الوقائية من أجل تقارب أكبر لتحرير الإجهاد، وتؤمن منظومة التدعيم ضغط تدعيم ابتدائي منخفض نسبيًا، ويسمح بتحرير منتظم تقريبًا للإجهاد لصخر في سلوك مسيطر عليه، حول المحيط الكامل للنفق، بينما يمنع الصخر من الانسلال (الشكل 3ـ 45 والشكل 3ـ 46).

ويجب زيادة مقاومة التدعيم على المدى الطويل عن طريق إضافة مقادير صغيرة من الخرسانة المقذوفة عند الوصل بين الجدار الجانبي والبلاطة المقلوبة وقوس السقف، كما هو موضح في الشكل 3ـ 52. ويجب استخدام الخرسانة المقذوفة الإضافية على مسافة من الواجهة العاملة التي تتجنب التأثير على عمليات الإنتاج الرئيسة.

7. شق الأنفاق بواسطة TBM في الأرض الضاغطة

في التقاطع مع التصدعات، فإن الماء المتدفق الحامل للرمل والصخر الناعم يميل إلى التجمع لاعتراض سبيل القواطع؛ ويجب أن يسمح تصميم رأس القاطع فقط ببروز محدد للقواطع أمام رأس القاطع، باستخدام ترس الواجهة أمام عنصر التدعيم الإنشائي. ويجب أن يسمح التصميم بتغيير القواطع المهترئة من داخل النفق دون الحاجة للدخول من أمام رأس القاطع.

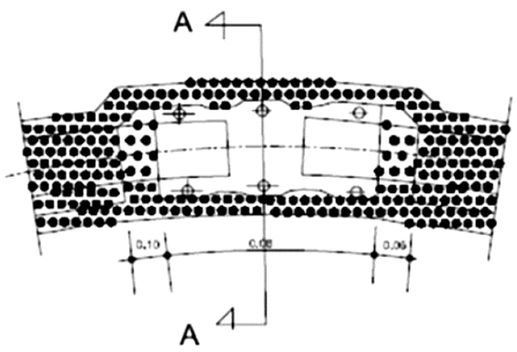
ويجب استخدام ترس قصير الإنكماش على الآلة، لمنع انغلاق الأرض حول ترس رأس القاطع والإيقاف اللاحق لـTBMمن الحمولة على منظومة الترس العالية جدًّا للسماح للآلة بالتقدم.

من العملي تأخير تركيب التدعيم الرئيس حتى حدوث نسبة عالية من التشوه الكلي وانخفاض التحميل الأرضي، لمنع الاضطراب الفوري من ضغط الصخر الطري.

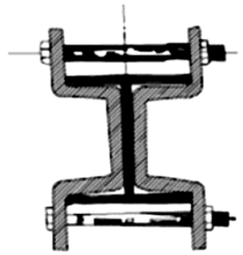
منظومة شق الأنفاق بالـ TBM:

يجب أن يلاحظ مصمم النفق أن مكونات TBM التالية تتأثر بالاختلاف بين شق النفق في الأرض الضاغطة وغير الضاغطة:

1. رأس القاطع ـ عندما يتم اختيار تصميم رأس القاطع على أساس الأرض المراد اختراقها، فإن القواطع المعايرة يجب أن تصمم بحيث يتم تغييرها من الخلف، ويجب تأمين واجهة إضافية أخف حيث تبرز الأقراص القاطعة لمسافة قصيرة فقط. ولكن، في الأرض الضعيفة يجب استخدام ترس واجهة مغلق.
2. الدفع ـ يحدد ضغط التحمل على جدران النفق لمنع انهيار الصخر الضعيف، حتى تحت الأحمال الخفيفة. ويجب الأخذ في الحسبان استخدام المماسك المتعددة التي تغطي معظم المحيط؛ ويجب أن تكون المماسك محدودة الطول لتخفيض التحمل عبر المستوى إلى الحد الأدنى على واجهة الصخر الضاغط.

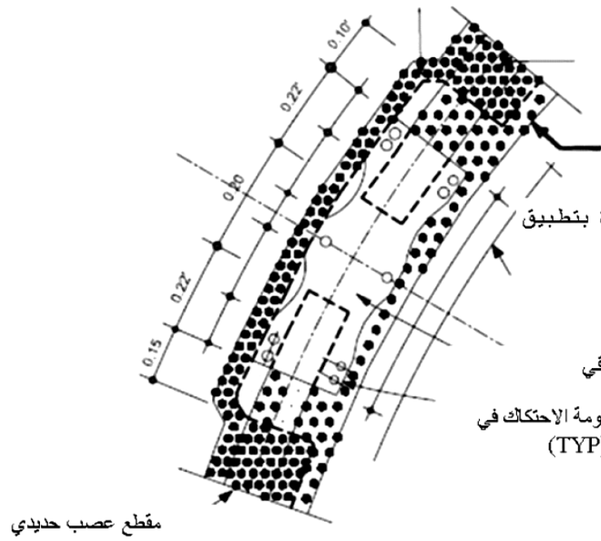


تفاصيل التشقق الابتدائي



المقطع أ (NOTTO SCALE)

طبقة خرسانة مقذوفة أولية



طبقة خرسانة مقذوفة ثانية

طبقة خرسانة مقذوفة نهائية

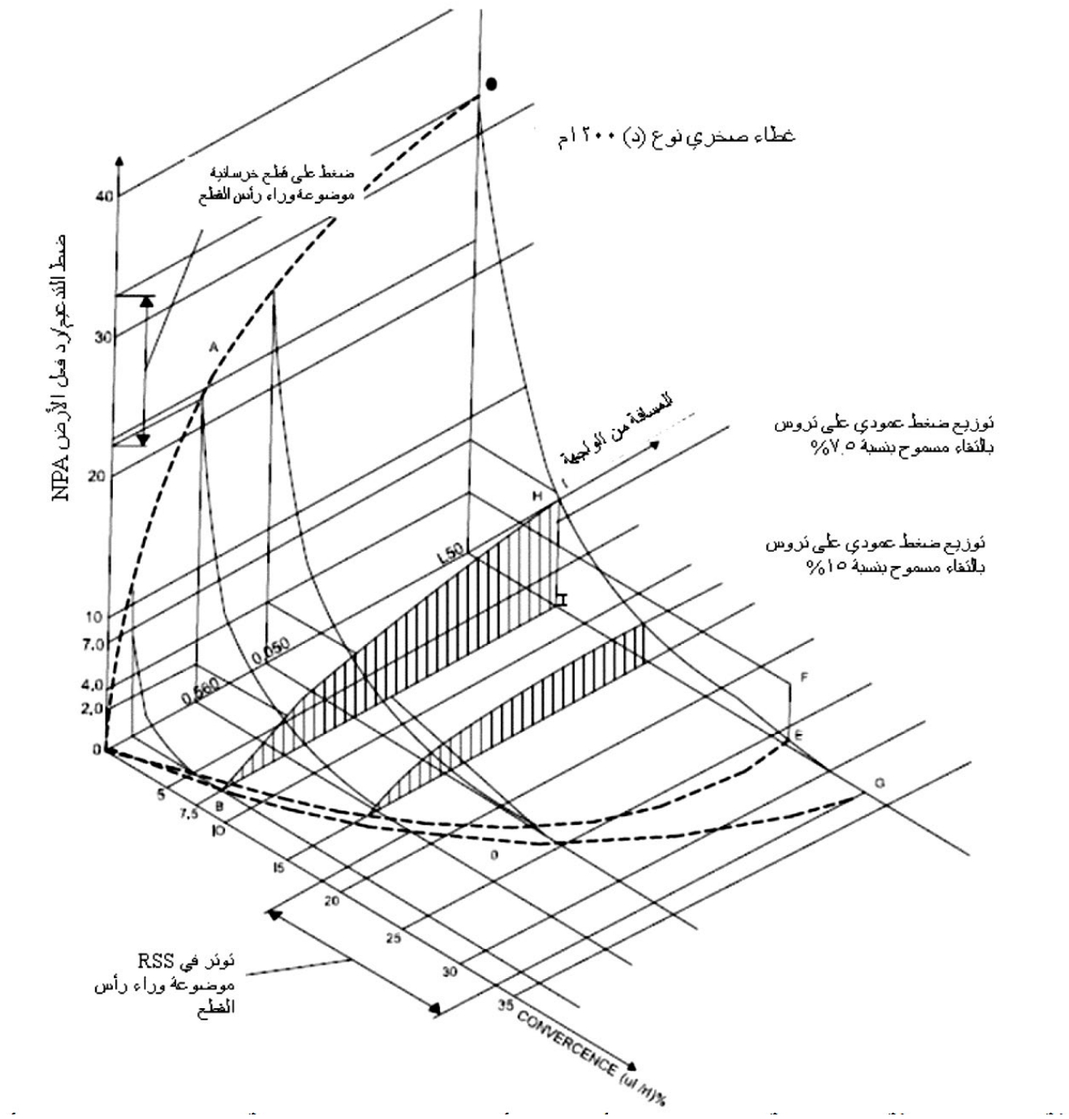
نافذة أولية في طبقة الخرسانة المقذوفة الثانية، معبأة بتطبيق نهائي بعد إغلاق التشقق

تشقق انزلاقي

برغي مشدود لتحريك مقاومة الاحتكاك في التشقق المنزلق (TYP)

مقطع عصب حديدي

الشكل 3 - 45: تفاصيل المجموعات المطواعة (اللينة) عند Yacambu (أخذ عن Bickel et Al., 1996)



الشكل 3 - 46: علاقة/الالتقاء، المسافة خلف واجهة العمل والضغط الأرضي من أجل الصخر الضعيف النوعية بغطاء مقداره 1200 م (أخذ عن Senthivel,94)

- **المشيد:** يجب أن يكون المشيد حرًّا في التحرك على طول النفق، محمولاً على الشبكي الناقل، لتوفير المرونة الكاملة في اختيار النقطة التي سيحدث فيها تشييد الحلقة.
- **إزالة نواتج الحفر:** منظومات ناقلة تقليدية إلى عربات سككية، أو منظومة ناقل وحيد مصمم من أجل قياس النفق المختار، كلها مناسبة.
- **منظومة الدعم:** إن أية تجهيزات إضافية يجب أن تبقى بعيدة عن المنطقة بين المماسك ومنطقة تشييد الحلقة عند منسوب خط السكة الحديدية.

10-3 الممرات الرأسية

1-10-3 عام

يجب أن تأخذ الأنفاق المبنية في المناطق الحضرية في الحسبان استخدام ممرات رأسية للوصول إلى منطقة العمل ولتأمين إزالة الوحل لتخفيض التأثير على الخدمات الموجودة إلى الحد الأدنى.

يتم استخدام الممرات الرأسية المؤقتة من قبل المقاول خلال التنفيذ بينما الممرات الرأسية الدائمة ستصبح جزءًا متحدًا لا يتجزأ من النفق.

2-10-3 حفريات الممرات الرأسية في الأرض الطرية

1-2-10-3 معدل التركيب

يجب أن يعتمد معدل تركيب بطانة الممرات الرأسية الرئيسة على نوع البطانة وطبيعة بيئة التربة؛ وإن التركيب كل 1.2 أو 1,5م من التقدم يكون طبيعيًا، رغم أن الممرات الرأسية تحفر حتى 9م من دون تدعيم.

2-2-10-3 هيئة الممرات الرأسية:

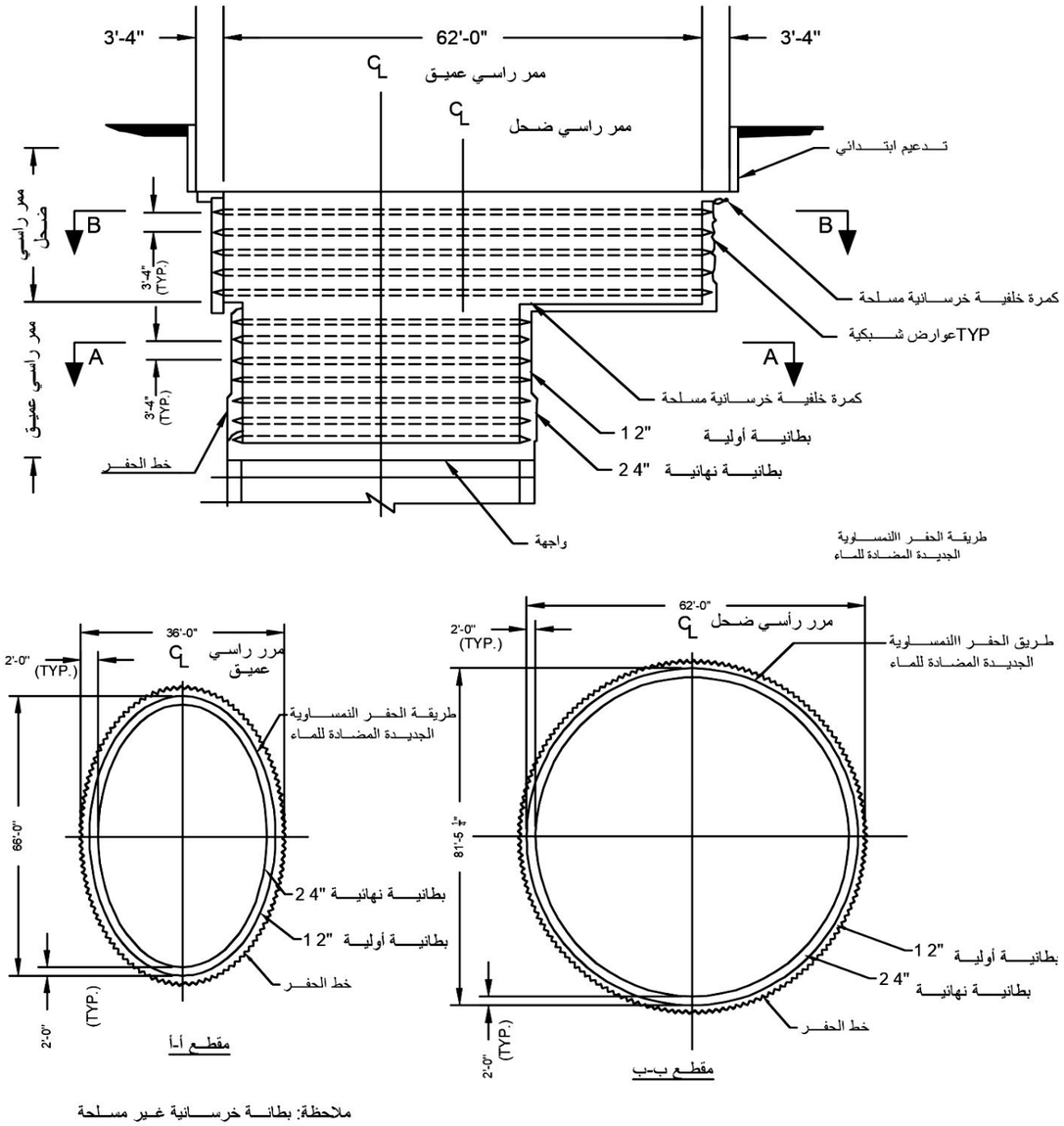
يجب أن تكون الممرات الرأسية الدائمة دائرية، أو بيضاوية (NATM) أو مستطيلة الشكل وعادة تكون ذات بطانة نهائية من الخرسانة، والتي يمكن أن تصب، إما بقوالب على كلا الجانبين أو على الجزء الداخلي فقط، مع منظومة تدعيم أرضي على الجزء الخارجي.

3-2-10-3 منظومة تدعيم الممرات الرأسية:

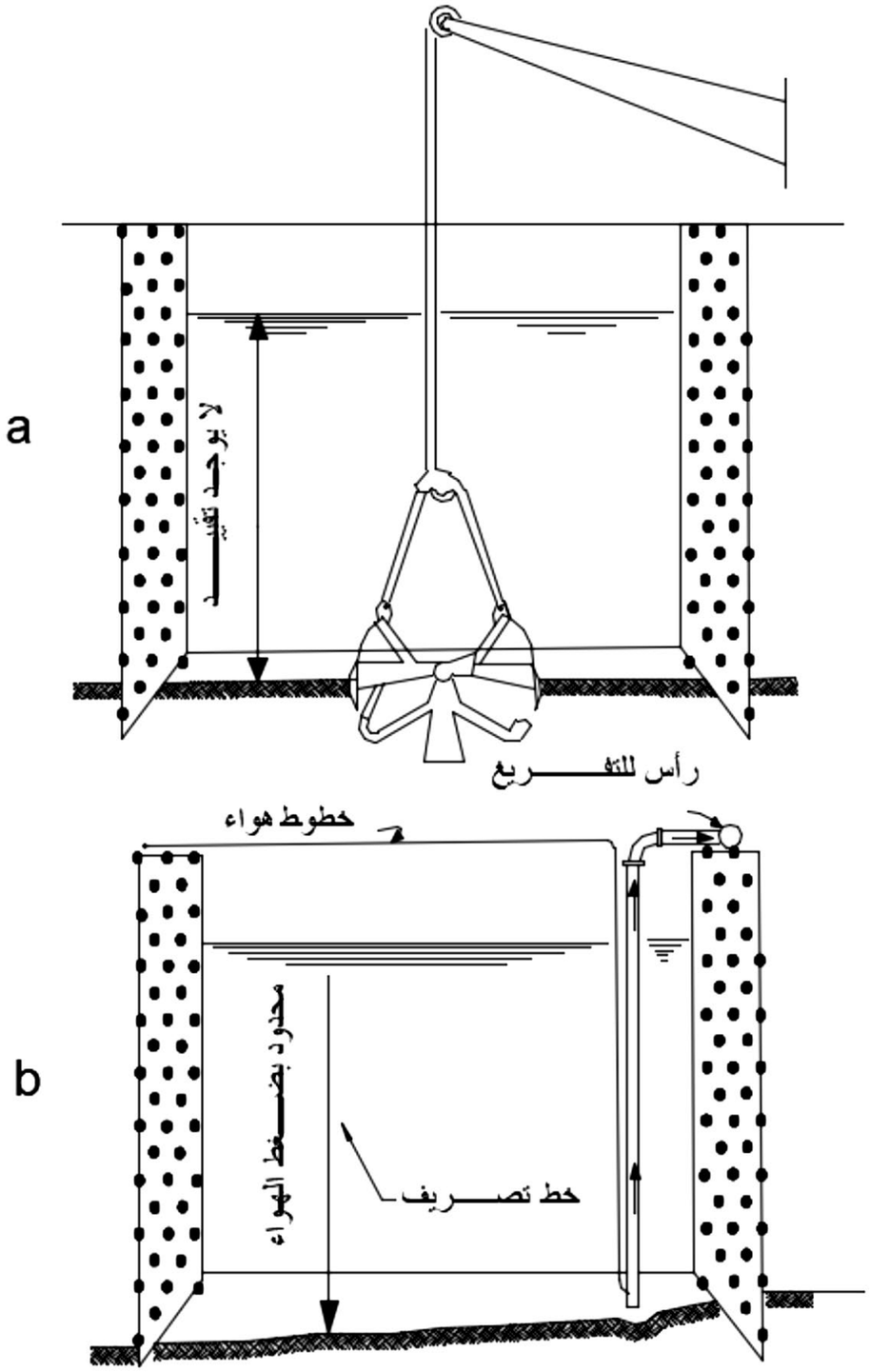
يجب تصميم منظومة تدعيم الممرات الرأسية لتمنع الخضوع اللدن خلال الممر الرأسي في الأرض الطرية، وتضرر المنشآت الموجودة. ويجب أن يفرض اختيار منظومة التغطية والتقوية بخواص التربة، وعمق الممر الرأسي، والأقطار والعوامل الاقتصادية، ويجب أن تتضمن الأخذ في الحسبان: خوازيق الألواح الخشبية، وخوازيق الألواح الحديدية، والخوازيق الخشبية العمودية والألواح الخشبية المثبتة للعقد؛ والصفائح المبطنة، والأعصاب الأفقية والبطانة الرأسية، والجدران من الردغة (الروبة)، ومنظومة تدعيم الممرات الرأسية الخاصة بـNATM (المبينة في الشكل 3ـ 47).

4-2-10-3 الحفر في الأرض الطرية الرطبة:

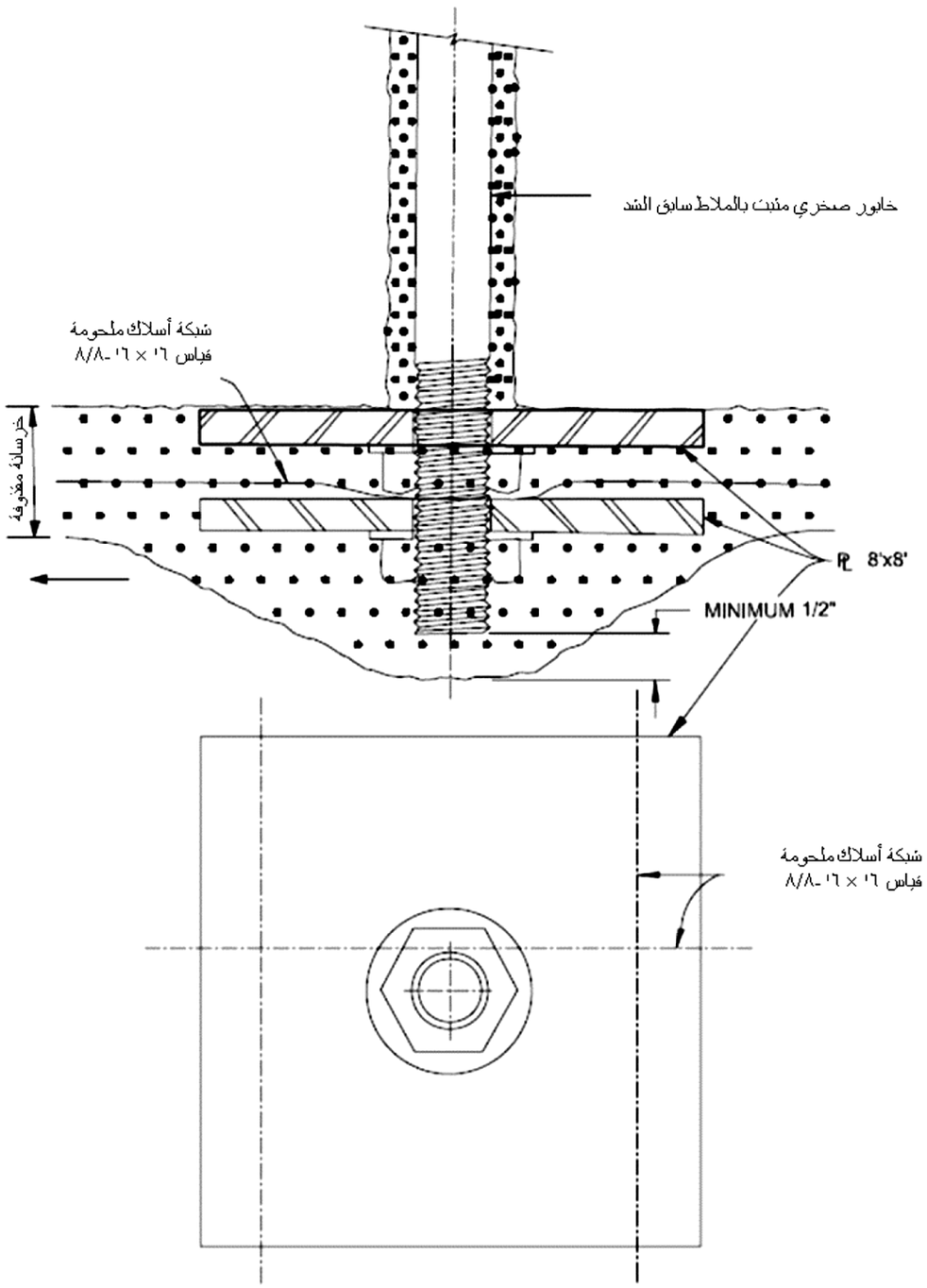
يجب أن يقيم تصميم الممرات الرأسية المحفورة في الأرض الطرية الرطبة: تخفيض مستوى المياه الجوفية؛ والضخ المفتوح، واستخدام منظومة نقطة البئر، أو الآبار العميقة؛ وتجمد التربة، واستخدام الردغة؛ والحقن، وحفر القيسونات (الحجرات) الهوائية، وحفر قيسونات لرفع الأوحال بمانع تسرب خرساني (االشكل 3ـ 48 والشكل 3ـ 49).



الشكل 3ـ 47: الممرات الرأسية لمنظومة الـــ NATM (البطانة الخرسانية النهائية غير مسلحة)



الشكل 3ـ 48: التمثيل التخطيطي لقيسون رفع الوحل، a) الحفر بواسطة الدلو على شكل محارة، b) بواسطة الهواء (الشفط الهوائي).



الشكل 3ـ 49: التركيب النموذجي للخوابير الصخرية، وشبكة الأسلاك، والخرسانة المقذوفة، مترو واشنطن

3-10-3 الممرات المحفورة في الصخر

إن الممرات الرأسية المحفورة بالنسبة للأنفاق التي تكون عادة بعمق أقل من 36.6م، وفي الصخر يجب أن تحفر بواسطة طريقة الثقب ـ و ـ التفجير. ويجب أن يشير المصمم إلى النصوص القياسية الهندسية للتأسيس بالنسبة لتنفيذ الممرات الرأسية في الصخر، والجدران المؤقتة والدائمة خلال الصخر المجوى.

3-10-3-1 التدعيمات المؤقتة

في الصخور الرسوبية، أو المتكسرة أو ممتلئة الجسم، يجب أن يوضع التدعيم الصخري بسرعة بعد الحفر، عند الضرورة. ويجب أن يتضمن تقدير نوع التدعيم الأخذ في الحسبان: الأعصاب الحديدية وصفائح التبطين، أو الأعصاب الفولاذية مع الألواح الخشبية لتثبيت العقد، أو البراغي الصخرية، مع أو من دون شبكة أسلاك، أو خرسانة مقذوفة. وفي العادة، فإن جميع الأنواع المتعددة من التدعيمات الموصوفة سابقًا من أجل تدعيم الممرات الرأسية في الأرض الطرية يمكن أن تستخدم (مع بعض التعديلات) في الممرات الرأسية الصخرية.

4-10-3 التبطين النهائي للمرات الرأسية

يجب أن يحدد نوع التبطين النهائي في الاستخدام الدائم المخطط للمرات الرأسية؛ ولكن، يجب أن تؤخذ في الحسبان البطانة الخرسانية أو بطانة البراغي الصخرية وشبكة الأسلاك أو الخرسانة المقذوفة.

5-10-3 النفق الجديد الرأسي الترسي

إنها منظومة جديدة حيث تثقب الآلة المزودة بترس نحو الأعلى لحفر ممر رأسي من النفق المحفور بالترس ذي التبطين الرئيس.

لقد حققت الطريقة نتائج ناجحة في تخفيض زمن التنفيذ والكف المالية؛ ما أدى إلى تعزيز السلامة في العمل، وتخفيض الخطر البيئي العام من ضجيج التنفيذ والاهتزاز إلى الحد الأدنى،... إلخ.

وقد قدم Konoha & Yamamoto (2002) موجز عن الطريقة كما استخدمت في حفر الممرات الرأسية لمشروع Bandai ـ Hannan Trunk Sewer.

11-3 منشآت الأنفاق بطريقة القطع ـ و ـ التغطية

1-11-3 التصميم الإنشائي للنفق

تصمم منشآت القطع ـ و ـ التغطية طبقًا لإرشادات الجزء الثاني من هذا الدليل: «دليل التصميم الإنشائي للجسور والعبارات» وبالرجوع إلى جميع أجزاء الفصل الثاني عشر من مواصفات التصميم (AASHTO LRFD Bridge Design Specifications) بالإضافة إلى التعديلات والتعليقات التالية.

ملاحظة: تكون حمولة التربة المراد حملها بواسطة بطانة النفق تابعة لنوع التربة. وفي التربة الحبيبية ذات التماسك القليل أو المعدوم، فإن الحمولة تكون تابعة لزاوية الاحتكاك الداخلي للتربة وقطر النفق. وفي التراب المتماسكة كالغضار، فإن الحمولة المراد حملها بواسطة بطانة النفق تعتمد على قوة القص للتربة فوق سقف النفق.

2-11-3 ضغط التربة الأفقي

قد يتضمن ضغط التربة الأفقي، والضغط الجانبي بسبب التربة المحجوزة والماء المحجوز في التربة عندما يكون الماء موجودًا، تأثير الحمولة الإضافية الناتجة عن حمولة أساسات الأبنية المجاورة، وحمولة المرور السطحي، أو أي حمولة مؤقتة سطحية. ويجب أن يتم تقييم كل هذه المكونات في الحالتين الحاضرة والمستقبلية، خصوصًا مستويات المياه الجوفية.

وعندما تؤثر التغيرات المستقبلية بشكل غير مناسب على المنشأة تحت السطحية، فإنها تستلزم قياسات وقائية لتخفيف التأثيرات غير الملائمة التي ربما لم تؤخذ في الحسبان، وقد تكون مكلفة بشكل زائد لتضاف للمنشأ الموجود.

يجب أن تؤخذ في الحسبان التغيرات قصيرة الأمد وطويلة الأمد في ضغط التربة الأفقي، ويجب تصميم أنفاق القطع ـ و ـ التغطية لكلتا الحمولتين قصيرة الأمد وطويلة الأمد. وبشكل مباشر عقب التنفيذ، فإن ضغط التربة الفعلي قصير الأمد قد يكون أقل بكثير إلى حد بعيد من الضغط التصميمي طويل الأمد.

ولتأمين عامل أمان كفء ضد الحوادث المؤسفة المستقبلية الناتجة عن منشأ مجاور، فإن الأنفاق يجب أن تناسب التأرجح (الاهتزاز) الجانبي، إذا كان المنشأ مؤلف من طابق واحد، ويجب أن يؤخذ في الحسبان التأرجح الجانبي في الطابق العلوي فقط، في حالة طابقين أو أكثر.

ويجب تطبيق اشتراطات الفقرة 10ـ 4ـ 1 من مواصفات التصميم (AASHTO LRFD Bridge Design Specifications). وعندما لا يتم استخدام طرق دقيقة لتحليل التربة، فإن ضغط التربة يمكن أن يؤخذ كما يلي:

$$W_E = C_{dt}\, g\, \gamma_s S \times 10^{-9} \quad (3_1)$$

حيث:

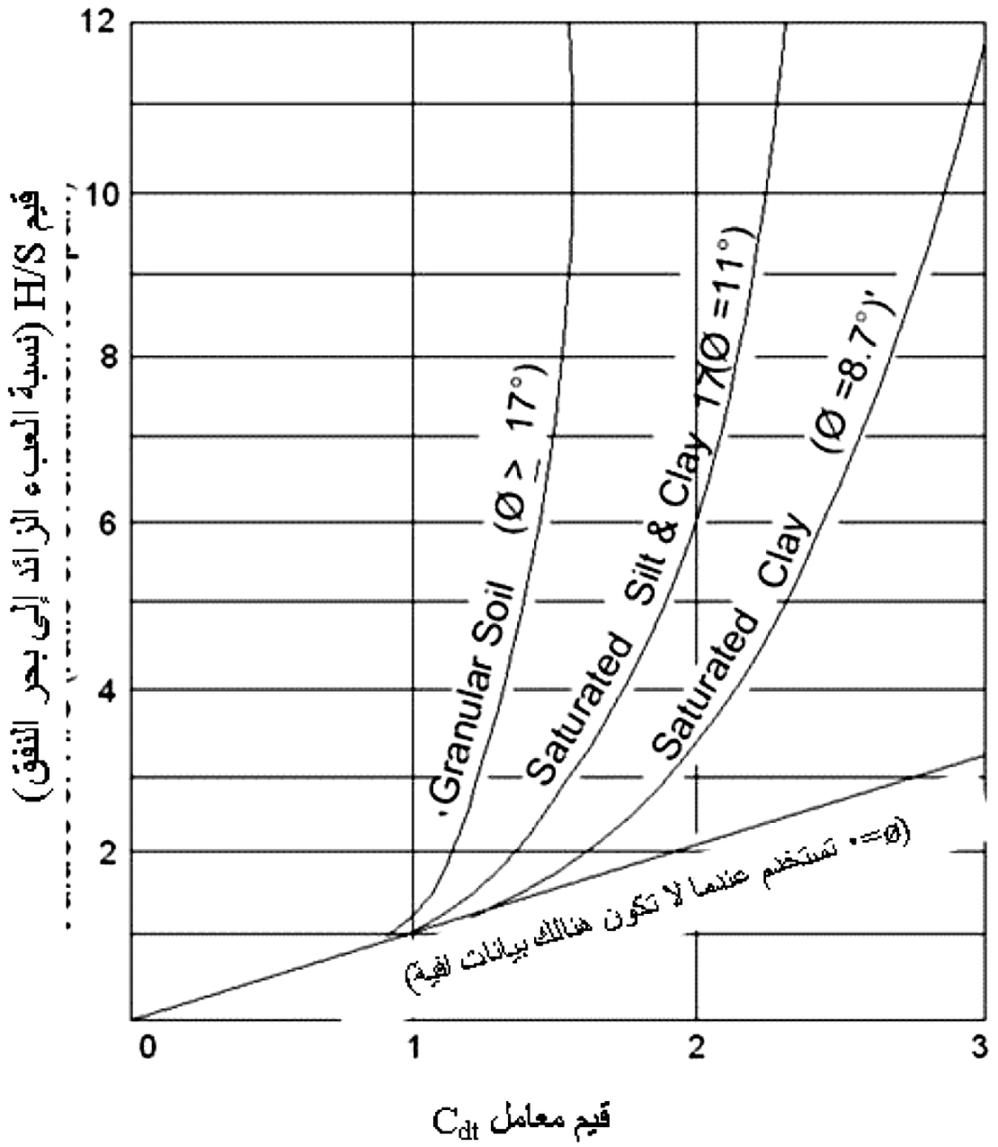
g = تسارع الجاذبية الأرضية (م/ث2)

C_{dt} = معامل التربة لتركيب النفق المحدد في الشكل 3ـ 50

γ_s = الكثافة الكلية للتربة (كغ/م3)

W_E = ضغط التربة عند قمة القوس (ميغاباسكال)

S = قطر النفق أو بحر النفق (ملم)



الشكل 3 - 50: مخطط المعامل Cdt من أجل نفق في التربة

حيث:

H = ارتفاع التربة فوق أعلى النفق (ملم)

ملاحظة: المعادلة (3_1) هي شكل لصيغة مورستون. وهي تنسجم مع مقدار ضغط الغطاء الترابي الكلي المؤثر في النفق بناءً على زاوية الاحتكاك الداخلي للتربة المراد شق النفق فيها.

ملاحظة: في غياب المعلومات الكافية واختبارات التربة، تستخدم $\phi_f = 0$ عند حساب W_E

3-11-3 قابلية الطفو في الماء

عندما يقع مستوى المياه الجوفية فوق أسفل البلاطة المقلوبة أو بلاطة القاعدة للمنشأة تحت السطحية، فإن الضغط الصاعد على أسفل بلاطة القاعدة، يساوي الضاغط البيزومتري عند ذلك المنسوب، الذي يجب أن يؤخذ في الحسبان. وعندما تتجاوز B (قوة الطفو المؤثرة على المنشأ) DL min (الحد الأدنى للوزن المعول عليه للمنشأ زائد الردم فوق المنشأ)، فإنه يجب إشراك أشكال مقاومة أخرى في التصميم، تتضمن ما يلي:

- يمكن زيادة وزن المنشأة عن طريق زيادة سماكة الجدران، السقف أو بلاطة القاعدة؛ ويمكن أيضًا زيادة عرض بلاطة القاعدة لزيادة وزن مقاومة التربة.
- ويجب توفير خوازيق شد مصممة لتأمين قوة شد على بلاطة القاعدة؛ ويمكن استخدام خوازيق حديدية وخرسانية مسبقة الصنع في هذا التطبيق.
- يجب توفير مراسي ربط سفلية، تشبه مراسي الربط الخلفية الدائمة؛ ويتم إنجاز الثقب الخاص بالمراسي في توقيت ملائم إلى حد ما بعد صب بلاطة القاعدة. وتوضع رؤوس المراسي في فجوات مشكلة في بلاطة القاعدة. وبعد اكتمال تركيب الربط، تملأ الفجوات بالخرسانة. ويعتمد نوع المراسي المستخدم في جزء منه على ما إذا كانت المراسي يمكن أن توجد في الصخر الصلد تحت المنشأ، أو في التربة المؤهلة.

4-11-3 الفيضان

عند احتمال حدوث الفيضانات النهرية، أو سيول تستطيع إضافة أحمال إلى المنشآت تحت السطحية، فإن تصميم المنشآت يجب أن يسمح بهذه الحمولة، حسب الحاجة عن طريق نوع المنشأ الخاص والحالات المؤثرة على كل موقع.

5-11-3 الانكماش والقوى الحرارية

يجب أن تؤخذ قوى الانكماش والقوى الحرارية بين الفواصل العرضية في الحسبان عن طريق التسليح الطولي في الجدران، والسقف، والبلاطة المقلوبة، ويجب ألا تدخل الإجهادات المتولدة بهذه القوى في التحليل الإطاري للمنشأ (لأنها بشكل نموذجي عمودية على الإجهادات الرئيسة التي تسببها).

6-11-3 حالات التحميل

يجب أن تعتمد حالات التحميل المستقلة المراد تحليلها على نوع المنشأة، وموقعها، ونوع الأرض التي تتواجد فيها المنشأة، وموقع مستوى المياه الجوفية، والعوامل المحلية الأخرى.

ويجب تحري جميع حالات التحميل المعقولة القابلة للحدوث المؤقتة والدائمة والتي ستؤثر في تصميم المنشأة.

7-11-3 التحليل الإطاري

يتم تطبيق الأحمال والضغوط الممثلة لكل حالة تحميل، ويتم تحديد قوى القص، والضغط وعزوم الانحناء لكل عنصر من الإطار من خلال التحليل الإطاري الصلب باستخدام منهجية واسعة القبول (عادة توجد في برامج حاسوبية للتحليل الإنشائي).

ما عدا الفتحات العريضة المقلوبة خصوصًا، فإنه يجب افتراض أن ردود الأفعال الرأسية تكون موزعة بانتظام فوق أسفل البلاطة المقلوبة، المؤدية بشكل محافظ إلى عزوم الانحناء الأعلى في البلاطة.

يجب ملاحظة أنه في التحليل الإطاري، يكون عزم التشقق للقصور الذاتي (Ie) بشكل نموذجي أقل بكثير من إجمالي عزم القصور الذاتي (Ig). وإذا لم تكن الانفعالات محل اهتمام، فإنه يجب استخدام إجمالي القيم لـ EI نظرًا لأن ردود الأفعال الداخلية النسبية (القوى والعزوم) فقط تكون مرغوبة.

3-11-8 تصميم الخرسانة المسلحة

يتم الرجوع إلى جميع أجزاء الفصل الخامس بمواصفات التصميم (AASHTO LRFD Bridge Design Specifications) بالإضافة إلى التعديلات والإضافات التالية.

عندما تكون القوى الزلزالية مؤثرة فيجب تصميم المنشأ على درجة مطلوبة من الطواعية والمتانة أيضًا. ولإدخال هذه الاشتراطات في التصميم الخرساني المسلح، فإنه يجب الرجوع إلى الأدبيات الرسمية وثيقة الصلة بموضوع التصميم الزلزالي.

ويعد الحد الأدنى من المتطلبات لتسليح الانكماش والحرارة، كما هو محدد في الفصل الخامس من مواصفات التصميم (AASHTO LRFD Bridge Design Specifications)، غير قابل للتطبيق بالنسبة للأنفاق الطرقية بطريقة القطع - و - التغطية.

وبالنسبة لتصميم جدران وبلاطات سقف النفق الطرقي، مع فواصل عرضية على أجزاء كل نحو 25م، فإنه من الشائع تأمين تسليح حرارة وانكماش، على كلا وجهي الجدار أو البلاطة، بمقدار 80 إلى 100% من الفقرة 5. 10. 6. من مواصفات التصميم (AASHTO LRFD Bridge Design Specifications).

3-11-9 منظومات التدعيم

لمنع الهبوط الضار للأرض، والمرافق، والمنشآت المجاورة، فإنه يتم وضع جدران مؤقتة أو جدران داعمة قبل البدء بالحفر بطريقة القطع - و - التغطية بشكل كبير.

ويجب أن يأخذ تصميم منظومة التدعيم في الحسبان عوامل تتضمن ما يلي:

- الخواص الفيزيائية للتربة عبر القطع (الحفر) وتحته.
- موقع مستوى المياه الجوفية خلال التنفيذ.
- عرض الحفرية وعمقها.
- هيئة المنشأة تحت سطح الأرض المراد تنفيذها ضمن القطع.
- قياس، وتصميم الأساسات والقرب من المنشآت المجاورة.
- عدد، وقياس، ونوع المرافق القاطعة للحفرية المقترحة، أو المجاورة للحفرية.
- متطلبات تغطية الشارع العابر للحفرية.
- معدات المرور والتنفيذ الإضافية المجاورة للحفرية.
- قيود الضجيج في المناطق الحضرية.

يجب الرجوع إلى الأدبيات الرسمية الوثيقة الصلة بموضوع جدران التدعيم بالنسبة لأنواع الجدران والتدعيم الجداري، والتصميم، والفعالية لمنظومات التدعيم.

3-11-10 التغطية

تتألف التغطية من هيكل الجسم العلوي وتغطية الطرق.

يجب تصميم هيكل الجسم العلوي بحسب معايير التحميل الموضحة في الفقرة (2. 3) من الجزء الثاني من هذا الدليل: "دليل التصميم الإنشائي للجسور والعبارات"، أو على الحمولة بحسب معدات التنفيذ التي ستؤثر في السطح، أيهما أكبر.

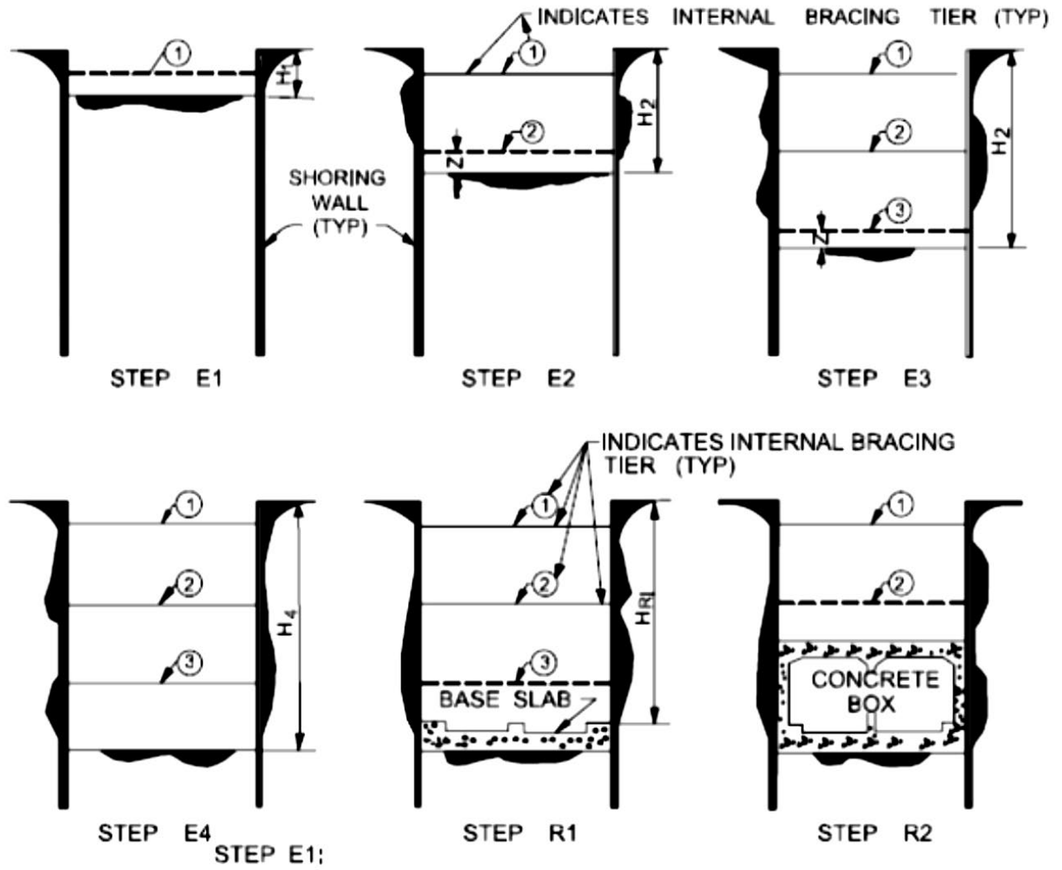
وتكون الإجهادات المسموحة في هيكل السطح مقتصرة على إجهادات الوحدة الأساسية. وبالنسبة لكمرات السطح، فإن الحد الأعلى للترخيم الناشئ عن الحمولة المؤقتة التشغيلية والأثر الديناميكي المساوي لـ 1/600 من الفتحة (البحر/المجاز) يكون مسموحًا عادة.

وعندما تكون الأحمال المؤقتة هي معدات التنفيذ والسطح لا يحمل مرورًا عامًا، فإنه يمكن زيادة قيمة الترخيم المسموح بها بسبب الحمولة المؤقتة التشغيلية والأثر الديناميكي إلى 1/500 من فتحة (بحر) كمرات السطح، ويمكن زيادة الإجهاد المسموح على أعصاب الكمرات العلوية بمقدار 20%.

3-11-11 السيطرة على الحفرية والمياه الجوفي

3-11-11-1 الحفريات المقواة داخليًّا

يبين الشكل 3. 54 التعاقب العام للتنفيذ المستخدم نموذجيًا خلال تنفيذ منشأة نفق بطريقة القطع - و - التغطية. والقطعتان اللتان يشيع استخدامهما من معدات حفر القطوع المقواة هما الجرافة (الشيول) والجرافة (المغرافة أي البكيت). ويتم أيضًا استخدام الناقلات ذات السيور القابلة للمد الرأسية أو المائلة، كمثال، لرفع المواد المحفورة من الحفرة ووضعها في صندوق شاحنة التحميل.



GENRAL CONSTRUCTION SEQUENCE

STEP E1: EXCAVATE TO DEPTH H_1 AND INSTALL TIER NO 1.
STEP E2: EXCAVATE TO DEPTH H_2 AND INSTALL TIER NO 2.
STEP E3: EXCAVATE TO DEPTH H_3 AND INSTALL TIER NO 3.
STEP E4: EXCAVATE TO DEPTH H_4 (FINAL SUBGRADE).

STEP R1: (a) PLACE CONCRETE BASE SLAB.
(b) AFTER BASE SLAB HAS AGED ADEQUATELY ,REMOVE TIER NO.3.

STEP R2: (a) COMPLETE CONSTRUCTION OF CONCRETE BOX
(b) AFTER ROOF SLAB HAS AGED ADEQUATELY ,REMOVE TIER NO.2.

STEP R3: (NOT SHOWN.) BACKFILL TO DEPTH H ± AND (SUBSEQUENTLY)REMOVE TIER NO.1 COMPLETE BACKFILL. IF SHORING WALL IS SOLDIER PILES AND LAGGING OR STEEL SHEET PILES,REMOVE (PULL)SOLDIER PILES OR SHEET PILES IF PERMITTED TO DO SO, COMPLETE SURFACE RESTORATION.

الشكل 3 - 54:التعاقب العام للتنفيذ المستخدم بشكل نموذجي لمنشآت الأنفاق بطريقة القطع – و – التغطية (بعد Bickel et al. 1996)

3-11-11-2 الحفريات المربوطة من الخلف

يجب أن تؤخذ في الحسبان أي طريقة حفر ستحد من المسافة الرأسية بين الصف المربوط من الخلف وأسفل الحفرية إلى المقدار المفروض، وذلك في أي خطوة من خطوات تعاقب التنفيذ.

إذا كانت حفرية القطع ـ و ـ التغطية طويلة بشكل كافٍ، ولم تكن المرافق أو التغطية العابرة للحفرية تشكل مشكلة، وكانت التربة المراد حفرها جافة ومؤهلة بشكل كافٍ لتعمل كطريق نقل بالعربات، فإن طريقة الحفر الأكثر ملاءمة التي تستعمل انحدارًا ناقلًا خارج منطقة القطع ستكون عادة هي الأكثر فاعلية. وعند نهاية الحفرية، حيث يجب إزالة الانحدار الناقل، فإن الطرق الأكثر شيوعًا ستكون ضرورية لتستعمل في إكمال الحفرية.

3-11-11-3 السيطرة على المياه الجوفية

عندما يكون من الملائم عمل ذلك، فإن تخفيض مستوى المياه الجوفية تحت المنسوب المخطط للطبقة التحتية المحفورة قبل البدء بالحفر سيكون أكثر اقتصادية. في التربة المسامية المشبعة، يقدم التصريف المسبق المزايا التالية:

- إمكانية إنجاز الحفرية في الحالة الجافة.
- يؤدي إلى منظومة تدعيم أكثر فعالية بسبب تخفيض الضغط الجانبي.
- يسمح باستخدام منظومات أوتاد التدعيم الخشبية العمودية والألواح الخشبية المثبتة للعقد،... إلخ.
- يمنع حدوث عدم استقرار أسفل الحفرية.

تفاصيل عن: التصريف المسبق بالآبار العميقة، واستخدام آبار تخفيف الضغط؛ والاستقرار مقابل ظاهرة تمديد الأنابيب؛ والتحكم الداخلي بالماء؛ والهبوط بسبب نزع الماء للتنفيذ، وتم معالجتها في الأدبيات الرسمية المتعلقة بموضوع السيطرة على المياه الجوفية لحفريات طريقة القطع ـ و ـ التغطية.

3-11-12 جدران السند والتدعيم الدائمين

تستخدم في بعض الأحيان جدران الردغة (الطينة) وأوتاد التدعيم الخشبية العمودية والجدران الخرسانية كجدران تدعيم مؤقتة لتنفيذ طريقة القطع ـ و ـ التغطية، وكجدران دائمة لمنشأة النفق.

وبالنسبة لهذه الفكرة، فإنه يجب وضع جدار ساتر خرساني مسلح داخل جدار السند، لأسباب جمالية، ويجب التأكد من الترابط الكامل بين جدار الردغة أو الـ SPTC والجدار الساتر الداخلي.

ويمكن أيضًا تصميم طبقًات قوية داخلية لتشكل تدعيمًا داخليًا خلال التنفيذ وتكون كتدعيم دائم، وتعمل صفوف التقوية الداخلية الدائمة بشكل نموذجي أيضًا كقالب فولاذي إنشائي للأرضية (الأرضيات) الوسطية بشكل جيد.

3-11-13 الكتامة ضد الماء

ستكون المنشآت المتواجدة في الترب المسامية وتحت مستوى الماء خاضعة للتسرب، الذي يتجه للتمركز عند فواصل الإنشاء والتقلص.

وفي العادة يكون التسرب غير مقبول، حيث أنه سيؤدي إلى تعرق بشع للجدران وتشطيبات السقوف. ويجب أن يصمم المصمم بحيث يهتم بالكتامة الكاملة ضد تسرب الماء.

ويكـون العـزل المـائي الخارجـي الكامـل نموذجيًـا للأسـقف، وهـو أمـر معتـاد بالنسـبة للجـدران. ويتـم في بعـض الأحيـان تحديـد العـزل المـائي الخارجـي للبلاطـات المقلوبـة، اعتمـادًا عـلى ثخانـة البلاطـة، والتربـة تحـت السـطحية، وعوامـل أخـرى.

ويمكـن الرجـوع إلى مناقشـة: موقفـات المـاء؛ والأنـواع الشـائعة للعـزل المـائي الخارجـي، والإصـلاح الداخـلي للتسريبـات، في الأدبيـات الرسـمية حـول موضـوع الكتامـة ضـد المـاء.

12-3 الأمان أو السلامة

يجـب أن يكـون لـدى مهنـدسي تصميـم وتخطيـط طـرق الأنفـاق فهمًـا مناسـبًا عـن الكيفيـة التـي سـيتم بهـا تشـغيل النفـق، والتأكـد مـن وجـود اشـتراطات كافيـة وآمنـة للصيانـة، والإدارة الاقتصاديـة والوقايـة التشـغيلية. ويجـب أن يكـون كل مـن هـذه الاشـتراطات مسـتوفيًا، حيـث إن كل الخيـارات المتعلقـة بسياسـة تشـغيل النفـق، مثـل مـرور البضائـع أو السـلع الخطـرة، وتخطيـط النفـق، مثـل مواقـع مراكـز التحكـم بالمـرور وتجهيـزات التحكـم والمراقبـة عـن بعـد في المواقـع، قـد أخـذت في الحسـبان مقدمًـا بشـكل جيـد، حتـى يكـون هنـاك مجـال صغـير أو معـدوم لتعديـل فيزيـائي (مـادي) لا حـق (مثـال تغيـير ممـرات التهويـة، مداخـل الطـوارئ، إلـخ).

ويكون لمظاهر التشغيل والسلامة تأثير كبير على إعداد التصميم التفصيلي.

1-12-3 الحوادث والطوارئ

هنـاك حالتـان واسـعتا النطـاق تؤثـران في تخطيـط الطـوارئ. الحـدث الأكـثر شـيوعًا هـو حـادث أو تعطـل مركبـة، والـذي يسـبب قـدرًا مـن انسـداد حـارة مروريـة، وتقييـدًا لاحقًـا أو حتـى انعدامًـا مؤقتًـا لاسـتخدام النفـق. ويمكـن للتأخـيرات الناتجـة أن تمتـد سريعًـا إلى شـبكة الطـرق المحيطـة. وعندئـذ يتـم اللجـوء إلى تصريـف علاجـي عاجـل لاسـتعادة التدفـق الحـر وتخفيـض حـالات الإزدحـام التـي بنفسـها يمكـن أن تفاقـم خطـورة التعطـل أو الحـوادث إلى أبعـد حـد. وتنطـوي الحالـة الثانيـة عـلى التصـادم وإمكانيـة حـدوث حريـق أو انفجـار ربمـا يكـون أكـثر خطـورة عـلى مسـتخدمي النفـق، ويتطلـب اسـتجابة فوريـة مـن خدمـات الطـوارئ.

2-12-3 تحليل وإدارة المخاطر

بالنسـبة لنفـق معـين، فإنـه يجـب تحديـد المخاطـر المحتملـة وربطهـا بتخطيـط النفـق ومعايـير التجهيـز، والاتصـالات، والمعلومـات المروريـة وأنظمـة التحكـم. ويجـب أن تحقـق معايـير الاشـتراطات هـذه احتياجـات المشـغلين مـن حيـث الإدارة اليوميـة للنفـق، وخدمـات الطـوارئ مـن حيـث اسـتجابتها لحـوادث النفـق، التـي تشـمل الحرائـق. ويجـب توجيـه اهتمـام خـاص بالمظاهـر التـي تؤثـر في تصرفـات السـائقين مثـل اللوحـات المروريـة، والإشـارات الضوئيـة، وحركـة السـير في النفـق وعـلى مداخـل النفـق.

إن المقطـع العـرضي المختـار للنفـق يجـب أن يكـون مرتبطًـا بعنايـة معايـير مدخـل الطريـق، والتصميـم الهنـدسي والرؤيـة الواضحـة وإجـراءات التعامـل مـع الحـوادث. وتشـير البيانـات المحـدودة المتاحـة إلى أن طريـق الاقـتراب مـن النفـق، ومناطـق الدخـول والخـروج تكـون بمسـتوى خطـورة أعـلى مـن الطريـق المفتـوح. وعـلى العكـس مـن ذلـك، فـإن دخـل النفـق يكـون ذا مسـتوى خطـورة أخفـض مـن ناحيـة الحـوادث المروريـة. ولتحقيـق درجـة أعـلى مـن السـلامة، فـإن عـروض الحـواف أعـلى وفـوق الحـد الأدنى مـن متطلبـات الطريـق للتدفـق المـروري، يجـب أن تكـون متعلقـة بمقتضيـات وسرعـة الحركـة المروريـة.

يجـب توجيـه كامـل الاهتـمام للوصـلات العرضيـة بـين تجاويـف النفـق أو الوسـائل البديلـة لهـروب راكبـي السـيارات ولعبـور المركبـات، خـارج بوابـات النفـق، لغايـات التدفـق العكـسي ووصـول خدمـات الطـوارئ.

إن الحرائـق أو انسـكاب المـواد الخطـرة ذات عواقـب أكـبر في الأنفـاق منهـا عـلى الطريـق المفتـوح، ويجـب أن تكـون الوقايـة المناسـبة مبنيـة عـلى تقييـم دلالات مخاطـر المـرور للمركبـات التـي تحمـل حمـولات خطـرة (مثـل المتفجـرات، والمـواد القابلـة للاشـتعال، والمـواد المشـتعلة، والسـموم). ويجـب الأخـذ في الحسـبان الكامـل للقـرارات التـي اتخـذت فيـما يتعلـق بتصميـم المنشـأ، والتجهيـز الأسـاسي ومعايـير التشـغيل (والتـي تتضمـن حمايـة مناسـبة مـن الحرائـق) وطاقـة التهويـة مـن حيـث قـدرة التحكـم بالحرائـق والدخـان، وأحـواض تصريـف منجمـة بشـكل وفـير للتعامـل مـع انسـكابات المـواد الخطـرة، وكذلـك توفـر أي فتحـات لتصريـف للميـاه، والرغـوات، إلـخ. ويجـب أيضًـا الاهتـمام بمثـل وسـائل الوقايـة هـذه، كالحمايـة مـن الحرائـق، والتهويـة، والتصريـف، مـن حيـث ارتباطهـا بخطـوط الأنابيـب الحاملـة للغـاز او المـواد الكيميائيـة العائـدة لمسـتخدمي طـرف ثالـث.

ويجـب توجيـه الاهتـمام لوسـائل إدارة المـرور تحـت ظـروف انقطـاع الكهربـاء. ويجـب أن يُتوقـع إغـلاق النفـق أمـام الحركـة المروريـة إذا انقطـع كل مـن مصـدري الطاقـة العـادي والاحتياطـي، اللذيـن يـزودان الإنـارة وإشـارات الرسـائل المتغـيرة بالطاقـة. وإذا مـا تـم اسـتخدام الطاقـة الاحتياطيـة عنـد مسـتوى أخفـض مـن الطاقـة الطبيعيـة، فعندهـا يجـب أن يعمـل التحكـم بالسرعـة أيضًـا لتخفيـض سرعـة المـرور، حيـث يتـم تخفيـض خطـورة الحـوادث الحاصلـة إلى الحـد الأدنى.

ويجـب تقديـر إمكانيـة وجـود سـلامة مصـدر الطاقـة، ومـا لم يكـن بالإمـكان ضـمان الفاعليـة الكاملـة مـن قبـل مـرور الطاقـة، في جميـع الظـروف عـدا الاسـتثنائية جـدًا منهـا، فإنـه يجـب تأمـين مصـدر بديـل للخدمـات المتصلـة بالسـلامة الأساسـية.

ويجـب تحديـد سـيناريوهات المخاطـر المحتملـة التـي يمكـن أن تحـدث في وعـلى طـرق الاقـتراب إلى النفـق. ويجـب دراسـة هـذه السـيناريوهات بالتفصيـل مـع الجهـات المناسـبة، ووضـع الحلـول الهندسـية مـن قبـل الهيئـة المصممـة عنـد تعيينهـا للقيـام بذلـك، لجميـع مناطـق النفـق ذات الصلـة وطـرق اقترابـه. وإن المنهجيـة الممكنـة للتعامـل بشـكل منظـم مـع الأخطـار مبينـة في الجـدول رقـم 3 ـ 10إلى الجـدول رقـم 3 ـ 13 وتشـمل سـيناريوهات المخاطـر، عـلى سـبيل المثـال لا الحـصر:

الحوادث المرتبطة بالمركبات:

- حريق في النفق.
- حوادث.
- أعطال.
- أنقاض على الطريق.
- مركبات ذات ارتفاع زائد.

الحوادث غير المتصلة بالمركبات:

- انقطاع الإنارة.
- انقطاع التهوية.
- انقطاع الضخ.
- تعطل الهواتف.
- مشاة في النفق.
- حيوانات في النفق.
- التخريب المتعمد.
- هجوم إرهابي.

أرتال مرورية:

- أرتال مرورية نتيجة أسباب أخرى مثل حجم المرور.

أحمال المركبات:

- أحمال خطرة.
- أحمال متحركة.
- أحمال عريضة.
- أحمال استثنائية غير قابلة للتقسيم.

أخطار مرتبطة بالطقس:

- ضباب.
- تكاثف بخار هوائي سريع على زجاج النوافذ الأمامية، المرايا إلخ.
- رياح عاتية.
- جليد.
- ثلج.
- فيضان.
- لمعان مبهر من الشمس (بشكل خاص مسارات الأنفاق من الشرق إلى الغرب).

(يمكن اعتبار أن الثلج، والضباب، والرياح العاتية لا تتعلق بالأنفاق. لكن، قد يصادف السائقون هذه العوامل عندما يخرجون من النفق وقد يحتاجون للانتباه، أو قد تحتاج شرطة الطرق لاعتبار تصرفات أخرى مناسبة).

الصيانة المخططة:

- إغلاق المسارب.
- إغلاق الطريق.
- إغلاق تجويف النفق.
- إغلاق كلي.
- عملية تدفق متقابل.
- إشارات مؤقتة.

الجدول رقم 3 - 10: احتمالية الحدث

الوصف	السيناريو	الأرجحية	النتيجة
محتمل جدًّا	حدوث متكرر جدًّا	فوق 85%	16
محتمل	أكثر من زوج من الفرص	51ـ 85%	12
محتمل إلى حد ما	يحدث غالبًا	21ـ 50%	8
غير محتمل	يمكن أن يحدث لكن ليس غالبًا جدًّا	1ـ 20%	4
غير محتمل إلى حد بعيد	الحدوث غير متوقع أن يحدث	أقل من 1ـ 0.01%	2
غير محتمل إلى أبعد حد	ممكن بصعوبة لكنه مفاجئ جدًّا	أقل من 0.01%	1

ملاحظة: يمكن استيفاء القيم الوسطية خطيًّا.

الجدول رقم 3 - 11: تأثير الحدث

الوصف	أمثلة عن السيناريوهات	النتيجة
كوارث	تشغيل النفق لا يمكن أن يستمر	1000
خطير	تهديد خطير على تشغيل النفق	100
جوهري	ازدياد تكاليف/صعوبات التشغيل بشكل جوهري	20
هامشي	تأثير صغير على كلفة/صعوبة التشغيل	3
لا يذكر	تأثير بسيط	1

ملاحظة: يمكن إيجاد القيم المتوسطة بالاستنتاج

الجدول رقم 3 - 12: أرقام أولوية الخطورة (احتمالية الحدثx تأثير الحدث)

رقم أولوية الخطورة (RPN)	التصنيف	التصرف المطلوب
أعلى من 1000	غير مسموح	إزالة الخطر
101ـ 1000	غير مرغوب فيه	تجنب أو نقل الخطر
21ـ 100	مقبول	إبقاء الخطر وإدارته بالوقاية من أو التخفيف من وطأته
أقل من 20	لايذكر	يمكن تجاهله

ملاحظة: يجب تصنيف سيناريوهات الخطر المحددة في الترتيب العكسي لـ RPN.

الجدول رقم 3 - 13: استراتيجيات الاستجابة للخطر

التصرف المطلوب للخطر	الاستجابة الممكنة
إزالة	تغيير الاشتراطات حيث لا يمكن حدوث الخطر
اجتناب	تعديل الاشتراطات حيث يتم تقليل الخطر بشكل كبير
نقل	غير مرجح القدرة على القيام بذلك من أجل مظاهر السلامة
وقاية	يؤخذ التصرف لمنع الخطر من الحدوث

ملاحظة: يمكن جدولة وتسجيل استراتيجيات الاستجابة للخطر.

يجب تقدير الاستراتيجيات التي تم تحديدها والمحددة للسيناريوهات من أجل التعامل مع هذه السيناريوهات آخذين في الحسبان متطلبات الإدارة، والتنسيق، والتشغيل، والحشد، والوصول، والإجراءات والاتصالات لمختلف الأطراف المشتركة واحتياجات مستخدمي الطريق. ومن الضروري توجيه الاهتمام إلى مستوى الموارد البشرية المطلوبة خلال حادث ما، عند مركز التحكيم وعلى الأرض. ويجب أن تتعامل استراتيجيات الاستجابة مع الحدوث الأولي للحالة وأي تطورات ناتجة أيضًا، ومثال ذلك، قد يقود التعطل في النفق إلى طابور محلي أولي يمكن أن يتطور إلى إزدحام واختناق مروري في منطقة بمقياس أوسع.

3-12-3 التصنيف والقرارات الخاصة بمرافق السلامة

إن المعايير والنفقات المتصلة بتجهيز أنفاق الطرق يجب أن تكون متصلة على أكبر قدر بالاحتياجات الخاصة للمواقع المستقلة. ومن ثم فإن أسس تجهيز وتشغيل الأنفاق تستخدم نظام تصنيف لأنواع الأنفاق على الطرق السريعة والفئات الثانوية للطرق المستخدمة لكافة الأغراض.

من القرارات الإستراتيجية واعتبارات سيناريوهات لحوادث، فإنه يصبح من الواضح أي نوع من التجهيزات والمنظومات سيكون ضروريًا، وأي تفاعل بين المنظومات يجب أن يكون أيضًا واضحًا. ويجب أن يكون بالإمكان أيضًا تحديد المستويات الضرورية من تدفق المعلومات بين الأطراف المشاركة، والتي سوف تحدد الارتباطات التقنية ووسائل الاتصال المطلوبة.

وبعد أن يتم تحديد التجهيزات والمنظومات المشاركة، فإنه يمكن تنفيذ التصنيف التقني. ويمكن أيضًا تحديد وتوصيف البنية التحتية للاتصالات الضرورية ما إن يتم فهم احتياجات التجهيزات والمنظومات.

4-12-3 إدارة الحركة المرورية

تساهم سياسات الطرق ومعايير التصميم الحالية بتخفيض الحوادث، وحسب طريق التوجيه، وبخاصة الحركة المرورية للبضائع الثقيلة، فإنها تساهم في تحسين إدارة الحركة المرورية المحلية والتحكم بالمخططات الجديدة للطرق السريعة. ويجب المحافظة على هذه الأهداف عند اختيار المعايير التي يبنى عليها تصميم وتشغيل نفق الطريق. ويجب أن تعتني إدارة الحركة المرورية بالتدفق المروري الطبيعي والتنقلات الخاصة، والصيانة المنظمة والطارئة والحالات الطارئة.

5-12-3 القيود على استخدام الأنفاق

لأسباب خاصة بالسلامة، فإن القيود ضرورية بحسب نوع الحركة المرورية المسموح لها استخدام نفق الطريق. يجب عدم السماح بالمشاة، والدراجات الهوائية، والدراجات النارية ذات المحركات الأقل من 50سم3، والحيوانات والمركبات التي تجرها حيوانات، والمركبات الخاضعة لتحكم المشاة، والعربات غير الصالحة للخدمة. وتمنع هذه الأصناف من مستخدمي الطرق حاليًا استخدام الطرق السريعة، وما لم تكن هناك ظروف استثنائية جدًّا، فغنهم يجب أن يمنعوا أيضًا عن جسم الأنفاق الطرقية. ويجب توجيه الاهتمام نحو توفير طرق بديلة، حيثما تقتضي الضرورة.

6-12-3 حدود السرعة

إن فرض ولاسيما تطبيق حدود السرعة داخل أنفاق الطرق على الطرق السريعة المفتوحة يتطلب اهتمامًا خاصًا. وإن تكاليف تنفيذ وتشغيل نفق مصمم ليوافق المعايير الهندسية للطريق السريعة المجاورة قد تقود إلى ضغوط لاتخاذ سرعة تصميمية أخفض هامشيًّا ضمن النفق.

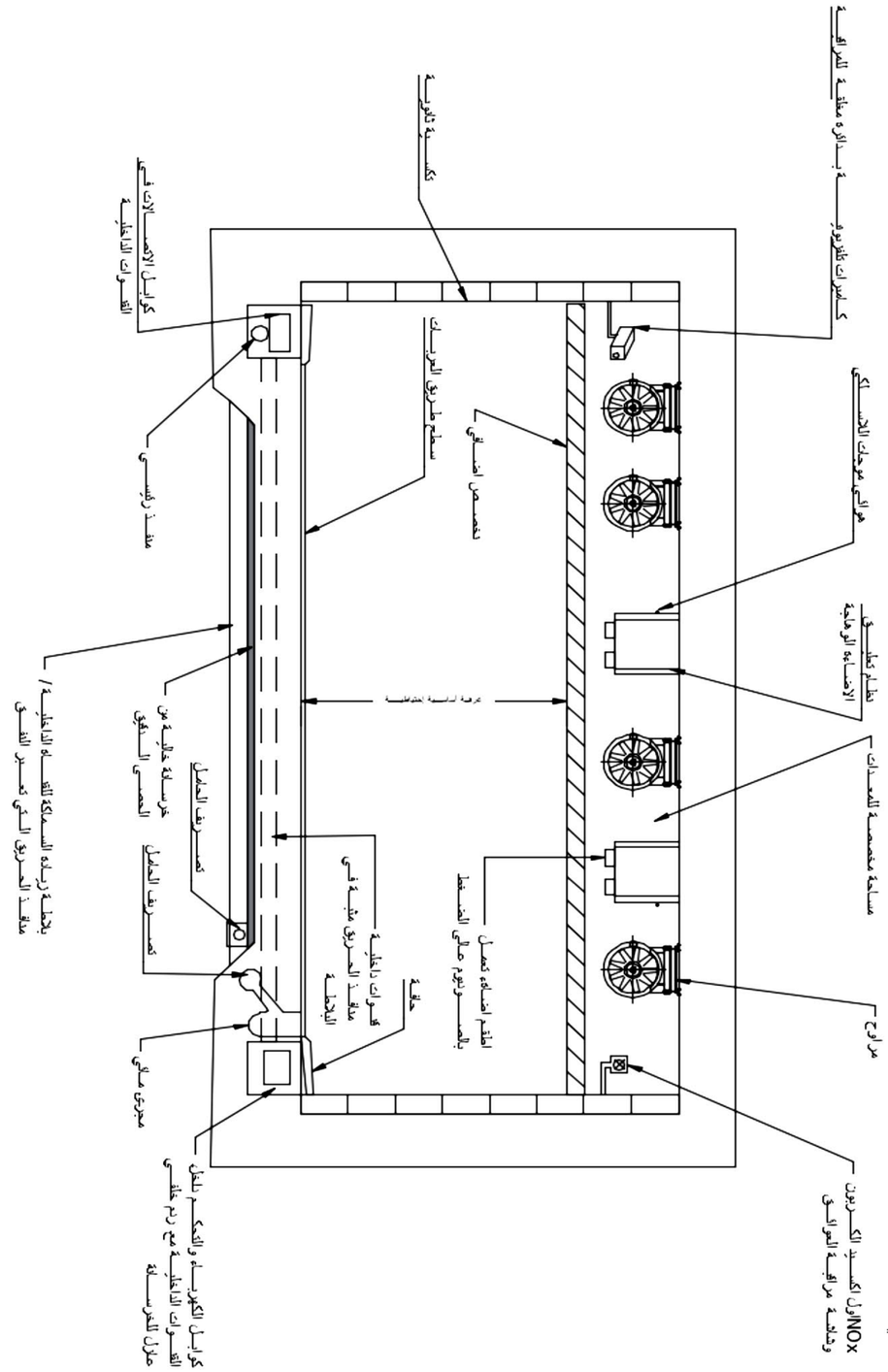
وهناك أدلة قليلة لدعم الافتراضات التي تقول بأن الحركة المرورية تميل بشكل طبيعي لتخفيض السرعة عند الدخول في النفق وزيادة السرعة في الداخل فقط، إذا سمحت الظروف بذلك. وإن أيًا من هذه الافتراضات سيحتاج للإثبات بواسطة المراقبة عندما يكون النفق مفتوحًا للمرور ـ وقد يكون من ثم متأخرًا جدًّا القيام بالتعديلات اللازمة إذا ثبت فشل مثل هذه الافتراضات.

7-12-3 تأسيس المقطع الطولي للنفق

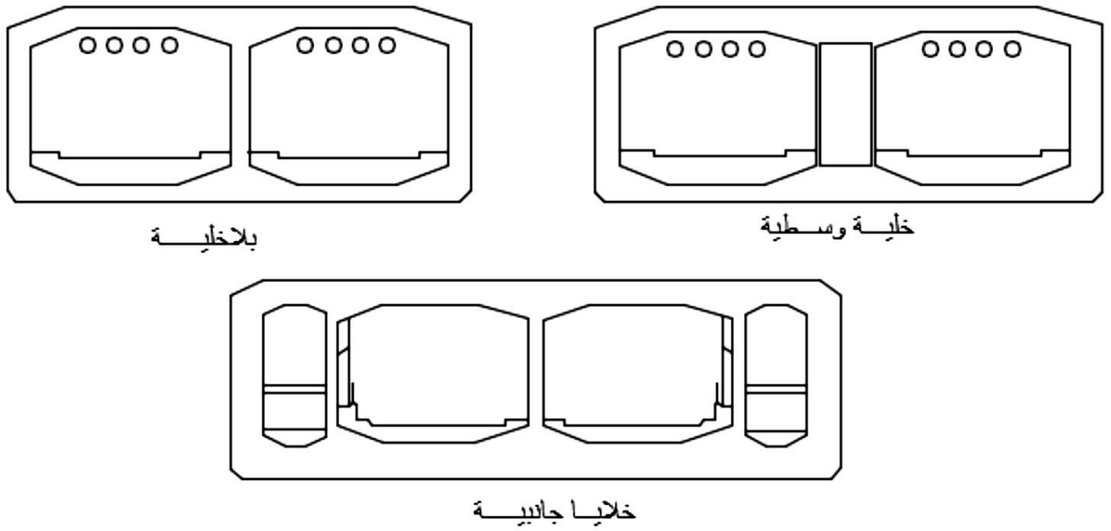
من المهم بالنسبة لتقديم معلومات دقيقة حول تقدم التصميم الخاص بجوانب أخرى من تصميم نفق الطريق، أن يتم تحديد الموقع، والمقطع العرضي والمقاطع الطولية لميول النفق بشكل مبكر قدر الإمكان في عملية التخطيط.

انظر الشكل 3ـ 55، والشكل 3ـ 56، والشكل 3ـ 57، والشكل 3ـ 58 للاطلاع على المقاطع الطولية والعرضية النموذجية. وإن المقطع الأكثر جاذبية من أجل استيعاب الحركة المرورية للطرق المتضمنة لمركبات البضائع الثقيلة هو الشكل المستطيل.

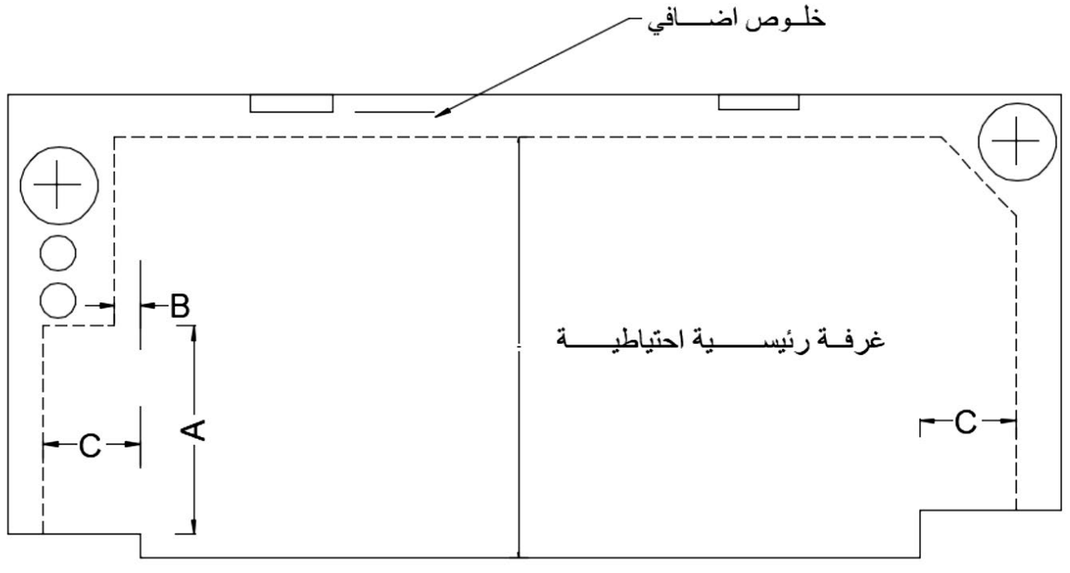
وفي مواقف معينة فإن قيود التخطيط قد تحدد بشكل جيد موقع النفق والاختيار اللاحق لطريقة التنفيذ. وإن ظروف الأرض والاختيار المناسب لطريقة تنفيذ النفق هي عوامل مهمة تحدد الشكل الإنشائي للنفق الطرقي. وإن شكل المقطع العرضي للنفق بالنسبة لحيز مروري معين، والحيز اللاحق المتاح لتجهيزات النفق، يحدد بشكل كبير بواسطة الطريقة الأكثر اقتصادية للتنفيذ، والتي بدورها تعتمد على طريقة التنفيذ، وعمق النفق، وطبيعة الأرض واستقراراها خلال الحفر.



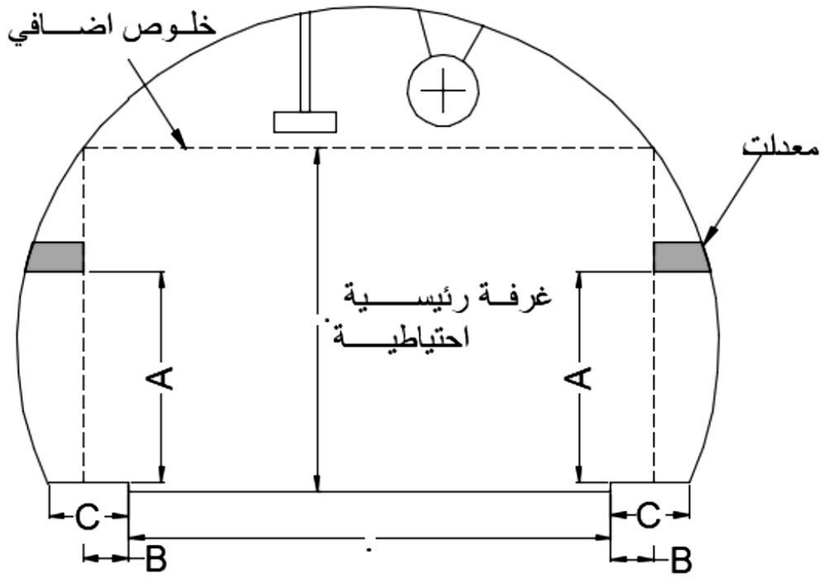
الشكل 3 - 55: مقطع نموذجي لحفر وتغطية النفق



الشكل 3 - 56: مقاطع عرضية نموذجية للأنفاق المثقوبة



الشكل 3ـ 57: مثال المقطع المستطيل



الشكل 3 - 58: مثال لمقطع قوسي

الجدول رقم 3 - 14 : الحد الأدنى للقياسات (الشكل 3ـ 58 و الشكل 3ـ 59)

الوحدة	التفصيل	القياس
A	علو الممشى	mm 2300
B	عرض الحافة مع الارتفاع الكامل	mm 600
C	عرض الحافة	mm 1120

3-12-8 اعتبارات التوسيع المستقبلي وحارات الصيانة المرورية

إنه من غير الممكن طبيعيًا توسيع نفق طرقي للاهتمام بالزيادة المستقبلية في عدد الحارات المرورية المطلوبة. ومن الممكن زيادة عدد الحارات المرورية حارة واحدة، إذا كانت الحارات المرورية الموجودة ضيقة، أو تم استبدال الكتف، إن وجد. ويجب توجيه الاهتمام نحو تخفيض احتمال الزيادة في الخطر على الحوادث المرورية إلى حدها الأدنى، وتخفيض مداخل ومخارج الطوارئ، وتأمين أي تهوية إضافية ومتطلبات الحجرة الرأسية والذي ستطلبه مثل هذه التوسعة. وبالمثل، إذا كان من المتوقع أن تكون فترات إغلاق النفق من أجل الصيانة متاحة بشكل محدود، فإنه يمكن إقرار نفق أوسع بقليل بحيث يمكن استيعاب متطلبات السلامة. ومن الضروري دراسة تدفق الدورة المرورية المتوقعة، وحالات انحسار المرور، والتغيرات على مدار الساعة المطلوبة. والخيار المحتمل الذي يستلزم الاهتمام هو فيما إذا كان، على سبيل المثال، ثلاثة ثقوب أنفاق بحارتين مروريتين أفضل من ثقبين نفقيين بثلاث حارات مرورية. ويتمتع النوع الأول بإيجابيات، ولاسيما بالنسبة للتدفقات المرورية المتقطعة، إمكانية إغلاق ثقب (فتحة) واحدة في فترات الهدوء من أجل صيانة أكثر فاعلية، ومرونة في إدارة الحركة المرورية وأثر ازدحام مروري منخفض في حال وجود حادث في أحد الثقوب النفقية. وإن الحكمة الفعالة وتوفير مثل هذه الاحتياجات ستقلل التكاليف الإضافية والإرباكات إلى حدها الأدنى.

3-12-9 أنفاق الخدمات، ومتطلبات الفراغ

عندما يسمح توفر الأرض والتمويل، وعندما تجعل ضوابط الصيانة المنظمة من المرغوب القيام بذلك، فإنه يجب الأخذ في الحسبان إنشاء نفق خدمة منفصل، مجاور للأنفاق المرورية المؤقتة، على أساس الكلفة الكلية لعمر النفق، من أجل تأمين الوصول لتأدية متطلبات الصيانة الكابلات الخدمة ومعدات التشغيل الأخرى، دون الحاجة إلى إغلاق النفق. ويمكن استخدام مثل هذه الأنفاق أيضًا لغايات الإجلاء خلال الطوارئ. وهنالك منافع أخرى تتضمن استخدامها كنفق استكشافي (استطلاعي) قبل تقدم عملية تنفيذ النفق الرئيس.

3-12-10 مقاطع الأنفاق المدفوعة (المسافة)

إن مقاطع الأنفاق المدفوعة في الصخر والتي يمكن أن تخفر باستخدام الثقب والتفجير كمثال أو تقنيات مقصات القطع، تعتمد بشكل رئيس على الشكل المطلوب لتحقيق استقرار الحفرية خلال مراحلها المؤقتة. وتكون الأنفاق الصخرية الأخرى التي تستخدم آلات ذات الواجة كاملة عادة ذات مقاطع عرضية دائرية. وإن المقاطع العرضية الدائرية لا تكون مناسبة تمامًا للشكل المستطيل للأنفاق الطرقية. وتدفع الأنفاق المتوضعة في، أو جزئيًا في، أرض طرية غالبًا بواسطة ترس، وتكون دائرية أو جزء من دائرة. وإن الأنفاق المدفوعة باستخدام آلات ذات واجهات كاملة تكون عادة ذات مقاطع عرضية دائرية، في حين أن آلات شق الأنفاق ذات الواجهة الجزئية تكون أقل تقييدًا من ناحية الشكل.

11-12-3 مقاطع الأنفاق المحفورة والمسقوفة

تكون مقاطع الأنفاق المحفورة والمسقوفة عادة مستطيلة بخلوص رأس قريب من قياس المنشأ.

12-12-3 مقاطع الأنفاق الأنبوبية المغمورة

تكون الأنفاق الأنبوبية المغمورة عادة مستطيلة في مقطعها وتنفذ بالخرسانة المسلحة أو المسبقة الإجهاد. وقد تكون هذه الأنفاق مزودة بخلايا منفصلة لتستخدم كأجسام طافية خلال الصب ومن ثم كخدمات للنفق. وفي المنشأ المركب الخرساني/الفولاذي، تكون مثل هذه الأنفاق أحيانًا دائرية أو دائرية بشكل جزئي من ناحية الشكل.

13-12-3 الفراغ الخاص بالمعدات

إن الفراغ بين حجرة المعدات والمقطع المتشكل بواسطة البطانة الإنشائية أو التكسية الثانوية للنفق يكون متاحًا المعدات المطلوبة لبيئة النفق. ويجب استخدام مثل هذا الفراغ بشكل فعال ليناسب التجهيزات المطلوبة، وإلا فإن أي إضافة في المقطع العرضي للنفق ستؤدي إلى زيادة كبيرة في الكلفة. وفي الأنفاق المستطيلة، يمكن أن تكون الزوايا العلوية كفيلة لتلائم الفاعلية الإنشائية، لكنها يمكن أن تسبب عدم منفعة فيما يتعلق بالفراغ والموضع الأمثل للتجهيزات.

ويجب توخي الحذر في تحديد المواقع الأمثل للتجهيزات الكهربائية والميكانيكية المتموضعة في النفق، لأن سهولة الوصول قد تكون ذات تأثير كبير على التكاليف المستمرة للصيانة، وعدد الحارات المرورية المطلوب إغلاقها.

14-12-3 متطلبات فراغ التهوية

قد يكون للتهوية تأثيرًا معتبرًا على متطلبات الفراغ، اعتمادًا على المنظومة المختارة. ومن المهم جدًا أن تكون الأنفاق فعالة من حيث حركة الهواء قدر الإمكان. والأنفاق المهواة طبيعيًا أو ميكانيكيًا، ذات الاتجاه الواحد مروريًا، تعتمد جزئيًا لتحقيق التهوية على تدفق الهواء الناجم عن حركة المركبات. ويمكن زيادة هذا التأثير إلى حده الأعلى، بالنسبة لحجم معين للنفق، إذا كان السطح الداخلي للنفق صقيلاً قدر الإمكان، وإذا كان قد تم تجنب التغيرات المفاجئة في المقطع العرضي على طول النفق؛ خصوصًا عند نقاط دخول/خروج الهواء.

وفي حال وقوع حريق داخل النفق، فإن الهواء الساخن والدخان سيشكلان طبقة عند مستوى السقف، متحركة عن المصدر إلى الخارج، وتاركة منطقة من الهواء النقي تحتها لمسافة من كل جانب من المصدر. ويجب تجنب الأفاريز النازلة من السقف والعوائق الأخرى التي يمكن أن تقطع هذه الطبقة وتملأ النفق بالدخان قبل الأوان، وتحول دون الهروب والإنقاذ، وقد تكون لمنظومات التهوية أقنية وممرات رأسية ومداخل تصل غرف المراوح بالأقنية الرئيسة في النفق. ويجب أن تكون هذه الممرات والمداخل صقيلة قدر الإمكان، وأن تكون أية انحناءات أو وصلات فعالة أيروديناميكيًا قدر الإمكان.

وإن متطلبات الفراغ الخاصة بالتهوية الطولية، عند استخدام مراوح (نفاثة) معززة، عادة تكون ذات تأثير صغير على الشكل الهندسي للأنفاق ذات الأسقف القوسية. ويجب أن توضع المراوح فوق الحارات المرورية للمركبات ضمن مساحة التجهيزات، أفضل من وضعها الحواف. وفي حالة الأنفاق المستطيلة، فإن أحد الحلول هو زيادة ارتفاع النفق

فوق طولها الكلي أو الجزئي لتلائم المراوح. وإذا كانت هنالك عوائق أو زيادة في تكاليف التنفيذ تمنع هذا الحل، فإن المراوح يمكن أن توضع في أماكن منعزلة مشكلة (فجوات) في السطح الأسفل من السقف أو في أعالي الجدران الجانبية. لكن قد تنخفض فعالية التهوية كثيرًا فيما بعد.

وعادة ما تكون متطلبات الفراغ بالنسبة لمنظومات التهوية العرضية أو شبه العرضية ذات تأثير صغير على الشكل الهندسي للنفق القوسي أو الدائري، لأن هذه الأنفاق عادة تحتوي فراغًا فوق أو تحت سطح الطريق، والذي يمكن استخدامه من أجل أقنية التهوية. ولكن، عندما تكون هنالك حاجة لأحجام كبيرة من الهواء للتهوية، فقد تكون هناك حاجة لزيادة حجم المنشأ. وفي حالة المقاطع المستطيلة، فإن مثل هذه المنظومات تكون ذات تأثير كبير على الشكل الهندسي للنفق، وفي بعض الأحيان تتطلب ارتفاعًا أكبر للنفق، وفي بعض الأحيان تتطلب عرضًا زائدًا. وفي كل أنواع الأنفاق، فإن منظومات التهوية هذه تتطلب ممرات رأسية إضافية أو أنفاقًا وأبنية لمراوح التهوية. وقد تكون الأبنية ومنشآتها الخاصة بالامتصاص والعوادم والإنبعاثات ذات عواقب بيئية كبيرة. وإن لم تكن مثالية، قد تؤثر بشكل مهم في متطلبات فراغ التهوية داخل النفق.

15-12-3 متطلبات الفراغ للإنارة

بشكل عام يكون لإنارة النفق تأثير بسيط على الشكل الهندسي للنفق. ففي المقاطع ذات الأسقف القوسية، غير المزودة بأسقف مستعارة أو أسطح لقنوات تهوية، يكون هناك فراغ كاف يتسع لأجهزة الإنارة. وإن الأنفاق القوسية ذات الأسقف المستعارة والأنفاق ذات المقاطع المستطيلة، حيث توجد أجهزة الإنارة فوق المسارب المرورية، هي فقط التي تتطلب فراغًا رأسيًا بين 350ملم و500ملم لملاءمة الخلوص الإضافي المساوي لـ 250ملم وأجهزة الإنارة نفسها.

16-12-3 متطلبات الفراغ للوحات المرورية والإشارات الضوئية

تكون تجهيزات الإشارات الضوئية، إذا وضعت على الجدران الجانبية، ذات تأثير بسيط في المقطع العرضي للأنفاق القوسية، ذات الحارتين المروريتين، أو الأنفاق المستطيلة.

وبالنسبة للأنفاق التي تحوي أكثر من حارتين مروريتين، والمزودة بسقف مستعار أو مقطع مستطيل، وحيث تثبت تجهيزات الإشارات الضوئية فوق الحارات المرورية، فإنه يلزم فراغ رأسي قدره نحو 350ملم. ومن الصعب وضع اللوحات المرورية الإرشادية بحجمها الكامل داخل النفق، إذ من الأفضل وضعها خارج المداخل.

17-12-3 متطلبات الفراغ لكبائن تحصيل الرسوم

عندما يراد تحصيل الرسوم نقدًا، فإن تزويد كبائن تحصيل الرسوم سيكون ضروريًا. وإن عدد ووضع هذه الكبائن محكومان بتأثيرهما في التدفق المروري في النفق وعلى توفر الأرض، والذي سيتغير من موقع لآخر. ويمكن أن توضع كبائن تحصيل الرسوم عند إحدى أو كلتا نهايتي النفق، أو سلسلة الأنفاق. ويتم التحصيل والتحكم بمجموعة من الطرق اليدوية، أو عبر تلقي العملة النقدية من المركبات المتحركة، أو عبر البطاقات الإلكترونية مسبقة الدفع. وتتطلب الكبائن التدفئة، والتهوية، وخزانة نقود، ومقعد، وإشارة، واتصال ومرافق أمنية وحماية من الصدم بالمركبات والسرقة. كما قد تتطلب تكييفًا بالهواء.

3-12-18 متطلبات الفراغ ووظيفة التكسية الثانوية

عندما يراد تأمين تكسية ثانوية فإنها عادة تتكون من طبقة إضافية من أوزان إنشائية خفيفة، توضع فوق الوجه الداخلي للبطانة الرئيسة (ارتكاز الحمل الرئيس). وإن الوظائف الرئيسة للتكسية الثانوية هي تأمين سطح عاكس للمساعدة في إنارة النفق؛ وصقل داخلية النفق لتسهيل التنظيف الميكانيكي لجدران النفق؛ وتخفيض فواقد طاقة التهوية، وعزل التقاطر وتسريب المياه إلى المصارف في حالة الرشح عبر البطانة الرئيسة للنفق. وقد تؤمن أيضًا تأثيرًا مفيدًا على مستويات الضجيج داخل النفق، عند إضافة طبقًات عازلة للضجيج. وعندما يتم استخدام التكسية الثانوية لحشو الفراغ الدائم في النفق، فإنها تكون ذات تأثير ضئيل على المقطع العرضي. ويجب تصميم الجزء الأسفل من جدار النفق لتخفيض خطر اصطدام حركة المرور بالتكسية الثانوية.

يجب أن تكون الإنهاءات الداخلية لمنشأة النفق، المرئية من قبل عامة المسافرين، جذابة وعملية دون أن تصرف الأنظار عن القيادة الآمنة.

3-12-19 متطلبات الفراغ لخدمات الأقنية والكابلات

يجب تحديد فراغ الأقنية المطلوب لتوزيع وحماية الكابلات من الحرائق من أجل وظائف المراقبة والتقييم للنفق والخدمات المستقبلية المحتملة عند مرحلة مبكرة بسبب التأثير الإنشائي الهام الذي يشترط مثل هذا الفراغ الذي يمكن القيام به على أنواع محددة من الأنفاق. وعندما تستخدم التكسية الثانوية، فإنه من الممكن استخدام الفراغ بين التكسية والمنشأة الرئيسة للخدمات، ويجب أن يصمم ذلك ضمن الفكرة الأصلية.

وفي الأنفاق الطويلة، فإن إعادة تقدير الكابلات والضغط الساقط في الخدمات المقدمة عبر الأنابيب يمكن أن تؤدي إلى زيادة حجم هذه الخدمات،والحاجة لقنوات أكبر لاحتوائها. وفي الأنفاق الدائرية، يكون فراغ الأقنية عادة متاحًا تحت جسم الطريق بحكم شكل النفق. وفي الأنفاق ذات الشكل السفلي المستوى، من ناحية أخرى، يكون من المطلوب عادة زيادة العمق لوضع الكابلات أو أعمال الأنابيب تحت منطقة أرصفة المشاة. ويجب تجنب وضع الفتحات الأرضية الرئيسة وأغطية الأقنية الأخرى ضمن الحارات المرورية، لأن الوصول المخطط لصيانة، استبدال الأغطية المرتخية إلخ... يمكن أن يكون متاحًا فقط خلال إغلاق النفق.

3-12-20 المرافق

إن تنفيذ النفق الطرقي غالبًا ما يقدم فرصًا للجهات المالكة للمرافق وشركات الاتصالات لتوخي استخدام النفق لحمل خطوط أنابيب الخدمة الإضافية، وأجهزة الإرسال، والكابلات لمنفعة مثل هذه الشركات وعملائها. ويترك للمؤسسة المشرفة التشاور مع هيئة تشغيل النفق المعنية لتقرير أي من، إذا وجدت، خطوط الأنابيب الإضافية والكابلات هذه يمكن استيعابها. وتتضمن النقاط التي تؤخذ في الحسبان التأثير في سلامة النفق، والتشغيل والصيانة؛ والوصول للإصلاحات المؤثرة؛ والمسؤولية عن اختصار الخدمات أو تضررها؛ والحريق أو الانفجار الناجمين عن تسريب الغاز كمثال؛ والتآكل والحرار من الكابلات العالية الجهد؛ والفاقد في طاقة التهوية من السحب الإضافي الناتج عن خطوط الأنابيب ذات الأقطار الأكبر؛ والتداخل مع تكرار محطات انتشار فرق الطوارئ والصيانة؛ والحاجة لإعاقة استخدام الهواتف النقالة أثناء القيادة ضمن النفق؛ وسياسة التنافس. وإن تطور الاتصالات داخل السيارات قد يكون ذا منافع كبيرة للتواصل وتوجيه مستخدمي الطريق خلال طوارئ النفق. ويجب أن توضع مستويات الأجرة لتكون مرتفعة بشكل كافٍ لتغطية كافة هذه التكاليف والمخاطر، وأن تشمل بالتناسب، جميع التكاليف البديلة التي ستتطلب المرافق تحملها إذا لم يكن النفق الطرقي متاحًا، بالإضافة إلى الحصة المتفق عليها من العوائد المستمرة من تأمين مثل هذه الخدمات.

3-13 التصنيف التشغيلي لوسائل السلامة من أجل مستخدمي الطريق

3-13-1 عام

يصف هذا الجزء معايير التصنيف لاختيار وسائل السلامة التشغيلية المراد تأمينها في نفق طرقي مستطيل، مثل الفراغ الخاص بنقاط الطوارئ، ومداخل المشاة، ومسالك الهروب، تجاوز المركبات والتجهيزات المتعلقة بنقاط الطوارئ، وإبطال التهوية، والمراقبة والتحكم بالمرور، ونظم المعلومات والاتصالات. وعندما تسمح القونين الفرعية، فيجب أن تسمح الأنفاق الطرقية، وتكون مجهزة بشكل مناسب من أجل، العبور الحر للمركبات القانونية الحاملة للبضائع الخطرة.

إن أي مطالب إضافية على السائق الذي سافر عبر النفق الطرقي ستتباين بين الأفراد وعلى نطاق واسع، وعلى طول النفق ومنشآته وشكله. وإن الأشخاص ذوي المزاج العصبي أو الذين يعانون من رهابات معينة، وفي بعض الحالات (مثل اجتياز أنفاق طويلة جدًا أو أنهار)، قد يجدون التجربة مروعة وصادمة للغاية. وتحت حالات التدفق المروري العادي، فإن غالبية مستخدمي الطريق يجدون مشكلة بسيطة في القيادة عبر الأنفاق.

فقط في حالة تعطل للمركبة، ستكون التجربة صعبة بعض الشيء أو ستؤدي إلى الشعور بالهلع.

ولتخفيف مثل هذه التأثيرات، فإنه يجب تأمين اتصالات وإرشادات واضحة لمستخدمي النفق في حال حدوث عراقيل في التدفق المروري الطبيعي مثل الصيانة، إغلاق النفق، والتحويلات... إلخ. وبالإضافة إلى إجراءات التشغيل القياسية المتخذة في مثل هذه الأحداث، والترتيبات التي تتم لتحقيقة الاستجابة السريعة للحوادث، أو الأعطال، أو لحالات الطارئة الأخرى، فإنه يجب الإشارة بشكل واضح إلى الوسائل المادية للهروب.

3-13-2 المتطلبات الأساسية

يجب الأخذ في الحسبان وسائل السلامة التشغيلية لكل نفق من ناحية طوله، وحالات المرور، ونوع الطريق المشترك معه (أي طريق سريع أو خط طريق آخر). ويعني هذا إعادة النظر في الميزات الإنشائية المؤثرة على تخطيط النفق، والاتصالات، والاستجابة للحالات الطارئة، التي تشمل الحرائق، والإنارة الطارئة والتهوية الميكانيكية (عند توفرها) عند حدوث حريق. وفي الأنفاق ذات الفتحات المزدوجة، فإن الفتحة غير المتأثرة توفر إمكانية دخول خدمات الطوارئ، وملجأ ومسلك هروب. ومن المهم أيضًا النظر إلى النفق من حيث علاقته بشبكة الطرق المحيطة.

وهناك فوائد في تبني نظام التصنيف لتحديد الوسائل الأساسية المراد تأمينها من أجل سلامة التشغيل لأنفاق الطرق (انظر الجدول 3 ـ 15). لكن يجب أخذ الحيطة لتجنب سوء استخدام مثل هذه الأنظمة، لأنه لا يوجد نفقان متشابهان، وإن طبيعة تنوع مسائل السلامة ذات الصلة تتطلب أن يتم التعامل مع كل نفق على أنه كيان منفصل.

ويؤمن النظام المجدول وسائل فعالة لنقل المسائل الأساسية إلى غير المختصين، خصوصًا أولئك الموظفين في التخطيط العام لمشاريع الأنفاق. وهو يؤمن أيضًا أساسًا لتعيين متطلبات التصميم الأولي وتقديرات الكلفة. وفي المرحلة التي يتم فيها وضع تصميم النفق ومسائل السلامة التشغيلية بتفصيل أكثر، فإن النظام المجدول للمرافق

يؤمن هيكلاً مريحًا لمجموعة استشارات سلامة الأنفاق وتصميمها للتأكد من أنه تم منح الاهتمام المنظم لمسائل السلامة الخاصة عن كل موقع.

وفي المسائل المتعلقة بالاتصالات الهاتفية والتحكم بالمرور، فإنه يمكن فقط تقديم إرشادات عامة، لأن نشوء متطلبات التصميم التفصيلي في هذه المنطقة يستلزم تعاونًا وثيقًا مع المؤسسة الإشرافية، لكي تؤخذ في الحسبان الأنظمة المعنية في الموقع أو المخطط لها على الشبكة المحيطة.

ويجب الأخذ في الحسبان أنواع التدفق المروري وعوامل موقع النفق التالية:

- تدفق مروري أحادي الاتجاه أو ثنائي الاتجاه ضمن فتح النفق: سيؤثر هذا في وضع لوحات الطوارئ وتوزيعها، ومقاييس التحكم المروري وفلسفة التحكم بالدخان.
- الموقع الحضري أو الحضري البيني: قد تتغير أزمنة الوصول والحصول لخدمات الطوارئ إلى حد بعيد حسب الموقع.
- الموقع فوق أو تحت الماء: قد تكون الأنفاق تحت مستوى الماء أكثر عرضة للفيضان، وإذا كان النفق يمر تحت مجارٍ مائية، فإن وسائل الهروب يمكن أن تكون فقط عن طريق نهاية النفق أو عبر الفتحات النفقية المجاورة غير المتأثرة.
- طريق سريع تتغير السرعات المرورية واستعداد السائقين للعوائق المحتملة حسب المعايير المطبقة على الطريق الذي يشكل النفق جزءًا منه.

3-13-3 تصنيف المرافق

إن توفير مرافق السلامة متعلق بالفئة الذي يقع تحته النفق بحسب التصنيف بالأسفل. وتقسم الأنفاق إلى الفئات X، A، B، C، Dg والتي تكون كالتالي:

- الفئة X : حيث يكون طول النفق أقل من 90م.
- الفئة A : حيث يبلغ طول النفق 90م أو أكثر.
- الفئة B : عندما يكون طول النفق مساويًا أو يتجاوز 240م وحيث تتجاوز المسافة القصوى من أي نقطة داخل النفق إلى نقطة أمان 120م.
- الفئة C : حيث يساوي طول النفق أو يتجاوز 300 متر.
- الفئة D : حيث يساوي طول النفق أو يتجاوز 1000 متر.

ويقدم الجدول رقم 3 - 15 الاشتراطات الأساسية المفضلة لكل صنف. ويجب اعتبار الاشتراطات نقطة بداية لتعيين متطلبات التصميم بدلًا من التمسك الشديد بها، خصوصًا بعد عمل التحليل الهندسي.

Minimum Road Tunnel Fire Protection Reference Guide دليل مرجعي للحد الأدنى من المتطلبات لمكافحة الحريق في الأنفاق

Fire Protection Systems	Road Tunnel Categories فئات أنفاق الطرقات X	A	B	C	D
Engineering Analysis التحليل الهندسي					
Engineering analysis التحليل الهندسي	MR	MR	MR	MR	MR
Fire Protection of Structural Elements الحماية من الحرائق للعناصر الإنشائية					
Fire protection of structural elements الحماية من الحرائق للعناصر الإنشائية	MR	MR	MR	MR	MR
Fire Detection استشعار حريق					
Detection, identification, and location of fire in tunnel كشف وتحديد مكان الحريق في النفق	—	—	MR	MR	MR
Manual fire alarm boxes صناديق إنذار الحريق اليدوية	—	—	MR	MR	MR
CCTV systems (CCTV)أنظمة ال	—	—	CMR	CMR	CMR
Automatic fire detection systems أنظمة استشعار الحرائق التلقائي	—	—	CMR	CMR	CMR
Fire alarm control panel لوحة تحكم إنذار الحريق	—	—	MR	MR	MR
Emergency Communications Systems نظم الاتصالات في حالات الطوارئ					
Emergency communications systems نظم الاتصالات في حالات الطوارئ	CMR	CMR	CMR	CMR	CMR
Traffic Control التحكم بالمرور					
Stop traffic approaching tunnel portal وقف حركة المرور قرب بوابة النفق	MR	MR	MR	MR	MR
Stop traffic from entering tunnel's direct approaches وقف حركة المرور من الدخول المباشر للنفق	—	—	MR	MR	MR
Fire Protection الحماية من الحرائق					
Fire apparatus مركبات مكافحة الحريق	—	—	—	—	—
Fire standpipe صنبور مكافحة الحريق	—	MR	MR	MR	MR
Water supply إمدادات المياه	—	MR	MR	MR	MR
Fire department connections وصلات قسم الأطفاء	—	MR	MR	MR	MR
Hose connections وصلة خرطوم مياه الحريق	—	MR	MR	MR	MR
Fire pumps مضخات الحريق	—	CMR	CMR	CMR	CMR
Portable fire extinguishers طفايات الحريق المحمولة	—	—	MR	MR	MR
Fixed water-based fire-fighting systems أنظمة مكافحة الحريق الثابتة القائمة على المياه	—	—	—	CMR	CMR
Emergency ventilation system نظام تهوية الطوارئ	—	—	CMR	CMR	MR
Tunnel drainage system نظام صرف النفق	—	CMR	MR	MR	MR
Hydrocarbon detection استشعار الهيدروكربونات	—	CMR	MR	MR	MR
Flammable and combustible environmental hazards المخاطر البيئية القابلة للاشتعال والاحتراق	—	—	CMR	CMR	CMR
Means of Egress وسائل الخروج					
Emergency egress مخارج الطوارئ	—	—	MR	MR	MR
Exit identification تحديد الخروج	—	—	MR	MR	MR
Tenable environment محيط محتمل	—	—	MR	MR	MR
Walking surface سطح الممشى	—	—	MR	MR	MR
Emergency exit doors أبواب مخارج الطوارئ	—	—	MR	MR	MR
Emergency exits (includes cross-passageways) مخارج الطوارئ (بما في ذلك الممرات المتقاطعة)	—	—	MR	MR	MR
Electrical Systems الأنظمة الكهربائية					
General عام	—	CMR	MR	MR	MR
Emergency power الطاقة الكهربائية في حالات الطوارئ	—	CMR	MR	MR	MR
Emergency lighting الإضاءة في حالات الطوارئ	—	CMR	MR	MR	MR
Exit signs إشارات المخارج	—	CMR	MR	MR	MR
Security plan الخطة الأمنية	—	CMR	MR	MR	MR
Emergency Response Plan خطة الاستجابة للطوارئ					
Emergency response plan خطة الاستجابة للطوارئ	MR	MR	MR	MR	MR

MR: Mandatory requirement مطلب إلزامي
CMR: Conditionally Mandatory requirement مطلب إلزامي مشروط

الجدول رقم 3 - 15: دليل مرجعي للحد الأدنى من المتطلبات لمكافحة الحريق في الأنفاق

أما بالنسبة للأنفاق السككية، فيجب اتباع مطلبات NFPA 130، والتي تلخص بـ:

1. يجب أن يعتمد نظام تهوية ميكانيكي في حالات الطوارئ في الحالات التالية:
   - في محطة مغلقة.
   - في نفق مغلق ويكون أكبر في الطول من 305م.
2. لا يجب أن يعتمد نظام تهوية ميكانيكي في حالات الطوارئ في الحالات التالية:
   - في محطة مفتوحة.
   - في نفق مغلق ويكون أقل في الطول من 61م.
3. يجب إجراء دراسة هندسية للأنفاق بين 61م و 305م لاعتماد وجوب نظام تهوية ميكانيكي في حالات الطوارئ.

المقدمة في المواقع التالية:

3-13-4 تخطيط النفق والخواص الإنشائية

3-13-4-1 نقاط الطوارئ

يجب أن تحتوي المنشآت النفقية على نقاط طوارئ بمسافات محددة على طول النفق. ويجب أن تكون مثل هذه النقاط كبيرة بما يكفي لاحتواء وسائل مكافحة الحريق وهواتف الطوارئ على جانب الطريق المتصلة بمراكز شرطة أو تحكم بالنفق، والتي تبعد عن النفق وتكون مأهولة باستمرار. ويتم تحديد التباعد بين نقاط الطوارئ بواسطة متطلبات تباعد هواتف الطوارئ، وبكرات خراطيم وصنابير مكافحة الحرائق التي يجب أن تحدد بالتشاور مع سلطة مكافحة الحرائق.

ويكون التباعد الاسمي لنقاط الطوارئ لا يزيد على 42.5م، مع هواتف طوارئ جانب الطريق وبكرات خراطيم مكافحة الحرائق (إذا تطلب الأمر وجود فرقة إطفاء) عند كل نقطة طوارئ، وصنابير مياه عند نقاط متناوبة (أي على مسافات لا تزيد على 85م).

3-13-4-2 ملاجئ المركبات من أجل حوادث الأنفاق

يجب أن تكون التكلفة الابتدائية لتأمين مساحة مرور إضافية في المقطع العرضي للنفق للتغلب على الحوادث والأعطال، متوازنة مقابل الاحتياجات التشغيلية للاتصالات، والمراقبة، و9وسائل الإصلاح الاحتياطية، وتداعيات تأخير المرور والضغط على شبكة الطرق المحيطة. وسوف تعتمد هذه العوامل على طول النفق، وموقعه (ريفي، جبلي، حضري، غائص في الماء) وعلى الطلب المروري. ويجب طلب النصيحة من أولئك الخبراء في إدارة المخاطر في الأنفاق الطرقية، عوضًا عن إحصائيات الحوادث، لتحديد الحاجة لأي مساحة مرورية إضافية مستديمة.

3-13-4-3 حارات التوقف الطارئة

بسبب التكاليف العالية المتعلقة بها، هناك أمثلة قليلة جدًّا عن حارات التوقف الطارئة داخل الأنفاق.

لكن، العرض الإضافي للحارة المرورية أو الحواف الموسعة تؤمن وسيلة مؤقتة للمرور ليكون قادرًا على تمرير مركبة عالقة. ويجب ألا تكون مثل هذه الشروط المؤقتة أساسًا لتبرير الطاقات الإنتاجية المرورية خلال الفترات المديدة من تقييد النفق. إن الأولوية الأولى والأساس الكلي للتشغيل الآمن للنفق يجب أن يكون دائمًا إزالة، حسب القضية الملحة، أي عوائق للاستخدام غير المحدود للمسرب المروري.

3-13-4-4 أرصفة الطوارئ

يجب تأمين مدخل مشاة سالك، عند مستوى منخفض، إلى نقاط الطوارئ.

إن الأرصفة البارزة عالية والمحمية، والتي تنشأ من المقاطع الدائرية لـTBM (آلة ثقب النفق) للأنفاق المنفذة، تؤدي إلى نشوء سلبيات واضحة: فقدان الوقوف المؤقت للمركبات العالقة؛ وبالنسبة للسائقين، التأثير غير المرحب به للجدار الجانبي (التفادي) الذي يؤثر في سلوك السائق؛ تقييد الفتحة الجانبية لأبواب المركبات العالقة؛ فقدان الوصول السهل إلى نقاط الطوارئ ووصلات الأقنية العرضية لكل مستخدمي النفق، خصوصًا الوصول السهل إلى نقاط الطوارئ ووصلات الأقنية العرضية لكل مستخدمي النفق، خصوصًا المعاقين. كما تكون الصيانة أكثر صعوبة (مثل جدران الأقنية، التدهور السريع لمماسك الدرابزينات وصعوبة التنظيف العام).

3-13-4-5 مسالك الهروب (النجاة)

أنفاق الطرق:

تصمم أنفاق الطرق وفقًا "لقانون" متطلبات الوقاية للحماية من الحريق في الأنفاق .NFPA502تختلف المسافة المطلوبة بين المخارج حسب تصنيف النفق ونوعه. لكن في الاجمال يجب ألا تتخطى الثلاثمئة مترًا» حسب الفقرة 7.16.6 من الكود. يمكن أيضًا «في بعض الحالات استخدام وتأمين ممرات وصل عرضية للهروب بدلا» من سلالم الهروب.

أنفاق سكك القطارات:

تصمم أنفاق سكك القطارات وفقًا "لقانون" متطلبات الوقاية للحماية من الحريق في الأنفاق.NFPA130 يجب ألا تتخطى المسافة بين المخارج الـ 762 مترًا» في حال الهروب من خلال سلالم حسب الفقرة 6.3.1 من الكود. أما في حال اعتماد ممرات وصل عرضية للهروب يجب ألا تتخطى المسافة بين المخارج 244 مترًا» كحد أقصى.

3-13-4-6 الوصلات العرضية للنفق

تكون الوصلات العرضية للنفق عادة على ثلاثة أنواع:

1. مجموعة واحدة من أبواب الحريق في الجدار الفاصل بين فتحتي نفق مروريين.
2. ممر عرضي بأبواب حريق عند كلتا النهايتين مؤمنًا ملاذًا آمنًا ومسلك نجاة من أحد الفتحتين إلى الفتحة الأخرى.
3. أبواب وصول إلى ممر رأسي مركزي للنجاة، يقود إلى مخرج آمن.

ويتطلب النوعات الثاني والثالث أعلاه تهوية للمحافظة على التزود بالهواء النقي لمسلك النجاة وضغطًا موجبًا أو اشتراطات أخرى لإبعاد الدخان من أي حريق ضمن فتحة النفق المروري. وعندما تكون هناك فتحتان نفقيتان أو أكثر متصلتان بوصلات عرضية، فإنه يجب اعتبار تأثير فتحة واحدة أو أكثر من أبواب هذه الوصلات العرضية في كلتا الحالتين الطبيعية والطارئة. ويجب أن يشتمل التصميم على مميزات تخفض أو تزيل أي خطر ناتج عن فتحة مثل هذه الوصلات العرضية.

3-13-4-7 المعابر العرضية للمركبات

يجب تأمين معابر عرضية للمركبات على مناطق الاقتراب من النفق لتمكين عمل التدفق العكسي في الأنفاق ذات الفتحتين، أو عمل القوافل (انظر DMRB TA63 (8.4.5) في الأنفاق وحيدة الفتحة من أجل الصيانة...إلخ. وإذا كان هناك تقاطع طرق قرب النفق، فإنه يجب اتخاذ اللازم للتأكد من أن جميع المركبات يمكن أن تستخدم المعابر العرضية. كما يجب اتخاذ اللازم فيما بعد بمدى النظر خلال المعابر العرضية، خصوصًا تلك المجاورة للفتحات النفقية المزدوجة المتباعدة بشكل عريض، كما يجب توفير الإشارات المؤقتة أو الدائمة المناسبة، ويشكل ذلك أي إشارات ضرورية لتحديد السرعة. وخلال التشغيل الطبيعي، فإنه يجب تأمين وسائل مناسبة لمنع المركبات من العبور من طريق سريع إلى آخر لتجنب أي مخاطرة تتعلق بالسلامة. ويجب تقييم الحواجز القابلة للنقل أو القابل للفك، عند القيام بعملية التدفق العكسي، من حيث التخفيضات الممكنة في تكاليف الصيانة.

3-13-4-8 فسحات الالتفاف

في الأنفاق التي يزيد طولها على 5كم، فإنه يجب تأمين فسحات التفاف بمقياس كافٍ لتمكين كافٍ لتمكين شاحنة من الالتفاف، لمسافة لا تزيد عن 1كم عن منتصف النفق.

3-13-4-9 مواقف خدمات الطوارئ

إذا كان ذلك ضروريًا، فإنه يجب تأمين مساحة قريبة من مداخل النفق لمواقف الشرطة وعربات وتجهيزات خدمات الطوارئ عند التعامل مع حوادث النفق.

3-13-4-10 كبائن تحصيل الرسوم

يجب أن توضع كبائن تحصيل الرسوم، إذا كانت مطلوبة، على مسافة كافية من مداخل النفق للسماح للمرور بالعودة إلى حالات التدفق الحر قبل حدود النفق. ولا يؤثر هذا في السلامة فقط، وإنما أيضًا من أجل مستويات التلوث في النفق. وبشكل عام، يجب أن توضع كبائن تحصيل الرسوم على مسافة 300م من النفق.

3-13-4-11 مجمعات التصريف (الخزانات الأرضية)

يجب تحديد أبعاد خزانات تجميع مياه التصريف لتكون قادرة على استيعات آمن أكبر انسكاب يمكن أن يحدث بشكل مفاجئ داخل النفق. ما لم يتم فرض وتحديد قيود قانونية ثانوية، فإن الحجم الافتراضي هو 30م3، والذي يقارب الحمولة الكلية لناقلة شحن كبيرة.

3-13-5 وسائل اتصال النفق ومرافق الطوارئ

3-13-5-1 الاتصالات

يجب أن تسمح هواتف الطوارئ على جوانب الطريق داخل النفق لمستخدمي الطريق بالاتصال المباشر مع مركز تتحكم النفق أو شرطة المرور. وستمكن تجهيزات إعادة البث اللاسلكي خدمات الطوارئ وفريق الصيانة العامل داخل النفق من إدامة الاتصالات. وللتنبيه، يجب توجيه ومساعدة مستخدمي الطريق خلال الحالات الطارئة للنفق، ويكون ذلك عبر استخدام وميض الإشارات، والبث اللاسلكي بالـ RDS، الضجيج العالي المحيطة، كوسائل فعالة في تخفيض أخطار الموت أو الإصابة.

3-13-5-2 التحكم المروري

يمكن بسهولة إدراك مخاطر السلامة والتلوث الناتجة عن اضطراب حركة المرور داخل النفق. ويجب وضع مستويات مناسبة من التجهيزات الخاصة بقياسات سرعة وكثافة المرور، والإشراف والتحكم بالمرور، بالإضافة إلى منظومة شاملة من الإشارات والتنبيهات وذلك عبر التعاون الوثيق مع هيئة المراقبة (التي تكون صاحبة المسؤولية الكلية عن الترخيص لمثل هذه التركيبات على طرقها السريعة والطرق الفرعية الأخرى). ويجب أن تكون منظومات التحكم المروري متكاملة مع منظومات التحكم المروري للشبكات المحلية والمجاورة.

3-13-5-3 منظومات طوارئ الأنفاق

يجب أن تكون المنظومات المتعلقة بنقاط الطوارئ والاستجابة لطوارئ الأنفاق متصلة بمبنى مركز الإشراف والتحكم بالنفق.

3-13-5-4 إنذار الحريق، طفايات الحريق، والتحكم بالدخان

يجب تأمين مرافق إطلاق الإنذار، إما بوسائل يدوية أو آلية، والاستجابة للحرية لحماية جميع مناطق النفق بما في ذلك مباني خدمات النفق. وإن معدات الإطفاء، وحيثما يكون ذلك مناسبًا، مرافق التحكم بالدخان بواسطة تشغيل وسائل التهوية، يجب أن تكون متوافقة مع الفصول المعنية في هذه الوثيقة.

3-13-5-5 طاقة وإنارة الطوارئ

في حال حدوث عطل في مزود الطاقة الطبيعية، فإن مصدرًا بديلًا للطاقة سيبقي الطاقة لمنظومات التشغيل والسلامة ويسمح باستمرار استخدام النفق.

3-13-6 الهندسة القيمية

يجب الاعتراف بأن تجهيزات السلامة باهظة التكاليف من حيث التركيب والصيانة، وقد تكون في بعض الحالات خاضعة للعطل والعمر التشغيلي القصير. لذلك فمن الضروري وحتى يتم الحفاظ على ثقة مستخدمي النفق، عدم تركيب تجهيزات أخرى ما لم تكن بكل تأكيد ضرورية لإبقاء السلامة عند مستوى مقبول. ويمكن الاطلاع على إرشادات مناسبة في دليل Manual Highways Agency Value for Money.

3-14 الإنارة

3-14-1 عام

يؤثر الموقع الجغرافي، بما فيه اتجاه النفق بالنسبة للشمس، ومحيط مدخل النفق على قدرة السائقين في القيادة من الإنارة الخارجية الساطعة الى داخل النفق ذي الإنارة الضعيفة. وتكمن أهمية إضاءة الأنفاق في النهاربتأمين سهولة الرؤية داخل النفق، كما أنه تختلف متطلبات الإضاءة للأنفاق بين الليل والنهار وذلك نظرا لاختلاف الضوء الخارجي. في الليل تكون الإنارة الخارجية ضعيفة نسبيًا حيث يتم توفير مستويات إنارة داخل النفق مساوية على

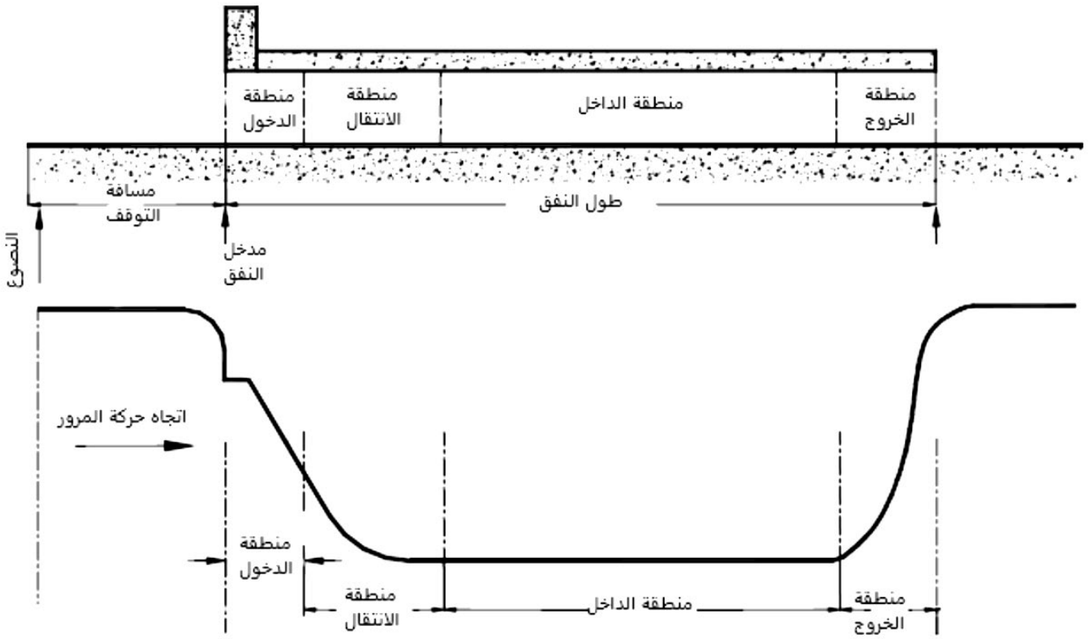
الأقل لتلك الموجودة خارج النفق. بينما يتم تصميم الإضاءة أثناء النهار بمستويات نصوع عالية بشكل خاص بسبب النظام البصري البشري، حيث لا يمكن للسائق خارج النفق أن يدرك التفاصيل على الطريق تحت مستويات الإضاءة المظلمة نسبيًا داخل النفق، مباشرة بعد تعرضه لمستويات الإضاءة الشديدة الموجودة في الخارج.

إن النظام البصري البشري يمكن أن يتكيف مع الانخفاض السريع في الإضاءة المحيطة، مثل تلك التي تنتج عند المرور من ضوء النهار إلى ظلام النفق، إلا أن عملية التكيف لا تتم بشكل فوري. تستغرق عملية التكيف وقتًا معينًا، اعتمادًا على حجم الانخفاض في الإضاءة: فكلما زاد الفرق، زاد وقت عملية التكيف البصري.

هذا يعني أنه كلما زاد الفرق بين مستوى الإضاءة في الخارج وداخل النفق، كانت مدة تكيف النظام البصري للسائق أطول. ومن ثم، يجب أن تكون الإضاءة عند مدخل النفق قوية بما يكفي لتجنب تأثير ظاهرة "الثقب الأسود" التي يواجهها سائقو السيارات ويجب تصميم الإضاءة بحيث تمكن للسائق اكتشاف أي عقبة من مسافة تساوي مسافة التوقف قبل مدخل النفق، عن طريق إحداث تباين بين خلفية مدخل النفق وأي عقبة.

مسافة التوقف هي المسافة اللازمة لإيقاف تحرك السيارة بأمان تام. وهي تشمل المسافة المغطاة خلال وقت رد الفعل وأثناء وقت الكبح.

يجب احتساب قيمة مسافة التوقف طبقًا للسرعة التصميمية للمرور من قبل مهندس الطرق وحسب القوانين المتبعة في المملكة.



الشكل 3 - 60: مقطع طولي للنفق لتوضيح تغير مستوى الإنارة

3-14-2 المراجع المعيارية

الوثائق المرجعية التالية لا غنى عنها لتطبيق هذه الوثيقة:

BS2:2016 ـ5489 ـ، Code of Practice for the Design of Road Lighting. Part 2: Lighting of Tunnels.

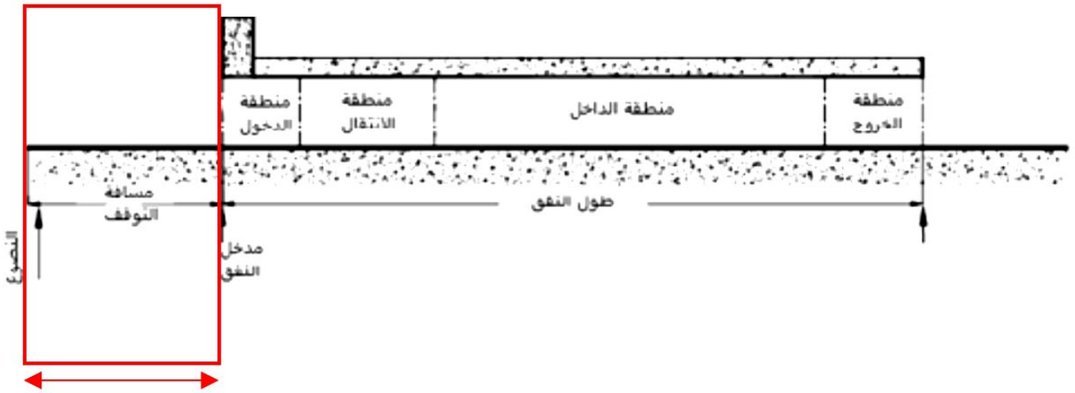
CIE 88:2004, Guide for the Lighting of Road Tunnels and Underpasses

3-14-3 مناطق النفق

تعريف مناطق النفق

منطقة الوصول

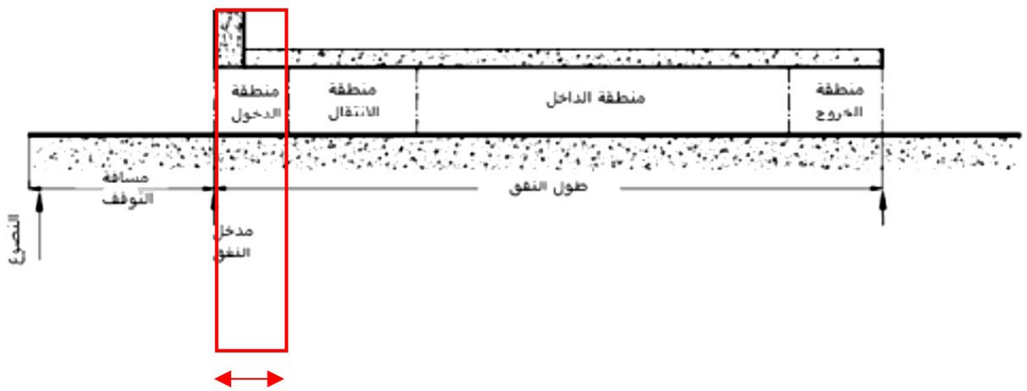
إنه جزء من الطريق خارج (أمام) بوابة النفق مباشرةً، ويغطي المسافة التي يجب أن يتمكن السائق القريب من رؤيتها في النفق. تبدأ منطقة الوصول من نقطة الإيقاف قبل المدخل وتنتهي عند المدخل.



الشكل 3 - 61: منطقة الوصول

منطقة الدخول

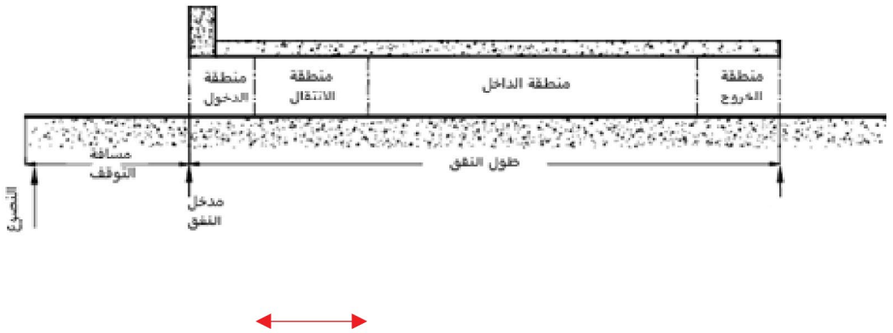
هذا هو الجزء الأول من النفق، مباشرة بعد البوابة. تبدأ منطقة االدخول إما في بداية النفق أو في بداية واقيات الشمس أثناء النهار. طول منطقة الدخول يساوي على الأقل مسافة التوقف.



الشكل 3 - 62: منطقة العتبة

المنطقة الانتقالية

هو جزء النفق الذي يتبع مباشرة بعد منطقة الدخول وينتهي في بداية المنطقة الداخلية.



الشكل 3 - 63: المنطقة الانتقالية

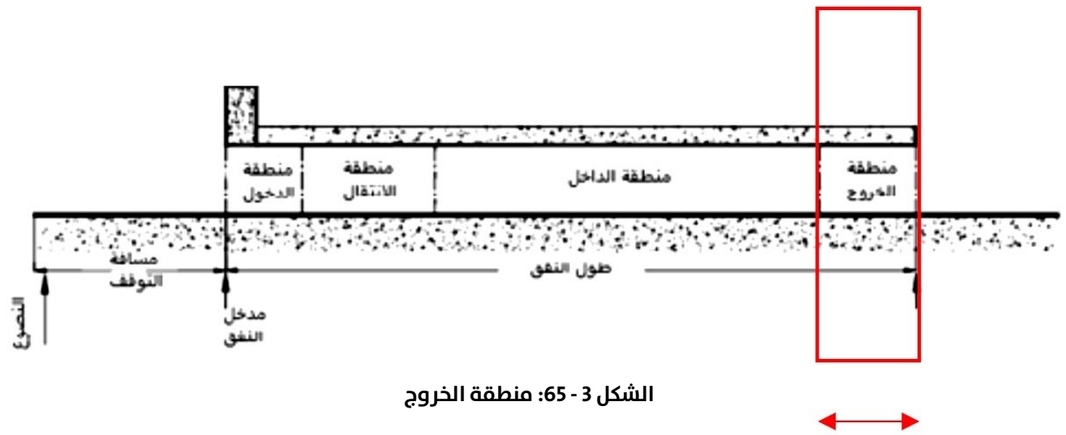
المنطقة الداخلية

إنه جزء النفق الذي يتبع مباشرة بعد المنطقة الانتقالية وتمتد من نهاية المنطقة الانتقالية إلى بداية منطقة الخروج.

الشكل 3 - 64: المنطقة الداخلية

منطقة الخروج

تبدأ منطقة الخروج في نهاية المنطقة الداخلية، وينتهي عند بوابة الخروج للنفق.



الشكل 3 - 65: منطقة الخروج

3-14-4 تصنيف الأنفاق

تختلف متطلبات الإضاءة في الأنفاق الطويلة والقصيرة حسب طول النفق وقدرة السائق على رؤية مخرج النفق. تعتمد القدرة على الرؤية من خلال النفق بشكل أساسي على طول النفق على معايير التصميم (العرض، الارتفاع، وانحناء النفق، إلخ).

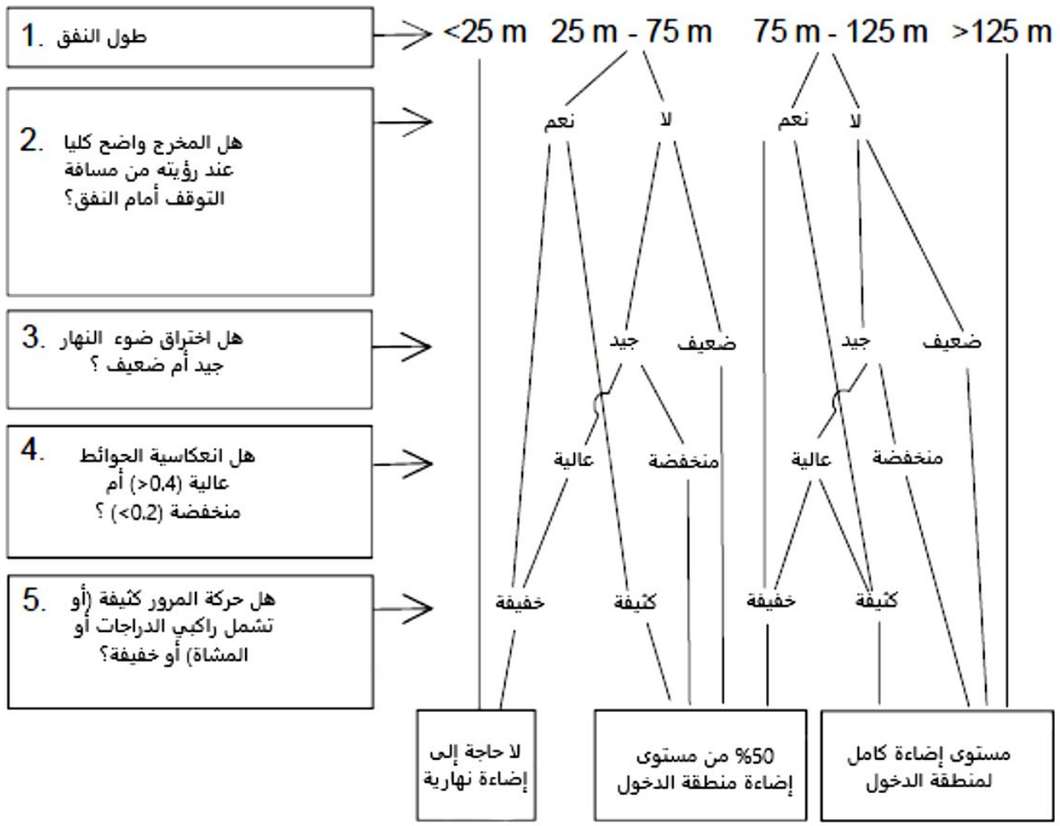
عادة ما يتم تقسيم الأنفاق إلى «أنفاق طويلة» و «أنفاق قصيرة».

بعض الأنفاق حيث لا يمكن للسائقين رؤية منطقة الخروج من مدخل النفق - يجب أن تكون كذلك مضاءة مثل الأنفاق الطويلة، حتى إذا كان طول النفق يعد قصيرًا.

تم تصنيف هذه الأنفاق على أنها «أنفاق طويلة بصريًا»، على عكس تلك التي يمكن أن يراها السائقون المقدمون على النفق («الأنفاق القصيرة بصريًا»). فيما يتعلق بالإضاءة، تنقسم الأنفاق إلى ثلاث فئات:

- الأنفاق الطويلة هندسيًا.
- أنفاق طويلة بصريًا.
- أنفاق قصيرة.

يمكن إجراء التمييز بين أطوال الأنفاق والحاجة إلى إنارة نهارية على أساس المخطط التالي:



الشكل 3 - 66: مخطط تصنيف الأنفاق

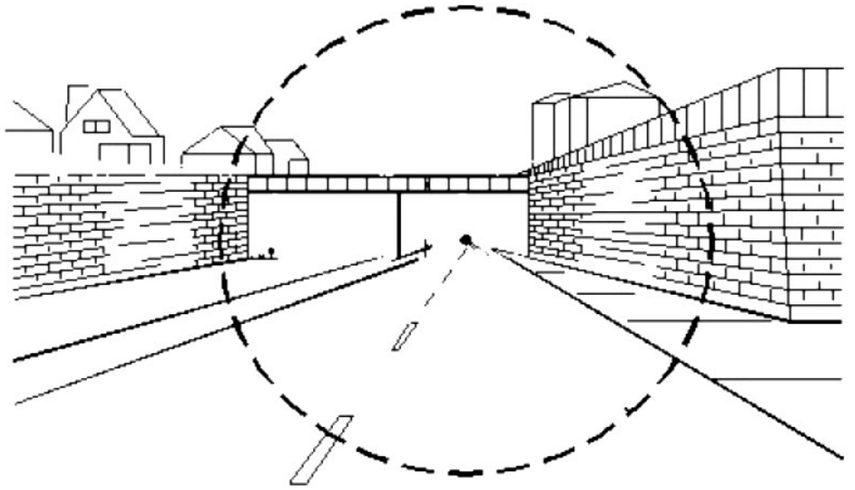
3-14-5 إنارة النفق

3-5-14-1 إنارة منطقة الدخول

يجب حساب مستوى النصوع لمنطقة الدخول طبقًا للطرق المعتمدة في المراجع المعيارية CIE:88 و BS5489-2:2016(طريقة L20 أو طريقة التباين المدرك – perceived contrast method). كلتا الطريقتين تعتمدان بشكل أساسي على تحديد الظروف الجغرافية المحيطة بمدخل النفق والعناصر الموجودة في مجال رؤية السائق من مسافة تساوي مسافة التوقف.

طريقة L20

طريقة L20 تعتمد على الظروف الجغرافية المحيطة بمدخل النفق في مجال رؤية السائق زاوية 20o، حيث يتم الأخذ في الحسبان قيم النصوع للسماء والحوائط والمباني والطريق والجبال الصخرية أو الخضراء، الخ..



الشكل 3 - 67:طريقة L20 ـ مجال الرؤية من زاوية 20o

يتم احتساب L20 (النصوع في مجال رؤية السائق عند مسافة التوقف قبل مدخل النفق)، ومنها يتم حساب المستوى المطلوب لمنطقة الدخول Lth داخل النفق طبقًا للسرعة التصميمية كما في الجدول التالي:

السرعة (كم/س)	$K = L_{th}/L_{20}$
60=>	0.05
80	0.06
120	0.1

يعتمد حساب النصوع في منطقة الوصول للأنفاق على ما إذا كانت المنطقة تقع في نصف الكرة الشمالي أو الجنوبي. إذا كان النفق المدروس يقع في نصف الكرة الشمالي، فسيتم استخدام بيانات الجدول رقم 3ـ 16.

الجدول رقم 3 - 16: النصوع عند بوابة النفق ـ نصف الكرة الشمالي

اتجاه القيادة	(السماء) kcd/m²	(الطريق) kcd/m²	kcd/m² (البيئة)			
			الصخور	المباني	الثلج	المروج
N	8	3	3	8	(V) 15 (H) 15	2
W ـE	12	4	2	6	(V) 10 (H) 15	2
S	16	5	1	4	(V) 5 (H) 15	2

إذا كان النفق المدروس يقع في نصف الكرة الجنوبي، فسيتم استخدام البيانات من الجدول 3ـ 17.

الجدول رقم 3 17-: النصوع عند بوابة النفق ـ نصف الكرة الجنوبي

اتجاه القيادة	(السماء) kcd/ m²	(الطريق) kcd/m²	kcd/m² (البيئة)			
			الصخور	Buildings	Snow	Meadows
N	16	5	1	4	(V) 15 (H) 15	2
W ـE	12	4	2	6	(V) 10 (H) 15	2
S	8	3	3	8	(V) 5 (H) 15	2

نصوع منطقة الوصول: خطوات حساب L20

1. حدد الموقع (نصف الكرة الشمالي أو الجنوبي
2. اختر اتجاه القيادة
3. حدد ما إذا كانت هناك سماء أو طريق أو صخور أو مبانٍ أو ثلج أو مروج، والنسبة المئوية المقابلة لها من مجال الرؤية المخروطية (الدائرة) في النفق المراد دراسته.
4. استخدم هذه الصيغة :

$$L20 = \gamma Lc + \rho Lr + \varepsilon Le$$:

5. حيث

Lc = نصوع السماء

Lr = نصوع الطريق

Le = الإنارة المحيطة

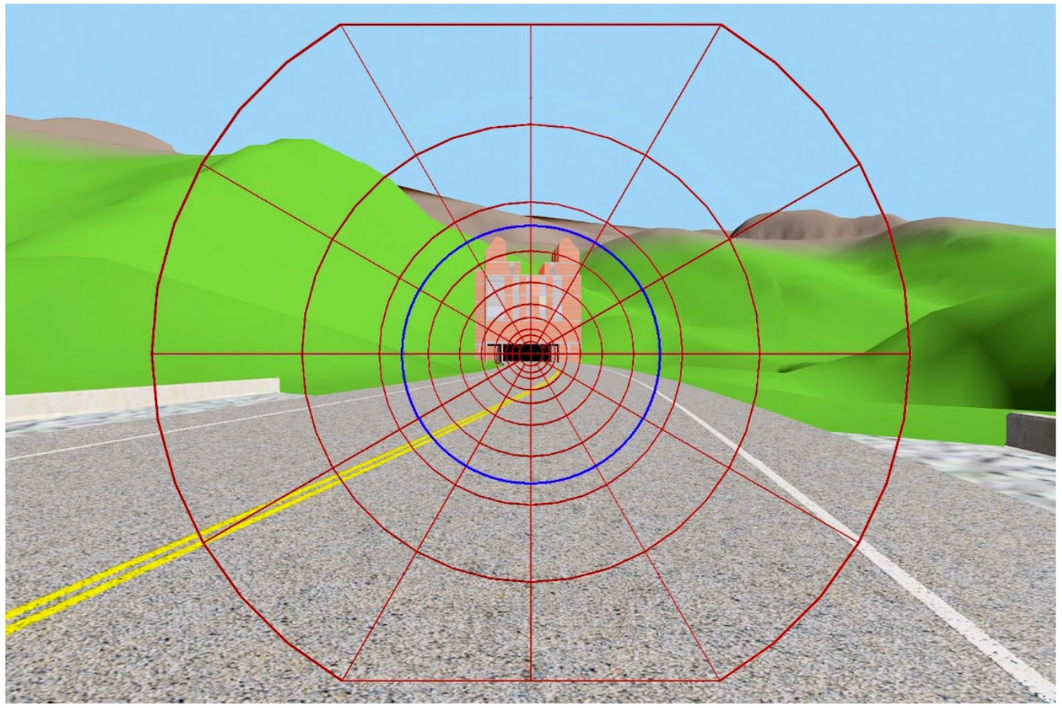
٧ = % من السماء في حقل 20 درجة

٩ = % من الطريق

٤ = % من المناطق المحيطة.

طريقة التباين المدرك

طريقة التباين المدرك – perceived contrast method أيضًا تعتمد على الظروف الجغرافية المحيطة بمدخل النفق في مجال رؤية السائق عند مسافة التوقف قبل مدخل النفق، ولكن يتم تقسيم مجال رؤية إلى عدد أكبر من القطاعات كما في الصورة التالية.



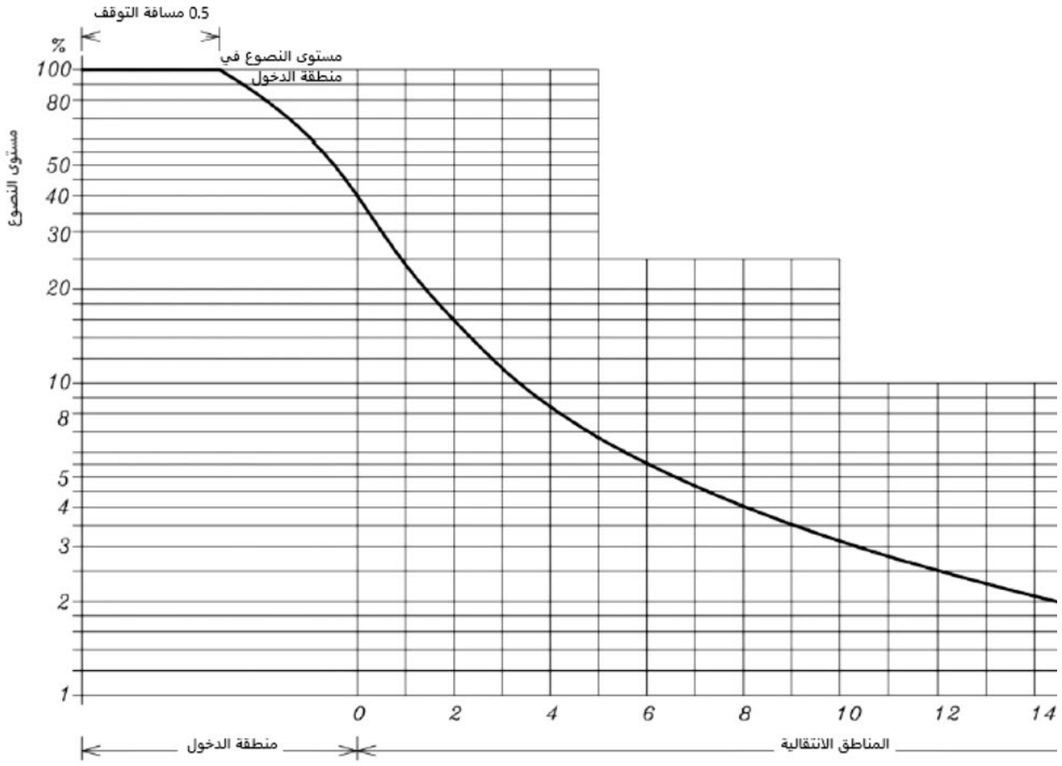
الشكل 3 - 68: طريقة التباين المدرك

يجب أن يكون الطول الإجمالي لإنارة منطقة المدخل مساويًا على الأقل لمسافة التوقف.

خلال النصف الأول من المسافة، يجب أن يكون مستوى النصوع مساويًا لـ 100% من القيمة المحسوبة، ومن الممكن أن ينخفض مستوى الإضاءة من نصف مسافة التوقف تدريجيًا إلى 40 % من القيمة المحسوبة بحسب الرسم البياني 3 - 69.

3-5-14-2 إنارة المنطقة الانتقالية

تقليل مستوى النصوع في المنطقة الانتقالية يجب أن يتم بشكل تدريجي بحيث يتبع المنحنى الموضح أدناه. يمكن استبدال هذا المنحنى بمنحنى متدرج بمستويات بحيث ألا تنخفض مطلقًا أسفل المنحنى المستمر. الحد الأقصى لتقليل نسبة النصوع المسموح به عند الانتقال من خطوة إلى أخرى هو 1:3. لا ينبغي أن تكون الخطوة الأخيرة أكبر من ضعف نصوع المنطقة الداخلية. وتقسم المنطقة الانتقالية إلى عدة مناطق فرعية ترتبط فيها إنارة كل منطقة ارتباطًا مباشرًا بمنطقتها السابقة.



الشكل 3 - 69:مستوى النصوع

3-5-14-3 إنارة المنطقة الداخلية

نصوع الطريق في المنطقة الداخلية من النفق يعتمد على مسافة التوقف وتدفق حركة المرور كما في الجدول التالي. عندما تكون المنطقة الداخلية للنفق طويلة جدًا يتم تقسيمها إلى منطقتين فرعيتين مختلفتين. المنطقة الفرعية الأولى هي التي يتم تغطيتها في 30 ثانية، ويجب أن تضيء بمستويات "الأنفاق الطويلة". تتوافق المنطقة الفرعية الثانية مع الطول المتبقي ويجب أن تضيء بمستويات "الأنفاق الطويلة جدًا".

الجدول رقم 3 - 18: قيم مستويات النصوع (cd/m2) في المنطقة الداخلية للأنفاق الطويلة

مسافة التوقف (m)	الأنفاق الطويلة حجم حركة المرور (عدد المركبات/ساعة/حارة مرورية)	
	خفيفة	كثيفة
m 160	6	10
m 60	3	6

الجدول رقم 3 - 19: قيم مستويات النصوع (cd/m2) في المنطقة الداخلية للأنفاق الطويلة جدًّا

مسافة التوقف (m)	الأنفاق الطويلة جدًّا حجم حركة المرور (عدد المركبات/ساعة/حارة مرورية)	
	خفيفة	كثيفة
m 160	2.5	4.5
m 60	1	2

تدفق حركة المرور:

عدد السيارات التي تمر بنقطة محددة في وقت محدد في الاتجاه (الاتجاهات) المذكورة. في تصميم النفق، يتم استخدام حركة المرور في ساعة الذروة، والمركبات في الساعة لكل حارة.

الجدول رقم 3 - 20: حركة المرور

حركة المرور في اتجاهين	حركة المرور في اتجاه واحد	حجم حركة المرور
400 <	1500 <	عالي
100 >	500 >	منخفض

4-5-14-3 إنارة منطقة الخروج

يجب أن تكون منطقة الخروج مضاءة بطريقة المنطقة الداخلية نفسها. في الحالات التي يتوقع فيها وجود مخاطر إضافية بالقرب من مخرج النفق وفي الأنفاق التي تكون فيها المنطقة الداخلية طويلة، يوصى بزيادة نصوع النهار في منطقة الخروج بشكل تدريجي بطول يساوي مسافة التوقف (قبل بوابة الخروج)، إلى مستوى 5 أضعاف مستوى المنطقة الداخلية على مسافة 20 مترًا من بوابة الخروج.

5-5-14-3 الإضاءة الليلية للأنفاق

- إذا كان النفق على جزء من طريق مضاء، فيجب أن تكون جودة الإضاءة داخل النفق مساوية على الأقل لمستوى الطريق.
- إذا كان النفق جزءًا من طريق غير مضاء، فيجب ألا يقل نصوع سطوع سطح الطريق بداخله عن 1 cd/m2

6-5-14-3 إضاءة الجدران والسقف في جميع المناطق

يعد النصوع لجدران النفق مكونًا مهمًا لجودة إضاءة النفق. يجب أن يكون متوسط نصوع جدران النفق، حتى ارتفاع لا يقل عن مترين، 60% على الأقل من متوسط نصوع سطح الطريق.

7-5-14-3 درجة انتظام شدة الإضاءة (UNIFORMITY)

يوصى بنسبة 40 % على سطح الطريق وعلى الجدران التي يصل ارتفاعها إلى مترين. يوصى بدرجة انتظام طولي (longitu-dinal uniformity) 60 % على طول وسط كل حارة.

6-14-3 التحكم في الإضاءة

يوصى بتقليل مستوى الإضاءة بشكل تدريجي على مدار اليوم آخذًا في الحسبان مقياس الإضاءة خارج النفق. يمكن أن يتم التحكم عن طريق تخفيض مستمر لمستويات الإضاءة خلال اليوم أو بإطفاء وحدات الإنارة على خطوات تدريجية بحيث يكون الحد الأقصى المسموح به لنسبة التخفيض في مستويات النصوع داخل النفق لكل المناطق عند الانتقال من خطوة إلى أخرى هو1:3.

يتم وضع عداد النصوع (Luminance meter) الذي يتم بواسطته قراءة الإنارة خارج النفق على مسافة تساوي مسافة التوقف من بداية النفق مواجها لبوابة النفق (بين ارتفاع مترين و 5 أمتار على الجانب القريب من الطريق عند مسافة التوقف الآمن قبل بوابة النفق). يتم التحكم بإطفاء مصابيح الإنارة على مدار اليوم طبقًا للقيم التي يتم برمجتها مسبقًا ومقارنتها مع قياسات النصوع خارج النفق. يتم ربط مقياس النصوع بمعالج مركزي. يقوم هذا بتجميع كافة البيانات لتحديد مستوى الإضاءة الذي يجب استخدامه للحفاظ على نسبة النصوع المبرمجة مسبقًا k = Lth / L20 في منطقة الدخول.

7-14-3 تحديات التصميم

1-7-14-3 درجة الوهج أو الانبهار (GLARE)

يجب ألا تزيد درجة الانبهار (Threshold increment) عن 15% للمناطق (المدخل والانتقال والداخل) في النهار وفي الليل. لا يوجد قيود لهذه القيمة لمنطقة الخروج خلال النهار.

3-14-7-2 ظاهرة الوميض (FLICKER EFFECT)

في ظل ظروف محددة، وإذا تم وضع وحدات الإنارة على مسافات متباينة، ما يؤدي إلى إحداث وميض الذي قد يسبب عدم الراحة للسائقين.

تعتمد درجة الانزعاج البصري الناتج عن وميض على:

1. عدد تغير النصوع في الثانية (تردد الوميض).
2. المدة الإجمالية للتعرض لهذه الظاهرة.
3. نسبة ذروة نصوع (الضوء) إلى الحد الأدنى للنصوع (ظلام).
4. معدل التغير في النصوع.

وترتبط هذة الآثار ارتباطًا مباشرًا بسرعة السيارة والمسافة الفاصلة بين وحدات الإنارة.

يجب تقليل ظاهرة الوميض، ويمكن القيام بذلك عن طريق ضمان:

- مدة وميض لا تزيد على 20 ثانية.
- و / أو الطول غير المضاء بين المناطق الوامضة المتجاورة في صف الإنارة أقل من نصف الطول الوامض لوحدة الإنارة.
- و / أو تردد الوميض يقع خارج النطاق 2.5 هرتز إلى 15 هرتز.
- الترتيب الخطي لوحدات الإضاءة.

3-14-7-3 قدرة استشعار العين

نظرًا لطبيعة استشعار الضوء في العين البشرية، تحتاج القرنية عند دخول الضوء لمدة 4 ثوان لضبط الزؤية؛ لذلك يجب ألا تقل فترة الانتقال بين مناطق النفق عن 4 ثوان.

3-14-8 معامل الصيانة

عند تصميم إضاءة الأنفاق، يوصى باستخدام معامل صيانة طبقًا لتكرار الصيانة وجودة المواد:

ـ 0.35 تستخدم عند مستوى صيانة وجودة المواد ضعيف.

ـ 0.5 تستخدم عند مستوى صيانة وجودة المواد متوسط.

ـ 0.7 تستخدم عند مستوى صيانة وجودة المواد جيد.

يمكن استخدام قيم أعلى أو أقل وفقًا لجدول الصيانة المتوقع والمواد ذات الجودة العالية.

3-14-19 إضاءة الطوارئ

يجب تزويد النفق بنظام إضاءة للطوارئ وفقًا لمتطلبات NFPA 502.

يجب أن يكون متوسط مستوى الإضاءة في إضاءة الطوارئ 10 lux والمستوى الأدنى هو 2 lux في أي مكان داخل

النفق. ويجب تغذية هذه الإنارة من وحدة تغذية كهربائية غير منقطعة (UPS)، لضمان خروج آمن لمستخدمي النفق. يجب ألا يتم تجاوز نسبة توحيد إنتظام الإضاءة من الحد الأقصى إلى الحد الأدنى من 40 إلى 1 وفقًا لمعيار NFPA502. و تكون الكابلات المستعملة من النوع المقاوم للحريق (Fire Resistant).

إنارة توجيهية

يتم تركيب كشافات على حوائط النفق على مستوى منخفض على ارتفاع 1 متر على مسافات تباعد 10 أمتار من أجل ضمان توجيه جيد لمستخدمي النفق في الظروف العادية. كما يتم الاستفادة من هذا النوع من الإنارة في حالة إخلاء النفق، حيث إنه من الممكن أن تتسبب الأدخنة المنبعثة من الحرائق في تغطية الإنارة العلوية. ويجب تغذية هذه الإنارة من وحدة التغذية الكهربائية غير المنقطعة (UPS). وتكون الكابلات المستعملة من النوع المقاوم للحريق (Fire Resistant).

اللوحات الإرشادية داخل النفق: يجب استخدام اللوحات الإرشادية والمخصصة لوسائل السلامة داخل النفق على النحو التالي:

- الأرصفة الجانبية:

- مخارج الطوارئ:

- طرق الخروج:

- محطات الطوارئ:

3-14-10 إنارة الممرات

تصميم الإنارة للممرات المخصصة للإخلاء يجب أن يضمن مستوى إضاءة لا يقل عن 150 lux مع الأخذ في الحسبان اختيار بعض الكشافات في هذه الممرات لتغذيتها ومن وحدة التغذية الكهربائية غير المنقطعة (UPS) لضمان مستوى إضاءة في هذه الحالة لا تقل عن 25 lux. و تكون الكابلات المستعملة من النوع المقاوم للحريق (Fire Resistant).

11-14-3 شبكة توزيع الكهرباء للأنفاق

يتم إنشاء محطة كهرباء لخدمة النفق تقع عند مداخل الأنفاق تتضمن الغرف التالية:

- غرفة مفاتيح الجهد المتوسط.
- غرف المحولات.
- غرفة مولدات القدرة الاحتياطية.
- غرفة الجهد المنخفض تتضمن لورحة التوزيع الرئيسة ولوحات التوزيع الفرعية.
- غرفة وحدة تغذية كهربائية غير منقطعة (UPS).
- غرفة التحكم وأنظمة التيار الخفيف.

ويمكن وصف وتقسيم شبكة توزيع الكهرباء على النحو التالي:

- نظام التغذية الاعتيادية.
- نظام التغذية الاحتياطية.
- نظام تغذية الطوارئ ـ وحدة تغذية كهربائية غير منقطعة (UPS).

نظام التغذية الاعتيادية

يتم توفير التغذية الكهربائية من شبكة شركة الكهرباء جهد متوسط عبر ربط حلقي من أقرب مصدر للطاقة، وسيتم ربطها على وحدة الربط الحلقي الرئيسة داخل محطة النفق التي ستكون بدورها مسؤولة عن تغذية المحولات الكهربية.

نظام التغذية الاحتياطية

يتم توفير مولدات ديزل احتياطية داخل محطة النفق للحفاظ على إمدادات الطاقة الكهربائية لأحمال الطوارئ وجميع الأحمال المتعلقة بأنظمة السلامة وفقًا لمعايير NFPA. في حال انقطاع التيار. في هذه الحالة، سيتم تشغيل المولد تلقائيًا بحيث لا يزيد انقطاع الطاقة عن الأحمال على 10 ثوانٍ وفقًا لمتطلبات NFPA 110.

يجب أن يوفر مولد الطوارئ مصدر طاقة لما يلي:

- 50% من حمولة إضاءة النفق.
- إضاءة الطوارئ.
- أنظمة الإنذار.
- نظم إدارة الدخان.
- أنظمة إخماد الحرائق.

نظام تغذية الطوارئ ـ وحدة تغذية كهربائية غير منقطعة (UPS)

يتم توفير وحدة تغذية كهربائية غير منقطعة (UPS) في كل محطة لتغذية الأحمال الدقيقة مثل الإضاءة في حالات الطوارئ، والإضاءة التوجيهية، أنظمة الأمان، أنظمة الإنذار، أنظمة إخماد الحرائق، ونظام الدوائر التلفزيونية المغلقة CCTV.

وهذا لضمان عدم انقطاع التيار نهائيًا عن هذه الأحمال وضمان عملها بصورة طبيعية في الفترة القصيرة، حتى يتم تشغيل مولدات القدرة الاحتياطية.

15-3 مراقبة الأنفاق وإدارتها وسلامتها

1-15-3 عام

تحتاج الأنفاق الطرقية الحديثة والطرق الموصلة إليها إلى منظومة تحكم مروري مركزية لتبقى آمنة. وطالما أن المتطلبات الخاصة تتغير، فإن الحد الأدنى من أنظمة التحكيم والمراقبة العامة التالية يكون عامًا لكل المتطلبات، ويجب أن تستخدم لتأمين ما يلي:

- مراقبة التدفق المروري: تراقب التدفق المروري وتحدد الازدحامات الوشيكة جراء الأعطال والحوادث؛
- البيئة أو المحيط الآمن: تحافظ على سلامة بيئة النفق الحساسة للكثافة المرورية وسرعة التنقل.
- الاتصالات: توصل الضوابط المرورية للسائقين.
- الاستجابة للطوارئ: تحريك الاستجابة المطلوبة لإزالة الحوادث من النفق.
- عمليات منظومات الطوارئ: إطلاق عمليات منظومات الطوارئ المطلوبة.
- الإشراف على معدات الخدمة: تشرف على حالة معدات النفق.

2-15-3 التصميم والتنفيذ

تعدُّ البيانات المجمعة التي يتم الحصول عليها من مجالات الهندسة المرورية، والتصميم الحاسوبي/الاتصالات، وتطوير البرمجيات ضرورية لتصميم المنظومة.

1-2-15-3 طريقة التصميم التقليدية

تتضمن هذه الطريقة إعداد المخططات التصميمية والمواصفات للمقاول المنفذ، لكنها تكون عادة ناجحة فقط عند التعاقد مباشرة مع مقاولي منظومات التحكم سابقي التأهيل.

2-2-15-3 طريقة مدير المنظومة

يتم التعاقد، مع مدير المنظومة لتصميم وإعادة عقود تأمين المشتريات والتركيب، وهو مسؤول عن تكامل المنظومة، وتوثيقها، والتدريب عليها، ويؤمن أيضًا البرمجيات المطبقة. تتضمن رزمة خدمات منظومة التحكم المتكاملة: دليل التشغيل، ودليل الصيانة، والتدريب، وتدابير الإمداد بفريق الإدارة لفترة محددة خلال بدء التنفيذ، والكفالة التي تضمن المسؤولية لفترة محددة، لكل المكونات المتضمنة كفالات المنتج الخاص بالجهة الصانعة التي يمكن أن تكون قد انتهت.

3-15-3 أمن النفق

يجب أن يرجع مصمم النفق بشكل خاص لـ FHWA/AASHTO التقرير الذي يحمل عنوان: «توصيات لأمن الجسور والأنفاق»؛ بتاريخ سبتمبر 2003.

16-3 التهوية

1-16-3 عام

يقصد بالتهوية الحماية من التلوث، وضمان الرؤية وفي حالة الحريق، تأمين مسالك النجاة، وضمان دخول فرق الإنقاذ وتقليل الأضرار. ويجب حساب الإمداد المطلوب من الهواء النقي بالتوافق مع التدفق المروري المتوقع لضمان عدم تجاوز التراكيز في (الشكل 3ـ 70: تراكيز بعض محتويات الهواءالشكل 3ـ).

تركيز CO	70 جزئي بالمليون (ppm)
تركيز NO_2	<1 جزئي بالمليون (ppm)
العتامة: معامل الإنطفاء	0.005 م $^{-1}$ عند سرعة المرور< 10 كم\ساعة 0.007 م $^{-1}$ عند سرعة المرور 10 كم\ساعة 0.009 م $^{-1}$ عند حركة سير متوقفة أو شبه متوقفة
سرعة الهواء (المتوسط على المقطع العرضي)	<11م/ثانية

الشكل 3 - 70: تراكيز بعض محتويات الهواء

ويُنتج المرور الطرقي الحد الأعلى من التلوث عند سرعات من 10 إلى 15 كم/ساعة. وإن زيادة عدد العربات المجهزة بالمحفزات يؤدي إلى إنقاص مهم في متطلبات الهواء النقي للأنفاق الطرقية والتي تعتمد على نسبة الشاحنات وعلى الميل الطولي للطريق.

وفي الأنفاق السككية (بشكل خاص خطوط المترو)، فإن التبريد، أي إزالة الهواء الساخن (الناشئ عن القاطرات مثلاً)، يعد مهمة أخرى للتهوية.

2-16-3 تقنيات التهوية

يمكن إبراز أربعة أنواع من تقنيات التهوية:

1-2-16-3 التهوية الطبيعية

يتم تحقيق هذه التهوية عن طريق فرق الضغط بين المداخل وأيضًا عن طريق عمل مكابس العربات.

2-2-16-3 المراوح

يجب تصميم مراوح تهوية النفق ومحركاتها وجميع المكونات المهمة لتشغيل نظام توجيه الدخان خلال حالة الحريق، والتي يمكن أن تتعرض لدرجات حرارة مرتفعة من الحريق، لتظل تعمل لمدة ساعة واحدة على الأقل عند درجة حرارة 250 درجة مئوية (482 ° F).

عندما تظهر حسابات التصميم المنفذة درجات حرارة أعلى، يجب استخدام درجات حرارة أعلى لاختيار المعدات.

مراوح تهوية النفق التي يمكن أن تتعرض مباشرة للنيران داخل طريق النفق، مثل المراوح النفاثة JET FANS، تعد معطلة، ويجب توفير مراوح إضافية للتعويض في حال حدث أي تعطيل.

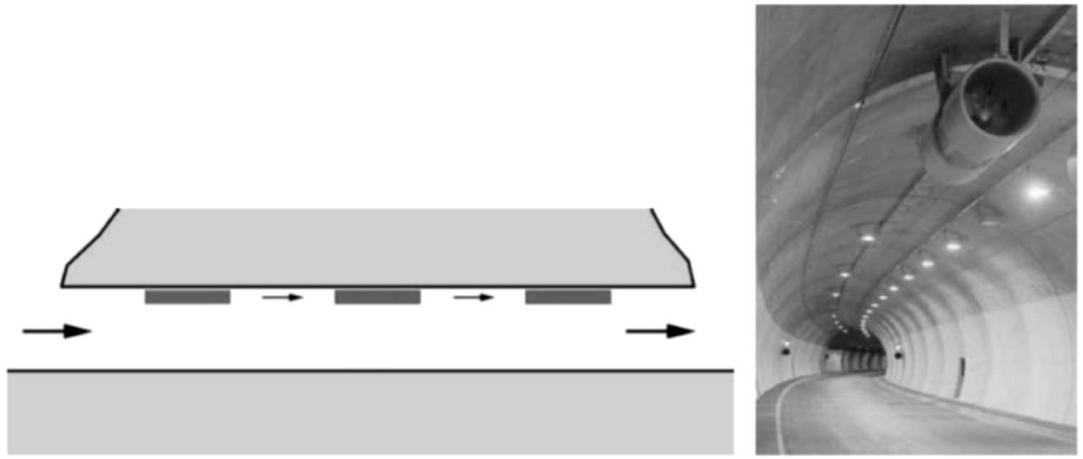
يجب أن يكون حجم التهوية في حالة الطوارئ مستوفيًا لمتطلبات الحد الأدنى للتهوية مع وجود مروحة واحدة خارج الخدمة، أو يجب توفير تدابير تشغيلية لضمان عدم تعريض سلامة الحياة للخطر بسبب عدم تشغيل مروحة واحدة خارج الخدمة.

يجب أن يكون نظام التهوية في حالات الطوارئ قادرًا على الوصول إلى وضع التشغيل الكامل خلال 180 ثانية كحد أقصى من التنشيط. ويجب أن تكون المراوح العكسية قادرة على إكمال الانعكاس الدوراني الكامل خلال 90 ثانية.

يجب وضع فتحات التفريغ ومخرج الهواء لمراوح الطوارئ بعيدًا عن أي فتحات سحب هواء للإمداد لمنع إعادة الدوران وإعادة إدخال الهواء الملوث إلى نظام التهوية. وعندما يكون الفصل غير ممكن، يجب حماية فتحات الدخول بوسائل أو أجهزة أخرى معتمدة لمنع دخول الدخان إلى نظام التهوية.

3-2-16-3 المراوح النفاثة (JET FANS)

تكون على مسافات متباعدة تساوي 10 أضعاف القطر الهيدروليكي للنفق تقريبًا وتنتج تهوية طولية. ويكون اتجاه عصف الهواء قابلاً للقلب. وتحقق مراوح التهوية الكبيرة دفعًا أكبر فيما يتصل بتكاليف التركيب.



الشكل 3 - 71: مراوح التهوية

4-2-16-3 التهوية الطولية

يقدم نظام التهوية الطولية الهواء ويزيل الملوثات والدخان من طريق النفق في عدد محدود من النقاط، مثل البوابات أو الأعمدة أو الفوهات أو غيرها من المواقع؛ ما يحدث تدفقًا طوليًا للهواء على طول طريق النفق.

يمكن تصنيف أنظمة التهوية الطولية على أنها تلك التي تستخدم المراوح المركزية وتلك التي تستخدم مراوح محلية أو مراوح نفاثة.

يجب أن يوفر نظام التهوية الحد الأدنى من سرعة الهواء لمنع انعكاس وعودة الدخان إلى اتجاه الحريق. تحسب السرعة الدنيى حسب المعادلة ادناه.

$$V_c = K_1 K_g \left(\frac{gHQ}{\rho C_p A T_f} \right)^{1/3}$$

$$T_f = \left(\frac{Q}{\rho C_p A V_c} \right) + T$$

معادلة سرعة الهواء الدنيى لمنع انعكاس الدخان

حيث،

Vc : سرعة الهواء الدنيى>(M/S)

K1 : رقم فراود (FROUDE NUMBER, FR). أنظر الجدول رقم 3 - 15.

Kg : عامل الميل. انظر الشكل 3ـ 27..

g : التسارع الناجم عن الجاذبية (M/S2).

H : ارتفاع النفق في موقع الحريق (M).

Q : حرارة النار المضافة مباشرة الهواء في موقع الحريق (KW).

ρ : متوسط الكثافة في الهواء (KG/M3).

Cp : الحرارة النوعية (KJ/KG.K).

A : مساحة المقطع العرضي للنفق.

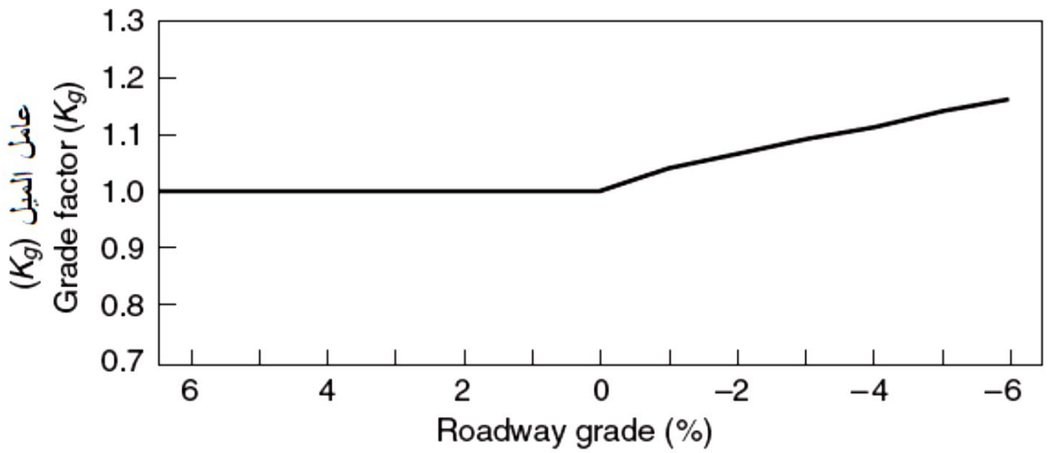
Tf : متوسط درجة حرارة غازات موقع الحريق (K).

T : درجة حرارة الهواء (K) .

الجدول رقم 3 - 21: مجموعة من قيم K1 التي تنطبق على معدلات إطلاق الحرارة المختلفة (HRRs)

مجموعة من قيم K_1 التي تنطبق على معدلات إطلاق الحرارة المختلفة (HRRs)
A Range of K_1 Values That Apply for Various HRRs

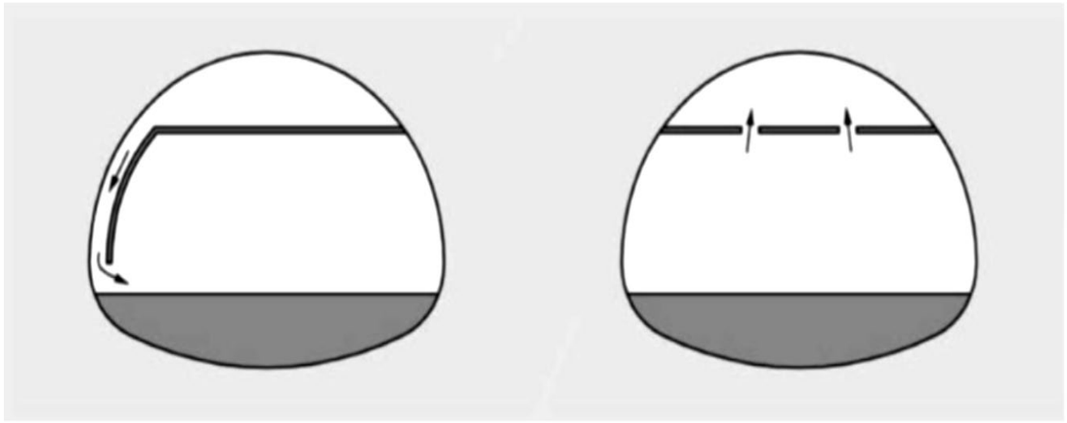
Q (MW)	K_1
>100	0.606
90	0.62
70	0.64
50	0.68
30	0.74
<10	0.87



الشكل 3 - 72: عامل الميل لتحديد السرعة الأدنى

5-2-16-3 التهوية شبه المستعرضة

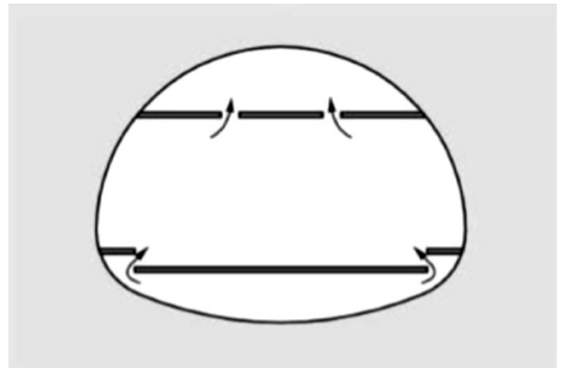
يتم التزود بالهواء النقي من ممرات خاصة عمودية على المحاور الطولية للنفق، في حين أن الهواء الملوث يهرب من المداخل (منظومة التزويد)، انظر الشكل 3 - 72 يسار. في حالات أخرى، فيتم استخراج الهواء المستخدم من أقنية خاصة (منظومة استخراج الهواء)، الشكل 3ـ 72- يميناً. بينما يدخل الهواء النقي عبر المداخل. ومن ثم، يوجد الهواء سيئ النوعية في منتصف النفق. وتصل سرعة الهواء إلى حدها الأعلى قرب المداخل. وهذا مناسب للأنفاق ذات حركة المرور ثنائية الاتجاه وحجم مروري متوسط.



الشكل 3 - 73: أمثلة على التهوية شبه المستعرضة (تزويد الهواء واستخراجه)

3-2-16-6 التهوية المستعرضة

يتم إدخال الهواء النقي ويتم استخراجه الهواء الملوث (الذي يتحرك نحو الأعلى) بشكل متعامد مع محور النفق (الشكل 3 - 74). ويتم استخدام أقنية هوائية ذات مقاطع عرضية، حيث لا يتم أخذ الحسابات الأيروديناميكية فقط في الحسبان، بل تؤخذ أيضًا الحاجة الملحة للدخول بهدف الصيانة. وهذا مناسب للأنفاق ذات حركة المرور ثنائية الاتجاه وحجم مروري مرتفع.



الشكل 3 - 74: أمثلة على التهوية المستعرضة

3-2-16-7 فتحات وقنوات التهوية

وقد تحتاج الأنفاق الطويلة إلى قنوات تهوية رأسية (الشكل 3 - 75 أو ممرات تهوية تكون محفورة بموازاة النفق. ويمكن الاستناد إلى الجدول رقم 3 - 22 لتحديد الحاجة إلى فتحات وقنوات التهوية بالنسبة إلى أنفاق الطرق.

أما بالنسبة لأنفاق السكك الحديدية، فيجب مراعات أماكن الفتحات بحسب أماكن وجود القطارات، حيث يكون هناك قطرٌ واحدٌ بين كل فتحتين متتاليتين لكل سكة، بوصف أن الطاقة الكهربائية قد تنقطع عن السكة في حالات نشوب الحريق.

الجدول رقم 3 - 22: جدول متطلبات فتحات وقنوات التهوية

نوع النفق	التهوية الطولية المسموح بها	
	بدون فتحات وقنوات التهوية	مع فتحات وقنوات التهوية
حضري/ مدني - أحادي الاتجاه		
أقل من 500م	نعم	-
بين 500م و 800م	نعم	نعم
أكثر من 800م	لا	نعم
حضري/ مدني - ثنائي الاتجاه	لا	لا
غير حضري/ مدني - أحادي الاتجاه - حركة مرور غير خفيفة		
أقل من 5000م	نعم	-
أكثر من 5000م	لا	نعم

3-2-16-8 حلول لتقليل إعادة دخول الهواء الملوث

بين بوابة الخروج وبوابة الدخول المجاورة لنفقين متجاورين معكوسي الاتجاه، قد يتم إعادة دخول الهواء بشكل كبير من نفق إلى الآخر. توجد المشكلة نفسها بين بوابة خروج النفق ومدخل الهواء النقي لمحطة تهوية لنظام شبه عرضي. في الأنفاق القصيرة ذات التهوية الذاتية العالية، قد لا يكون هذا مثار قلق، ولكن في الأنفاق الأطول يجب تقليل هذا التأثير. ومن ثم يوصى بما يلي:

في حالة عدم وجود رياح:

- **الحالة رقم 1:** مع وجود بوابتي نفق على الارتفاع نفسه ومسافة بين الجدران المجاورة تبلغ مترًا، يتم امتصاص نحو 15% من الهواء الملوث مع الهواء النقي الداخل إلى بوابة النفق المجاور. عند زيادة المسافة بين الجدارين المجاورين إلى 4 أمتار، تنخفض هذه النسبة إلى 2%.
- **الحالة رقم 2** :إن الجدار الفاصل بين بوابتي نفق (مسافة 1 متر) يقلل بشكل فعال من إعادة دخول الهواء الملوث: مع ارتفاع الجدار ليكون مساوي لارتفاع النفق وطول 5 أو 10 م، تقل إعادة دخول الهواء الملوث إلى 4% أو 2% على التوالي.
- **الحالة رقم 3:** إطالة بوابة نفق الخروج من 5 إلى 10 أمتار، يقلل نسبة إعادة دخول الهواء الملوث مقارنةً بإطالة الجدار الفاصل.

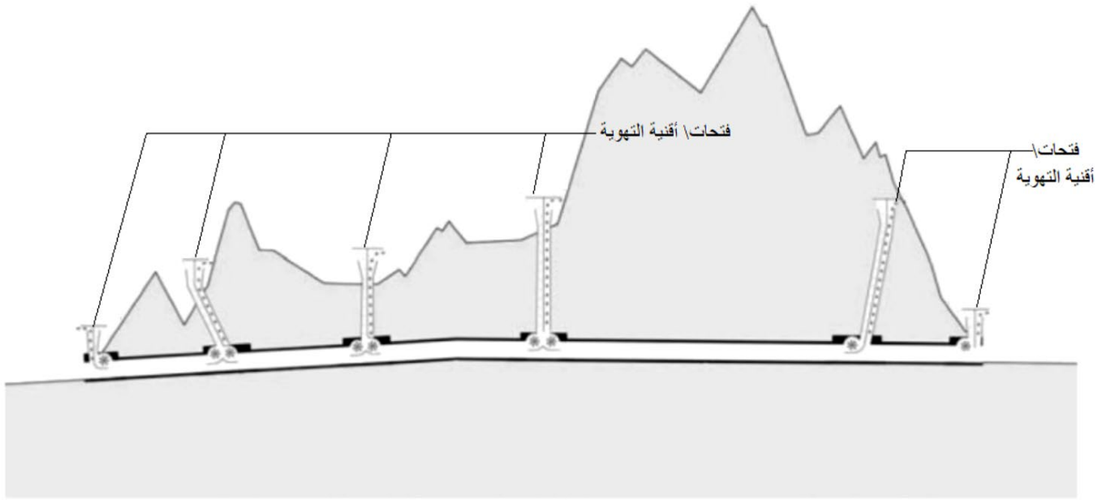
في حالة وجود رياح:

تزداد إعادة دخول الهواء الملوث بقوة عندما تدفع الرياح الهواء المتدفق الخارجة من النفق باتجاه بوابة النفق المجاورة.

- **في الحالة رقم 1 فوق:** تقوم رياح جانبية بمعدل نصف أو بنفس سرعة الهواء الخارجة من النفق بإعادة إدخالها إلى النفق المجاور إلى متوسط 30% وذروة تصل إلى 60%.

عندما يكون الطريق المفتوح بعد المدخلين فيما بين جدران، تصنع الرياح الجانبية دوامة على قسم الطريق المفتوح، ما ينتج عنه أيضًا إعادة دخول الهواء الملوث إلى النفق المجاور.

- **في الحالة رقم 2 فوق:** حيث الجدار الفاصل الذي يبلغ طوله 20 مترًا أو 40 مترًا، يبلغ الحد الأقصى لإعادة دخول الهواء الملوث إلى 40% أو 20% على التوالي مع وجود رياح جانبية.
- **في الحالة رقم 3 فوق:** حيث يتم إطالة إحدى البوابتين، لا يمكن تقليل تأثيرات الرياح إلا عندما تكون بوابة الدخول متقدمة على بوابة الخروج. عندما تكون بوابة الخروج متقدمة على بوابة الدخول، يتدفق الهواء الملوث بقوة إلى بوابة الدخول ويجب أخذه في الحسبان.



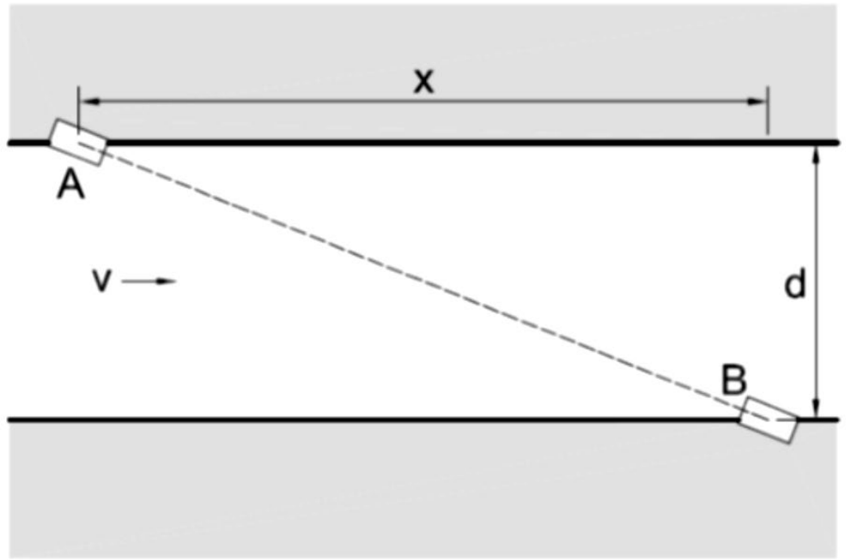
الشكل 3 - 75: مثال لمقطع لطولي تخطيطي للتهوية، مع فتحات \ ممرات أفقية

3-16-3 التحكم بالتهوية

يتم التحكم بنظام التهوية من خلال أجهزة التحكّم المنطقي القابلة للبرمجة، ويتم ربط تلك الأجهزة بمنظومة التحكم المروري المركزية بهدف مراقبتها وإدارتها. ويحدد عدد المراوح المطلوب تشغيلها (أو سرعة دوران المراوح) بناءً على قياس الكميات التالية:

3-16-3-1 سرعة الهواء داخل النفق) في حل استخدام نظام التهوية الطولية(

يتم قياس سرعة الهواء في النفق بمحولات طاقة فوق صوتية تسجل أزمنة التنقل للنبضات فوق الصوتية من A إلى B ومن B إلى A، على التوالي (الشكل 3 - 76). في حل عدم توفر متطلبات الفراغ اللازمة لتأمين قياس دقيق لسرعة الهواء (طبقًا لإرشادات المزود المتعلقة بالتركيب)، يمكن استخدام جهاز قياس مؤلف من قطعة واحدة)تحتوي على وحدات الإرسال والإستقبال معًا (مثبتة على أحد جانبي النفق.



الشكل 3 - 76: قياس متوسط سرعة الهواء،V

3-16-3-2 سرعة الرياح واتجاهها

يتم قياس سرعة الرياح واتجاهها بمحولات طاقة فوق صوتية تسجل أزمنة التنقل للنبضات فوق الصوتية من خلال استخدام أربع نقاط إرسال واستقبال مختلفة.(A, B, C, D)

3-16-3-3 درجة الحرارة

يمكن استنتاج درجة حرارة الهواء في النفق من سرعة انتشار الصوت التي يتم قياسها، أو مباشرةً باستخدام حساس الحرارة من نوع RTD. في أنفاق السكك المخصصة للقطارات الكهربائية، يمكن استخدام الألياف الضوئية وأشعة الليزر التي تتشتت بشكل متزايد، كلما ارتفعت درجات الحرارة بهدف قياس درجة الحرارة بكل نقطة على طول النفق.

3-16-3-4 عتامة الهواء

يتم قياس هذه الكمية بواسط فاقد حدة شعاع الضوء في هواء النفق، المعتم بالغبار، ودخان الديزل والأدخنة من إحراق المحركات.

لا يتوجب قياس عتامة الهواء في أنفاق السكك المخصصة للقطارات الكهربائية.

3-16-3-5 تركيز الملوثات

يعتمد قياس الإمتصاص النوعي للأشعة تحت الحمراء لتحديد تركيز COو تركيز NO2.

لا يتوجب قياس تركيز الملوثات في أنفاق السكك المخصصة للقطارات الكهربائية.

17-3 الحماية من الحريق

يجب أن توجد إجراءات مكافحة الحريق بشكليها المباشرة وغير المباشرة. فالإجراءات المباشرة تهدف لإطفاء الحريق بوسائل الكشف عن الحريق، وطفايات الحريق، ورشاشات الماء، والتهوية الطارئة ووسائل الاتصال. أما الإجراءات غير المباشرة فتهدف إلى تخفيض الضرر إلى الحد الأدنى، مثلاً، بوسائل الخرسانة المقاومة للحريق، والمواد الصناعية التي لا تنتج غازات سامة عندما تحترق، والكابلات الكهربائية الآمنة الموضوعة أسفل جسم الطريق، وأنابيب التصريف المستعرضة التي تجمع الوقود المتسرب، واستخدام المواد منخفضة المسامية (التي لا تمتلئ بالوقود) وأيضًا الإشارات الواضحة التي ترشد إلى مخارج النجاة.

ويجب التحقق من إجراءات الحماية من الحريق بالاختبارات. فاختبارات الدخان البارد سهلة ورخيصة نسبيًا. ولكن اختبارات الحريق الحقيقي فقط يمكن أن تقدم إثباتًا حقيقيًا على مستوى السلامة الذي يتم تحقيقه.

يجب أن يوفر نظام التهوية الطارئ وسيلة للتحكم في الدخان. في جميع الحالات، يجب أن يكون الهدف المنشود هو توفير مسار إخلاء لسائقي السيارات الذين يخرجون من النفق ولتيسير عمليات مكافحة الحرائق.

في الأنفاق المزودة بحركة مرور ثنائية الاتجاه، حيث يمكن أن يكون سائقو السيارات على جانبي موقع الحريق، يجب تحقيق الأهداف التالية:

- يجب عدم بعثرة طبقة الدخان.
- يجب الحفاظ على سرعة الهواء الطولي بمقاييس منخفضة.
- استخلاص الدخان من خلال فتحات السقف أو الفتحات العالية على طول جدران النفق تعتبر طريقةً فعالةً ويجب أخذها في الحسبان.

في الأنفاق التي بها حركة مرور أحادية الاتجاه، حيث من المحتمل أن يكون سائقو السيارات في أعلى موقع الحريق، يجب تحقيق الأهداف التالية:

الأنظمة الطولية:

- منع ارتداد الدخان من خلال إنتاج سرعة الهواء الطولي التي يتم حسابها على أساس السرعة الدنيا في اتجاه تدفق حركة المرور.
- تجنب تعطل طبقة الدخان في البداية عن طريق عدم تشغيل مراوح النفاثة الموجودة بالقرب من موقع الحريق. بالمقابل، يتم تشغيل المراوح الأبعد عن موقع الحريق أولاً.

الأنظمة المستعرضة أو شبه المستعرضة القابلة للعكس:

- تعظيم معدل السحب في منطقة التهوية التي تحتوي على النار وتقليل كمية الهواء الخارجي التي يتم إدخالها بواسطة نظام عرضي.
- إنشاء تدفق هواء طولي في اتجاه تدفق حركة المرور عن طريق تشغيل التهوية النقية في مناطق قبل موقع الحريق، وتشغيل السحب في مناطق بعد موقع الحريق.

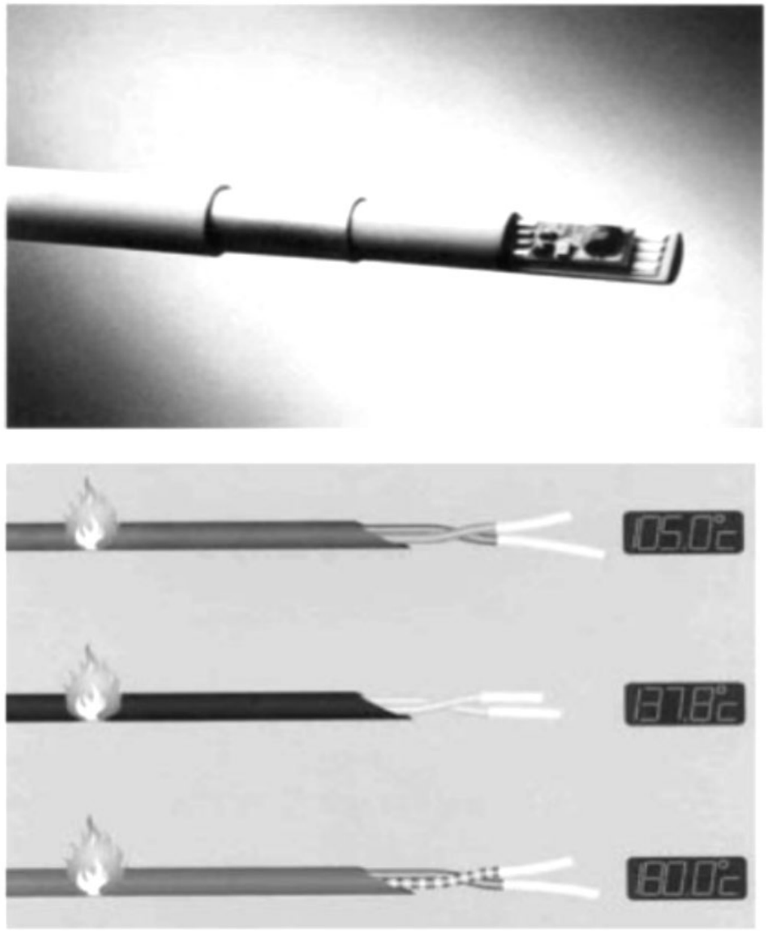
معدل إطلاق الحرارة (HRR) التي ينتجها الحريق يجب أن يعتمد على أنواع العربات التي يمكن أن تمر بالنفق.

1-17-3 كشافات ومطافئ الحريق

بالنسبة للأنفاق الطرقية، عندما يساوي النفق أي من الفئات"B" « باء» او "C" «جيم» او "D" « دال»، تنطبق جميع أحكام هذه المعايير لحساسات الحرارة حسب ما ينص عليه : NFPA 502

يجب تنشيط هذه الحساسات على طول كامل النفق وليس فقط عند نقاط منعزلة. وإلا فإن اكتشاف الحريق يمكن أن يتأخر.. ويكون مبدأ العمل بواسطة أي من:

- بالهواء المضغوط في الأنابيب النحاسية: تزيد درجات الحرارة الأعلى ضغط الهواء المحبوس في الأنابيب النحاسية. ويتم تسجيل زيادة الضغط هذه بواسطة محولات الضغط. وتستطيع كشافات الحريق المبنية على الألياف الزجاجية وأشعة الليزر (التي تتشتت بشكل متزايد عند درجات الحرارة الأعلى) أن تحدد موقع مصدر الحرارة بشكل دقيق و (بواسطة برمجية مناسبة) تستطيع أيضًا اكتشاف انتشار الحرارة (مثلاً، «الألياف الليزرية»).



الشكل 3 - 77 كابلات لكشف الحريق

- بأنظمة تلفزيون الدائرة المغلقة :يجب السماح بأنظمة تلفزيون الدائرة المغلقة المزودة بأجهزة دلالة على حركة المرور أو كاميرات مراقبة لاستخدامها في تحديد وتحديد مكان الحرائق في الأنفاق مع إشراف على مدار 24 ساعة.
- صناديق إنذار الحريق اليدوية : يجب تثبيت صناديق إنذار الحريق اليدوية المثبتة في العلبة (IP nema type 4 65) أو الصناديق المكافئة على فترات لا تزيد على 90 مترًا وعلى جميع الممرات المتقاطعة ووسائل الخروج من النفق.

كما أنه يجب يجب تثبيت لوحة تحكم إنذار الحريق المعتمدة (FACP) وفحصها وصيانتها وفقًا للمواصفة NFPA 72.

نظام الاتصالات في حالات الطوارئ ـ نظام تحسين الاتصال اللاسلكي: يتم تثبيت نظامي تحسين الاتصال بالراديو في النفق والمرافق الملحقة به حسب متطلبات السلطات المختصة التي تتمتع بسلطة قضائية أو بموجب قوانين حاكمة أخرى مطبقة. يجب تصميم أنظمة تحسين الاتصال عبر الراديو وتثبيتها واختبارها وصيانتها وفقًا لأحكام NFPA 72. وفي حال وجود مركز تحكم فإنه من الممكن قطع إرسال الإذاعة اللاسلكية لأجل إرسال رسالة طوارئ، أما بالنسبة لعملية الإخلاء في حال الطوارئ فإنه يستخدم مكبرات الصوت لإعلام مستخدمي النفق بالخطر.

مركز التحكم:

يجب توريد مركز تحكم لجميع الأنفاق التي يتجاوز طولها 3000 متر مع حجم مرور يتجاوز ألفي عربة للمسار وتكون عملية رقابة وتحكم العديد من الأنفاق متمركزة في مركز تحكم واحد.

2-1-17-3 حساسات الغاز

تسجل هذه الحساسات انخفاض محتوى الأوكسجين ووجود الغازات القابلة للاحتراق ونواتج الاحتراق السامة.

3-1-17-3 حساسات الدخان

تستطيع هذه الحساسات في الأنفاق الطرقية أن تتسبب بسهولة بانطلاق إنذارات كاذبة، وبناءً على ذلك تشغل التهوية بكامل طاقتها، والتي تكون باهظة جدًّا بسبب استهلاكها العالي للطاقة؛ لذلك ينطلب استعمال حساسات الدخان التالية لهذه الغاية:

1- الأنابيب النحاسية بالهواء المضغوط لكشف الحريق عوضًا عنها (فقرة 3-17-1 كشافات ومطافئ الحريق), مع

2- . أنظمة تلفزيون الدائرة المغلقة (فقرة 3-17-1).

4-1-17-3 حساسات اللهب

تسجل هذه الحساسات فقط ألسنة النار المفتوحة.

15-17-3 مكافحة النيران

الأنفاق الطرقية.

- بالنسبة للأنفاق الطرقية، فإن متطلبات مكافحة الحريق يجب أن تتبع ما ينص عليه الجدول رقم 3 ـ 15 وما ينص عليه NFPA 20، NFPA 14، NFPA 13، و NFPA 502.
- حيث تكون مطلوبة، يجب أن يكون نظام مكافحة الحريق (standpipe system) من نوع (Class I).
- يجب أن يكون نظام مكافحة الحريق (standpipe system) متصلًا بمصدر مياه معتمد قادر على توفير الطلب على النظام لمدة ساعة واحدة على الأقل.
- يجب وضع صمامات العزل (Isolation Valves) على مسافات لا تتجاوز 244m.
- وصلات قسم الأطفاء (Fire department connections) :
- يجب أن تكون وصلات قسم الإطفاء من النوع ثنائي الاتجاه أو ثلاثي الاتجاه.
- يجب أن يكون لدى نظام مكافحة الحريق وصلتي قسم الإطفاء، موجودتين بعيدًا من بعضهما بعضًا.
- يجب أن تكون وصلات قسم الإطفاء محمية من الضرر الذي تسببه المركبات عن طريق أعمدة حماية (bol-lards) أو الحواجز الأخرى المعتمدة.
- يجب اعتماد مواقع اتصال إدارة الإطفاء وتنسيقها مع مواقع الدخول ومواقع الاستجابة لحالات الطوارئ.
- وصلات خرطوم مياه الحريق (Hose connections):
- يجب أن تكون وصلات الخراطيم متباعدة بحيث لا يوجد موقع على الطريق المحمي على بعد أكثر من 45م منها.
- يجب ألا تتباعد وصلات خرطوم المياه عن 85م.
- يجب أن تكون وصلات الخرطوم موجودة بشكل واضح ومريح، ولكن لا تزال محمية بشكل معقول من التلف الذي تسببه المركبات أو المخربين.
- يجب أن تكون وصلة الخرطوم بحجم 65مم طبقًا للمواصفة NFPA 1963 والسلطة التي لها اختصاص.
- يجب أن تكون وصلات الخرطوم مزودة بأغطية حماية.
- يجب أن يكون الضغط عند وصلات الخرطوم ما بين 6.9bar و 12.1bar.

مضخات الحريق (Fire Pumps):

- يجب تثبيت مضخات الحريق وتفتيشها وصيانتها وفقًا لـ NFPA 20.
- نظام مكافحة الحرائق التلقائي (Automatic Fixed Firefighting System):
- طفاية الحريق المحمولة (Portable Fire Extinguisher) :
- يجب أن تكون طفايات الحريق المحمولة من نوع (2ـ A:20 ـB:C)، موجودة على طول الطريق في خزائن الحائط الموافق عليها، وعلى مسافات لا تزيد على 90م.
- لتسهيل الاستخدام الآمن من قبل سائقي المركبات، يجب أن يكون الحد الأقصى للوزن لكل مطفأة 9 كجم.
- يجب اختيار طفايات الحريق المحمولة تركيبها وتفتيشها وصيانتها وفقًا لـ NFPA 10.

الأنفاق السككية

- بالنسبة للأنفاق السككية، فإن متطلبات مكافحة الحريق يجب أن تتبع ما ينص عليه NFPA 13، NFPA 14، NFPA 20 و NFPA 130.
- حيث تكون مطلوبة، يجب أن يكون نظام مكافحة الحريق (standpipe system) من نوع (Class I).
- يجب أن يكون نظام مكافحة الحريق (standpipe system) متصلًا بمصدر مياه معتمد قادر على توفير الطلب على النظام لمدة ساعة واحدة على الأقل.
- يجب وضع صمامات العزل (Isolation Valves) على مسافات لا تتجاوز 244m.
- وصلات قسم الأطفاء (Fire department connections) :
- يجب أن تكون وصلات قسم الإطفاء من النوع ثنائي الاتجاه أو ثلاثي الاتجاه.
- يجب أن يكون لدى نظام مكافحة الحريق وصلتي قسم الإطفاء، موجودتين بعيدًا من بعضهما بعضًا.
- يجب اعتماد مواقع اتصال إدارة الإطفاء وتنسيقها مع مواقع الدخول ومواقع الاستجابة لحالات الطوارئ.

وصلات خرطوم مياه الحريق (Hose connections):

- يجب أن تكون وصلة الخرطوم بحجم 65 مم طبقًا للمواصفة NFPA 1963 والسلطة التي لها اختصاص.
- يجب أن تكون وصلات الخرطوم مزودة بأغطية حماية.
- يجب أن يكون الضغط عند وصلات الخرطوم ما بين 6.9bar و 12.1bar.

مضخات الحريق (Fire Pumps):

- يجب تثبيت مضخات الحريق وتفتيشها وصيانتها وفقًا لـ NFPA 20.
- نظام مكافحة الحرائق التلقائي (Automatic Fixed Firefighting System):
- نظام مكافحة الحرائق الثابت القائم على الماء في أنفاق السكك، يجب تركيبه وفحصه وصيانته وفقًا لـ NFPA 11، NFPA 13، NFPA 15،NFPA 16، NFPA 18، NFPA 18A، NFPA 25، NFPA 750، أو غيرها من المعايير الدولية المكافئة.
- يجب أن يكون الهدف من نظام مكافحة الحرائق الثابت القائم على الماء هو إبطاء معدل نمو الحرائق أو إيقافه أو عكسه أو التخفيف من تأثير الحريق لتحسين قابلية ركاب الأنفاق خلال فترة الحريق، وتعزيز قدرة المستجيبين الأوائل للمساعدة في الإخلاء والمشاركة في أنشطة مكافحة الحرائق اليدوية، ولحماية العناصر الهيكلية الرئيسة للنفق.
- يجب أن يأخذ التصميم في الحسبان شكل وأبعاد النفق، الأشياء المعيقة التي يمكن أن تعترض رذاذ الماء، وتأثيرات الأنظمة الأخرى، مثل نظام التهوية.
- يجب أن يكون نظام مكافحة الحرائق الثابت إما نظام (Deluge Firefighting System) أو نظام مكافحة حرائق ضبابي(Water Mist Firefighting Sytem).
- يجب أن تكون منطقة التغطية (Coverage Zone) قادرة على تغطية أطول مركبة تمر في النفق.
- يجب اعتماد عمل 3 مناطق تغطية (Coverage Zones) متتالية في الوقت نفسه، حيث تكون المنطقة الوسطة هي مكان استشعار الحريق.

طفاية الحريق المحمولة (Portable Fire Extinguisher) :

- يجب أن تكون طفايات الحريق المحمولة من نوع (2A:20B:C)، موجودة على طول الطريق في خزائن الحائط الموافق عليها، وعلى مسافات لا تزيد على 90م.
- لتسهيل الاستخدام الآمن من قبل سائقي المركبات، يجب أن يكون الحد الأقصى للوزن لكل مطفأة 9 كجم.
- يجب اختيار طفايات الحريق المحمولة تركيبها وتفتيشها وصيانتها وفقًا لـ NFPA 10.

18-3 نظام التصريف في الأنفاق والمعابر السفلية

1-18-3 عام

يجب أن تتوفر في الأنفاق شبكات لتصريف المياه سواءً لصرف مياه الأمطار أو المياه الناتجة عن عمليات مكافحة الحرائق والفضلات السائلة والانسكابات للسوائل الخطرة أو القابلة للاشتعال، أو مياه الغسيل، أو المياة الجوفية المتسربة إلى الداخل، وتجميعها في أماكن مخصصة لذلك ضمن مكونات النفق.

يجب أن تكون الفراغات والمساحات الجانبية بالنفق كافية لوضع وتركيب خطوط تصريف وخنادق لجمع المياه على جانبي الطريق داخل النفق.

2-18-3 معايير تصميم التصريف

يجب أن يتم تصميم أنظمة التصريف على معدل التدفق المتوقع والصحيح (معدل التدفق وقت الذروة في حالة مياه الأمطار) للماء المراد تصريفه من النفق. توجد تفاصيل دقيقة عن التصريف في الأنفاق، ومحطات ضخ التصريف، ومضخات التصريف، ومعالجة المياه، والحماية من الفيض في.(1996) .BICKEL ET AL

3-18-3 التصريف

يجب أن تصمم شبكة التصريف في النفق بحيث تكون قادرة على تجميع الماء وتصريفه من النفق. ويجب تنفيذ شبكة التصريف الطرقي للتأكد من أن سطح الطريق يبقى جافًا، وأن الماء يستطيع الجريان دون إعاقة من طبقة ما تحت الأساس المجهزة للحفاظ على خواص قدرة التحمل لطبقًات الرصف.

عند الاقتضاء، يتم تصميم نظام التصريف على حد أدنى لمعدل تدفق يكون شاملًا معدل انسكاب الوقود أو السوائل الخطرة الأخرى، ومعدل تصريف الماسورة العموديّة STANDPIPE SYSTEM DISCHARGE، و أي معدل تصريف ثابت لنظام مكافحة الحرائق ومياه الأمطار وغسل الأنفاق وأي مياه من أحواض تصريف أخرى تساهم في شبكة تصريف مياه النفق.

4-18-3 إزالة الماء

يجب أن يقوم نظام التصريف بجمع الماء وإزالة الماء عن جسم الطريق ومنطقة الطريق بالكامل من الماء السطحي لتجنب حدوث فيض في النفق والمشاكل الأخرى المرافقة له. حيثما كان ذلك ممكنًا، يجب أن يتم تصميم منظومة تصريف المياه السطحية في النفق لتقوم بجمع ومعالجة انسكابات السوائل الخطرة أو السامة أو القابلة للاشتعال، بحيث لا يمكنها أن تنتشر أو تسبب انتشار للهب في النفق وقت الحريق.

حيثما كان ذلك ممكنًا، يجب استخدام قنوات تصريف خندقية بغطاء شبكي لاعتراض وتجميع مياه الأمطار قبل أي نفق أو معبر سفلي، مثل ACO مونوبلوك أو أي نوع مماثل، بدلاً من مصائد مياه الأمطار ومواسير الصرف التقليدية؛ الهدف من ذلك هو أن يمنع أو يحد نظام تصريف المياه السطحية للطريق والمناطق الواقعة خارج النفق مياة العواصف من دخول النفق.

ويجب أن يتم التواصل والاهتمام بطرق توصيل مياه الصرف للمصبات وذلك بالتشاور مع مهندس البلدية المسؤول عن التزويد بالماء وبتفاصيل شبكة المجارير، والمهندس المسؤول عن الحماية البيئية في الإدارة الإقليمية الملائمة.

5-18-3 حجز الرمال وعزل المواد القابلة للاشتعال

تحدد متطلبات السلامة و الحماية من الحرائق حسب العوامل الموصوفة في أحدث إصدار للوكالة الوطنية الأمريكية للحماية من الحرائق NFPA 502.في هذا الإصدار، يتم تزويد نظام تصريف مياه الأنفاق بأحواض أو غرف تفتيش لحجز الرمال والرواسب ولعزل المواد القابلة للاشتعال (حتي لا تنتشر في شبكة التصريف) حسب تصنيفات الحد الأدنى لمتطلبات السلامة والحماية من الحرائق التي تعتمد علي طول النفق. يجب أن تكون تلك الأحواض ذات سعة كافية لحجز كل الكميات الناتجة من الرمال والمواد القابلة للاشتعال والسماح بالزمن الضروري لترسيب الرمال العالقة بالماء.

6-18-3 التزود بالماء

يجب أن تحدد في المواصفات التقنية الحاجة لصنابير المياه لغايات التنظيف، وصنابير الحريق بالإضافة إلى تحديد أماكنها وسعتها أو قدرتها.

7-18-3 خزان (أو صهريج) التخميد

يتم تزويد نظام التصريف بخزان (أو صهريج) للتخميد عادة ما يتم ضمه لمحطة ضخ مياة التصريف ودمجه معها في منشأ موحد، ويكون هذا المنشأ أو لا يكون متكاملاً مع الهيكل السفلي للنفق. عملية التخميد هي عملية تخزين مؤقت للمياه السطحية في غرفة ذات سعة مناسبة تحت مستوى سطح الطريق قبل محطة الضخ. يجب أن تكون هذه الغرفة بحجمٍ كاف لاستيعاب الجريان المحسوب خلال فترات ذروة هطول الأمطار. ثم يتم ضخ المياه المخزنة تدريجيًّا بطريقة مسيطر عليها في شبكة المياه السطحية أو المجاري المائية خارج النفق؛ ما يقلل بشكل فعال من خطر فيضان الماء داخل النفق.

يجب أن تكون سعة تخزين خزان التخميد كافية لاحتواء الجريان السطحي لعاصفة ذات فترة معاودة (فترة تكرارية) تبلغ 50 عامًا وتستمر لمدة 24 ساعة. عندما تكون هناك إمكانية لغلق النفق أو المعبر السفلي وتحويل حركة المرور.

قد يتم تخفيف معايير تصميم التخزين من 24 ساعة إلى ساعتين ولعاصفة ذات فترة معاودة 50 عامًا بافتراض فشل مضخات التصريف في العمل. يجب أن يضاف حجم التخزين في حالة الطوارئ علي أي جحم مُوازِن يمليه تصميم المضخات. في هذه الحالة، يملك طاقم التشغيل والصيانة فترة لا تقل عن ساعتين للاستجابة واتخاذ الإجراءات التصحيحية اللازمة وتنفيذها قبل بدء الفيضان داخل النفق.

تستخدم خزانات التخميد ومحطات الضخ فقط لتصريف أدنى مساحة تصريف للنفق أو المعبر السفلي. حيثما أمكن، يجب صرف أي مساحات كبيرة أخرى للطرق الأعلى من النفق أو المعبر السفلي على شبكة الصرف السطحي.

يجب إجراء تقييم في حالة استخدام منشآت مظلية (واقية من المطر) إضافية علي المنحدرات بعرض نهر الطريق (طريق المركبات) عند منافذ النفق أو المعبر السفلي لتقليل الجريان السطحي الذي يتم جمعه داخل النفق. يجب أن يأخذ أي نظام للمظلات الحسبانات الواجبة للسلامة والحماية من الحرائق. يجب عدم تطوير أي تصميم للمظلة قبل اعتماد دراسة الجدوى من قبل المسؤول الإداري والمهندس الاستشاري.

يجب أن يتيح موقع خزان تخميد ومحطة الضخ وتصميمهما إمكانية الوصول الآمن لطاقم الصيانة بما في ذلك الوصول الآمن للمركبات وركنها لعمل الصيانة ولتسهيل إزالة أو استبدال أي أجهزة ميكانيكية وكهربائية ولعمل الفحص الدوري وتنظيف الغرف.

القدرة على تشغيل وصيانة الخزان بأمان أمر ضروري. يجب أن تتم مراعاة قواعد التشغيل الآمن وسهولة الصيانة عند تصميم خزانات التخميد. حيثما أمكن، يجب إدراج المعايير التالية في تصميم الخزان. هذه القائمة ليست شاملة بأي حال من الأحوال، لكن الغرض منها استخدامها للنظر في تصميم أولي:

- توفير فتحات كافية للسماح بالتهوية.
- توفير دخول آمن إلى الأماكن المحصورة.
- وتوفير امتداد مناسب للبصر داخل المنشأ.

يجب وضع دليل تشغيل وصيانة لكل خزان تخميد ومحطة ضخ. يجب أن يشمل ذلك إجراءً لإغلاق النفق أو المعبر السفلي مع أو دون مساعدة من نظام النقل الذكي (إن وجد). يجب مراجعة هذا الدليل من قبل إدارة التشغيل والصيانة قبل إنشاء وتسليم المنشأة.

7-18-3 الشروط المسبقة

يجب ألا تكون أنظمة التصريف، وأنظمة التخلص من المياه، والتزويد بالماء عرضة للضرر بسبب التجمد. ويمكن تحقيق الحماية ضد التجمد بوضع الوسائل أسفل عمق اختراق الصقيع أو في فراغ محمي من الصقيع أو بوسائل العزل. وإذا تم تحقيق الحماية من الصقيع بوسائل العزل، فإنه يجب الأخذ في الحسبان الحرارة المتاح على الجانب الساخن من العزل.

إذا كان سيعاد استخدام ماء التصريف بوسائل الترسيب أو تحليله لتحديد تركيبه الكيميائي، فإنه يجب تركيب منظومتي مجارير منفصلتين، واحدة لمياه الصرف والأخرى للمياه السطحية.

3-7-18-1 التصريف

يجب أن تقدر كميات مياه الصرف في الأنفاق الصخرية على أساس تقدير الكتلة الصخرية وقياسات تسرب المياه إلى النفق والعزل المائي المستخدم.

ويجب أن تكون قنوات التصريف الجانبية وغرف التفتيش مهيأة ومتصلة بخطوط التصريف السفلية وذلك على مسافات بينية لا تتجاوز 100م.

الأنفاق الصخرية

يجب أن يكون مقطع الأرض النظري للحفرية بميول عرضية نحو 2%. ويجب أن تكون قنوات التصريف الجانبية أو المصائد المطرية عند أخفض نقطة من أرضية النفق بمنسوب مقلوب مقداره متر واحد على الأقل أسفل جسم الطريق. وفي العادة توضع المصارف الجانبية، وأنابيب التجميع، والأنابيب الأخرى في خندق طولي مفتوح بشكل منفصل على طول أحد الجدران الجانبية للنفق. ويجب وضع طبقة بسماكة 0.3م على الأقل، مكونة من مادة مسامية، تحت طبقًات الرصف حتى تتوافق مع متطلبات التصريف الجانبي. ومن ثم فإن هذا يتحقق حيث يتم تفجير الصخر حتى منسوب 0.3م على الأقل تحت المقطع النظري للأرض على مقاطع 5م.

ويجب أن توصل أنابيب التصريف إلى أنابيب التجميع (أنابيب المياه السطحية) بواسطة الأخاديد. ويجب أن تركب المخارج من أنابيب الصرف على مسافات لا تتجاوز 200م.

وبشكل طبيعي سيجري الماء خارج النفق بتأثير الجاذبية أو إلى محطات الضخ المركبة عند المناطق المنخفضة من النفق. ويجب أن يكون بالإمكان قياس معدلات تدفق الماء ونوعية المياه في محطات الضخ.

ولا يمكن تحديد الامتداد النهائي لوسائل التصريف حتى يتم تنظيف الكتل الصخرية المفجرة.

الأنفاق على طبقة تربة ما تحت الأساس.

يجب تصميم منظومات التصريف حسب أدلة الآشتو.

الأنفاق الخرسانية.

يجب تركيب المصارف الأرضية على مسافات منتظمة لا تتجاوز 20م.

3-7-18-2 إزاحة الماء

يجب أن تركب قنوات التصريف الخندقية التي تجمع المياه السطحية في الأنفاق ويتم توصيلها بالأنابيب الطولية. ويجب تصميم قنوات التصريف الخندقية، بحيث يتم منع انتشار الحريق إلى الأنابيب المتجهة للخارج.

ويجب أن تكون قنوات التصريف الخندقية عادة مزودة بخزانات ترسيب وموانع تسرب للمياه. ويجب أن تكون غرف التفتيش أيضًا مزودة بخزانات ترسيب وموانع تسرب للمياه. ويجب أن تكون المسافة بين القنوات الخندقية بحيث لا تتجاوز مساحة منطقة تجميع المياه لكل قناة 250م2، وبحيث لا تتجاوز المسافة بالاتجاه الطولي 20م. ويجب الاهتمام

بدرجات الانحدار الطولي والميول العرضية لتقليل طول مسار الجريان إلى الحد الأدنى. ويجب تركيب القنوات الخندقية خارج المسارب المرورية.

ويجب أن يتدفق الجريان السطحي للماء بشكل طبيعي نحو جانب النفق، وذلك، من دون الدخول إلى مسالك طوارئ النجاة. وإذا لم يتم تحقيق ذلك، فإنه يجب تركيب قناتين خندقيتين أو أثلام مغطاة «ضد التيار» عند المداخل لتخفيض خطر السوائل المشتعلة العابرة للمدخل. ويمكن استخدام الأثلام المغطاة بدلًا من القنوات الخندقية، يجب أن تكون إمكانيات تسوية تغطية الأثلام وتغطية القنوات الخندقية نفسها في كلتا الحالتين.

ويجب أن يتوافق تصميم التصريف النفقي حيث يتم الفصل بين الماء والزيوت وفصل الغاز والنفط عن مياه الصرف؛ وبشكل نموذجي، وقبل تفريغ مياه الصرف إلى المنظومة المصممة، تمكن فرازات الماء والنفط من تفكيك البنزين والزيت المتدفقين، اللذين يطفوان إلى السطح، مسهلة الإزالة والتخلص الصحيح منهما.

ويجب تحديد المعدلات التصميمية لتدفق المياه بالنسبة لخطوط أنابيب نظام التصريف في المواصفات الفنية.

3-7-18-3 الأحواض

ويجب أن تركب أحواض الضخ ومحطات الضخ في المناطق المنخفضة من النفق. وعند الضرورة، فإنه يجب تصريف المياه السطحية بعيدًا عن أحواض الترسيب. ويجب إعداد أحواض الترسيب بمانعات التسرب المائية، ومصائد الزيت ووسائل التنظيف. ويجب أن يكون بالإمكان إغلاق التفريغ عن أحواض الترسيب حيث يمكن تحليل السوائل.

ويجب أن تكون الحاجة للتطهير قبل حدوث المعالجة الإضافية للسوائل مبنية على نتائج تحليل نوعية السوائل.

ويجب أن تحدد معدلات تدفق الماء، وكميات المياه وزمن الترسيب، الذي يجب أن يكون أساس تصميم أحواض الترسيب بالمواصفات الفنية.

ويجب افتراض زمن الترسيب الطبيعي بحيث يكون 36 ساعة.

3-7-18-4 التزود بالماء

يجب أن تحدد معدلات تدفق المياه التي يجب أن تكون أساس تصميم منظومة شبكة الأنابيب في المواصفات التقنية.

3-18-8 التصميم

ستكون المياه الفائقة أو مياه إطفاء الحريق بشكل طبيعي عوامل تصميمية لمنظومات إزالة المياه في الأنفاق.

ويجب أن تصمم حماية أنابيب التزود بالماء والصرف الصحي المحقونة في المنشآت الخرسانية من التجمد بناء على الحد الأعلى لمحتوى البرودة.

ويجب أن تصمم حماية أنابيب التزود بالماء والصرف الأخرى من التجمد بناءً على متوسط محتوى البرودة.

9-18-3 المواد

يجب أن تصنع القنوات الخندقية وأغطية المجاري الجانبية لتصريف المياه السطحية من مواد غير قابلة للاحتراق.

ويجب أن تكون القنوات الخندقية في ألواح القاعدة الخرسانية بين جدران النفق ذات فتحات في الجزء العلوي من القنوات، أو الأغطية بحيث تستطيع أن تعمل كمصارف أرضية.

ويجب أن تكون أغطية غرف التفتيش مهيأة بوسائل قفل أو بحيث تمنعها من التحرك من مكانها.

19-3 محطات الضخ والمتطلبات الميكانيكية

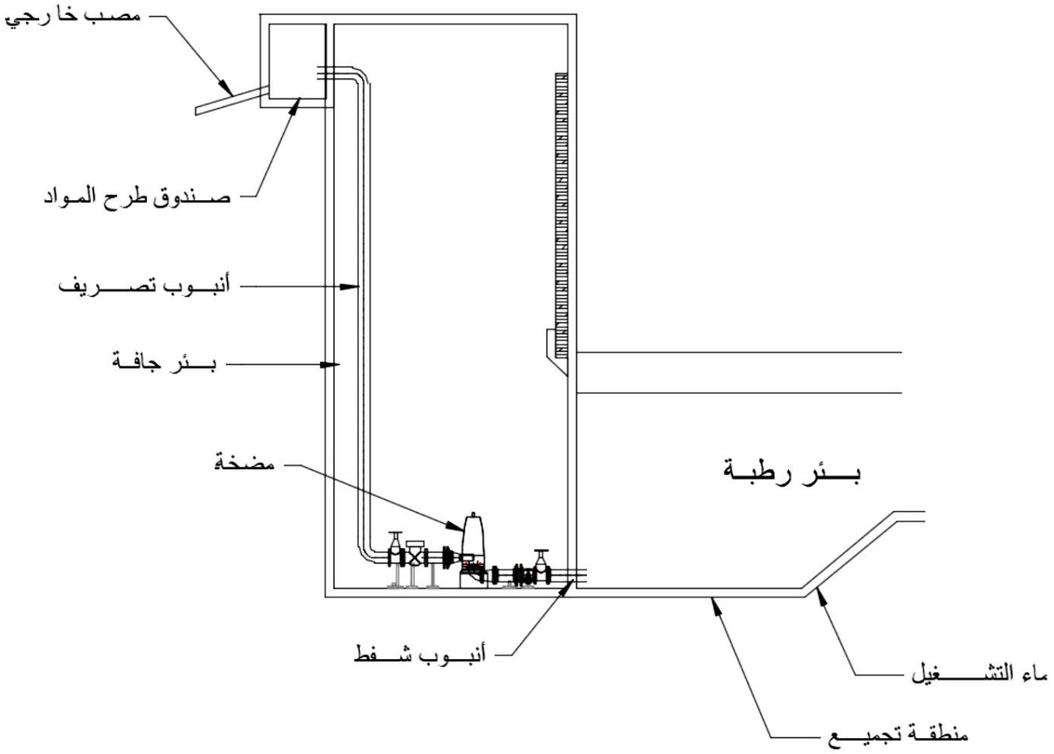
1-19-3 الحاجة لمحطة ضخ (تصريف) مياه السيول

تُعد محطة الضخ ضرورية لإزالة مياه السيول عن مقطع الطريق الذي لا يمكن فيه تصريف المياه بالانحدار أو بالجاذبية. بشكل عام تعد محطات ضخ مياه السيول باهظة تكاليف التشغيل والصيانة، ولها عدد من المشاكل التي يجب أن تُعالج؛ لذلك يوصى باستخدامها فقط عند عدم توفر أي حل عملي آخر للتصريف، ومن بدائل محطات الضخ: السيفونات، أحواض الترسيب، أنظمة التصريف العميقة والطويلة والأنفاق.

2-19-3 مكونات محطة الضخ

1-2-19-3 مقدمة

يحدد هذا الفصل المكونات الرئيسة لمحطة الضخ، والشكل 3. يوضح محطة الضخ بمكوناتها الرئيسة



الشكل 3 - 78: مكونات محطة الضخ الرئيسة

2-2-19-3 نظام التجميع

تنقل المياه من منطقة التصريف والخنادق الجانبية إلى محطة الضخ بنظام يتكون من مصارف، قنوات، مداخل وأنابيب تشكل جميعها نظام التجميع.

3-2-19-3 وحدة التخزين

تُصمم العديد من الأنظمة حيث تحتوي على منطقة تخزين ومضخات المياه.

4-2-19-3 الآبار

تتكون كل المحطات من غرفة (بئر رطب) تُضخ منها مياه السيول، وتعرف المحطات التي توضع فيها المضخات في البئر الرطب بمحطات التجويف الرطب. وتستخدم بعض المحطات آبار منفصلة (آبار جافة) لاحتواء المضخة وناقل الحركة، وتعرف بمحطات التجويف الجاف.

5-2-19-3 المضخات

المضخات عبارة عن أجهزة تقوم بزيادة الضغط الإستاتيكي للسوائل، بمعنى آخر تصنيف المضخات الطاقة لجسم السائل لتحريكه من نقطة إلى أخرى، ويمكن أن تتحقق الزيادة في الضغط الإستاتيكي بعدة طرق، ويجب أن يُحدد عدد المضخات ونوعها بناءً على كمية المراد نقلها إلى نظام التصريف الخارجي أو نقطة النهاية (المصب الخارجي).

6-2-19-3 وحدة التحكم

يتم التحكم بمحطات الضخ من خلال أجهزة التحكّم المنطقي القابلة للبرمجة، ويتم ربط تلك الأجهزة بمنظومة التحكم المروري المركزية بهدف مراقبتها وإدارتها. تقوم وحدة التحكم بتشغيل المضخات بشكل متناوب استجابة لارتفاع مستوى المياه إلى الحد في غرفة التجميع، وتنظم الوحدة عمل المضخة حتى يتم إخلاء البئر الرطب من المياه. يجب أن تتضمن لوحة التحكم جميع المرحلات والمكونات اللازمة لتشغيل المضخات بشكل مباشر من خلال عوامات منسوب المياه، في حال إخفاق أجهزة التحكّم المنطقي أو حساس منسوب المياه.

تزود كل مضخة بحساسات الضغط (قبلها وبعدها) بهدف حمايتها ومراقبة حسن عملها.

7-2-19-3 غرفة المحطة

يجب أن تتضمن الغرفة النموذجية لمحطة ضخ مياه السيول كل الوسائل التي تسهل وصول المهندسين والعمال لتشغيل المحطة وصيانتها.

ميزات عامة لغرفة المحطة:

- التهوية.
- الأبواب والبوابات.
- السلالم.
- الرافعات.
- وسائل الأمن والسلامة.

8-2-19-3 مضخة القاع

تركب مضخة القاع في بعض الأحيان عند قاع البئر الرطب للمحطات ذات التجويف الرطب والتجويف الجاف. وتستعمل مضخة القاع لضخ المياه المتبقية في البئر عند انخفاض مستوى المياه فيه، وعندما تصبح المضخات الرئيسة غير فعالة في سحبه. ويمكن أيضًا لمضخة القاع إزالة المواد الصلبة المتراكمة مثل الطمي والرمل والأنقاض التي تتراكم تدريجيًا في قاع البئر.

9-2-19-3 مزود الطاقة

تُعد الطاقة الكهربائية أكثر مصادر الطاقة اقتصادًا وموثوقية عند توفرها. فمحركات الديزيل متوفرة أيضًا في حالة عدم توفر خدمة الطاقة الكهربائية أو في حالة عدم استقرار الخدمة.

تحتاج محطات الضخ أيضًا إلى مصدر طاقة احتياطي. وتختلف الحاجة إلى وحدة احتياطية من محطة لأخرى، ويجب اتخاذ القرار بناءً على اعتبارات السلامة والتكلفة.

10-2-19-3 خصائص الأمن والوصول

1. الأمن

تحتوي محطات الضخ عادة على ميزات لتأمينها من دخول الموظفين غير المصرح لهم وتقليل خطر التخريب. ويمكن تحقيق ذلك بوضع عدد قليل من النوافذ في التصميم، وعمل سياج وإضاءة خارجية، وإخفاء المعدات الباهظة الثمن وتركيب إنذار للدخول غير المصرح.

2. الوصول

تتضمن خصائص الدخول النموذجي ما يلي:

- خارج نطاق الطرق السريعة والطرق الداخلية أو طرق الخدمة.
- توفر المواقف.
- توفر مناطق التحميل.

11-2-19-3 سمات أخرى

1. الرافعات

تركب الرافعات عادة فوق السلال الشبكية والمضخات الغاطسة أو مضخات ومحركات، ومواقع أخرى يتم فيها رفع ماكينات ومعدات ثقيلة.

2. مصافي القمامة

تثبت مصافي القمامة عند مداخل البئر الرطب لمنع دخول الأنقاض الكبيرة، حيث يمكن استعمال المصافي العامودية عند مدخل البئر الرطب.

3-19-3 أنواع محطات المضخات

إن جميع أنواع المحطات يجب أن تحتوي على مضخة احتياطية، حيث تكون جميع المضخات متناوبة.

1-3-19-3 المحطة ذات التجويف الرطب

تتكون المحطة ذات التجويف الرطب من بئر رطب أو عدة آبار رطبة وغرفة للمضخة. وبشكل عام، تنفذ التجاويف الرطبة بقيسون دائري أو مستطيل. ويمكن تركيب المضخات العمودية أو الغاطسة في البئر الرطب للمحطة ذات التجويف الرطب.

1. المضخات الغاطسة في الآبار المستطيلة

يوفر التجويف المستطيل أفضل ظروف للجريان إلى داخل المضخة الغاطسة. ويعتمد عدد دورات المضخة في ساعة وعدد المضخات في تحديد حجم المياه المطلوبة في التخزين. كما أن عدد دورات المضخة يحدد حسب حجم محرك المضخة الذي يمكن التأكيد عليه مع مصنع محرك المضخة.. ويتم تعليق المضخة بسكة حديد ويمكن رفعها بواسطة فتحات في أعلى البئر الرطب. وتساعد حوائط التقسيم على توزيع التدفق الداخل وتقلل من إمكانية حدوث الدوامات المائية.

أ. المعرفة

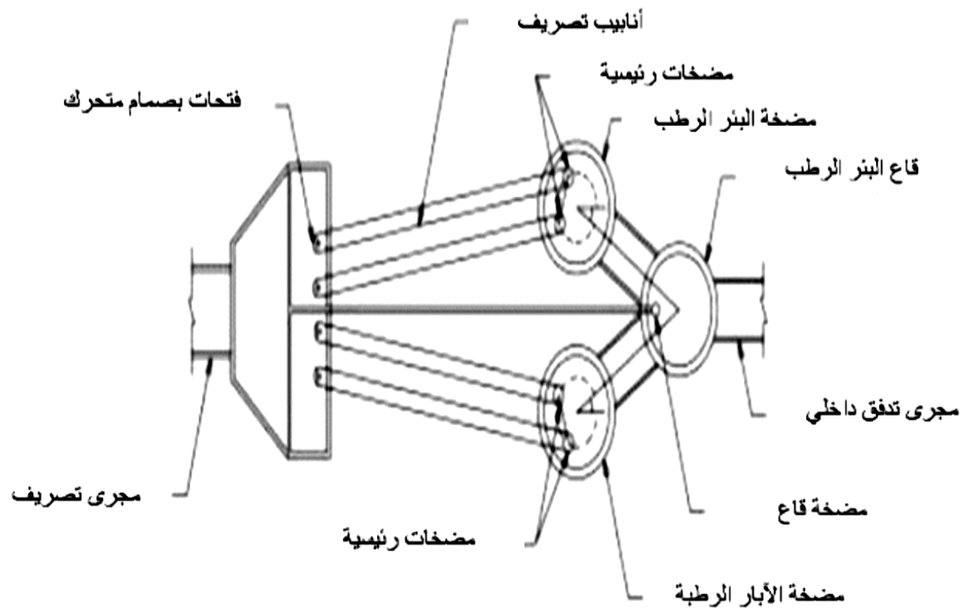
لا يستلزم أن يظهر أي عنصر من عناصر البئر الرطب على سطح الأرض، لذلك تستخدم غرف منفصلة لوحدة التحكم والمولدات والمعدات الأخرى. وتعد اعتبارات الاستقامة (المحاذاة)، وتوزيع التدفق والخلوص مماثلة لما وصف هنا. ومن المفضل والشائع استخدام تجويف منفذ الدخول.

ب. غرفة المدخل

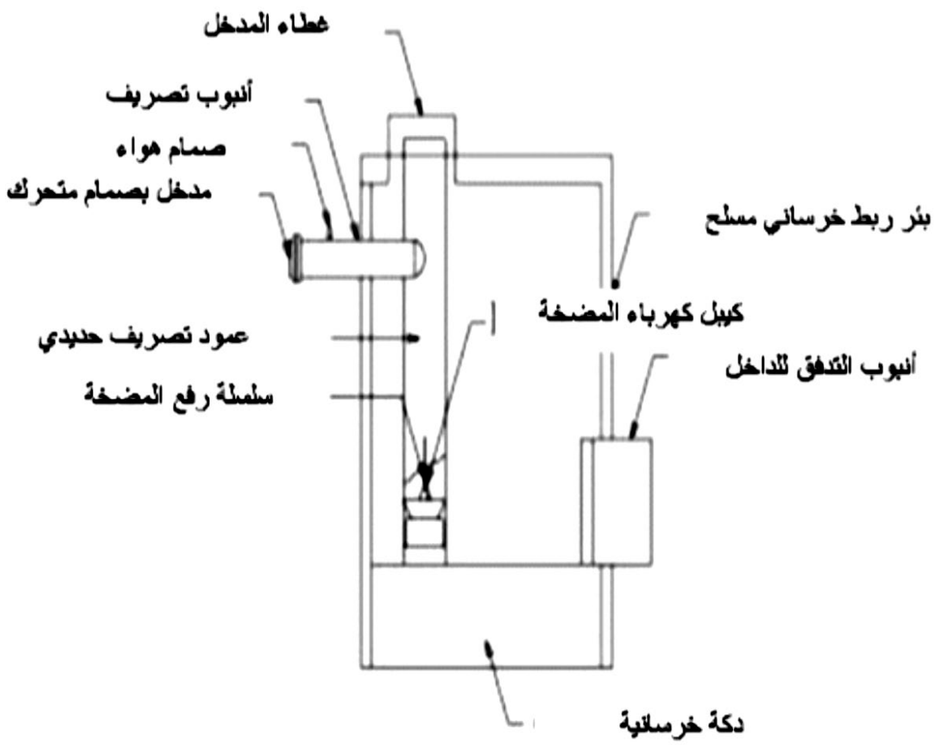
تمنع غرفة المدخل التيار الداخل من التدفق مباشرة إلى غرفة المضخة حاملاً معه الهواء. وقد يستخدم بروز أو حاجز معلق عند مدخل الأنابيب لمنع التدفق المباشر للمياه الداخلة إلى غرفة المضخة. وأن حائط الاعتراض يضمن تقسيم الجريان بشكل منتظم إلى داخل المضخة تجنبًا لحدوث الدوامات المائية.

2. المضخات الغاطسة في الآبار الدائرية

يتم عادة تثبيت مضختين في البئر على الرغم من أن مضخة واحدة قد تفي بالغرض. ويبين الشكل 3. عينة لمضخات غاطسة في عدة آبار دائرية. ويعمل البئر الرطب الأول (9) كقاع لمضخة القاع، ويعمل البئران الآخران كغرفة للمضخات الأخرى. ويظهر الشكل 3. مخطط للمضخات الغاطسة في البئر الدائري.



الشكل 3 - 79: مثال لمضخات غاطسة في عمق دائري



الشكل 3 - 80: مخطط للمضخات الغاطسة في البئر الدائرية

أ. متطلبات التخزين

ويعتمد عدد دورات المضخة في ساعة وعدد المضخات في تحديد حجم المياه المطلوبة في التخزين. كما أن عدد دورات المضخة يحدد حسب حجم محرك المضخة والذي يمكن تأكيد عليه مع مصنع محرك المضخة.

ب. صفات المضخة

في العادة يكون للمضخات الغاطسة شفط سفلي وتصريف جانبي، ويُثبت المحرك عادة بشكل رأسي على الغلاف الحلزوني. وتثبت الفرشاة مباشرة على امتداد محور المحرك. ويمكن أن يثبت المحرك أفقيًا أيضًا، وفي هذه الحالة يسحب الماء محوريًا خلف المحرك عن طريق المروحة إلى خط التصريف.

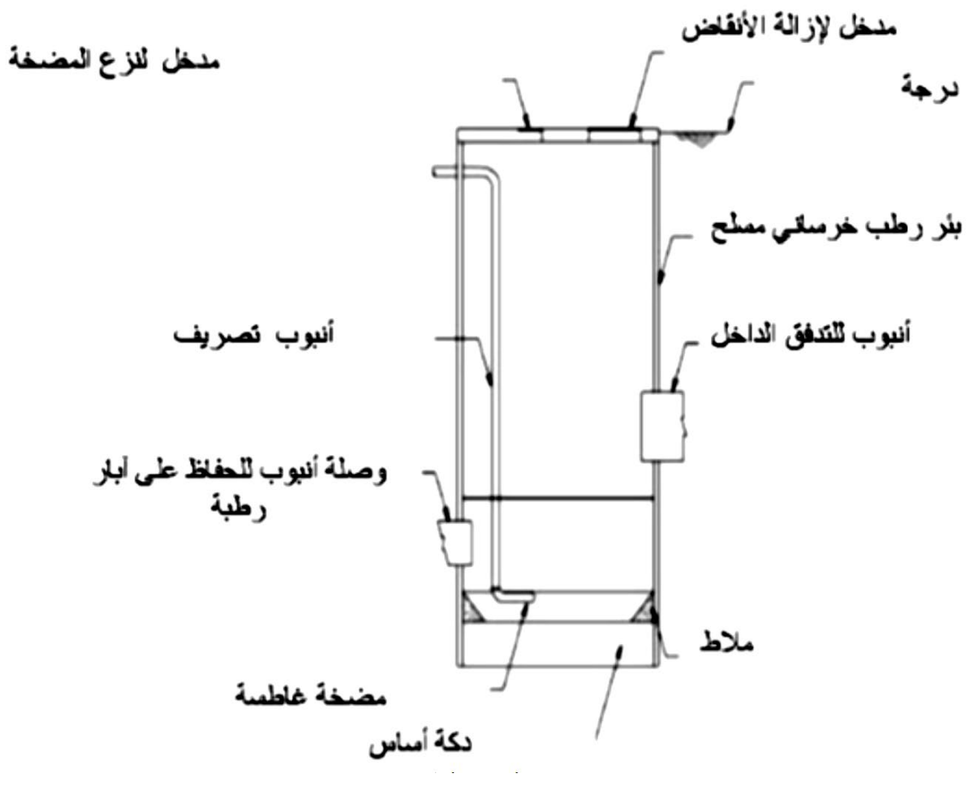
ج. الغرفة

قد لا يلزم الغرفة على سطح الأرض إذا كان من الممكن وضع وحدة التحكم في منطقة محصورة بحيز ضيق. ويسهل ترتيب المضخات داخل قيسونات دائرية من عمليتي إزالة أي مضخة لأغراض الصيانة أو الفحص. وتصبح إزالة المضخات ضرورية بشكل خاص عند وصول الرمل والطمي المتراكم إلى كمية كافية. وتؤدي سهولة الوصول إلى المضخات جعل عملية تنظيف المحطة أمرًا بسيطًا نسبيًا. وقد يستعمل نظام تهييج في التجاويف والأعماق الصغيرة للتأكد من نظافة القاع. ويتضمن نظام التهييج ضخ مياه داخل القيسون مع وضع نظام رش حلقي لتهييج الرمل والطمي المتراكم قبل تشغيل المضخة. ويمكن تقليل حجم الرواسب باستخدام جدران مائلة وتقليل مساحة السطح الأفقي.

د. مضخة القاع

تُفضل بعض الهيئات وضع مضخة قاع إما في أعمق نقطة في بئر الضخ الرئيس أو في غرفة قاع منفصلة.

ويبين الشكل 3 مخطط بئر رطب منفصل يستعمل قاعًا، بينما يبين الشكل 3ـ81 مضخة غاطسة في قيسون دائري.



الشكل 3 - 81: مضخة غاطسة في قيسون دائري

3-19-3-2 المحطات ذات التجويف الجاف

تتكون محطة التجويف الجاف من حجرتين رئيستين: بئر جاف وبئر رطب. تدخل مياه السيول إلى المحطة وتُخزن في البئر الرطب ويكون البئر الرطب عادةً منفصل عن البئر الجاف بجدران ويوصل إلى البئر الرطب بخطوط سحب لكل مضخة. وتثبت المضخات ووحدات التحكم على أرضية البئر الجاف وتزود المضخة بالطاقة عن طريق محركين مترافقين داخل البئر الجاف أو عن طريق محور محرك طويل، حيث يوضع المحرك أعلى البئر.

يفضل اختيار البئر الجاف للمضخات الكبرى، حيث كمية المياه المراد ضخها في المحطة تتجاوز 300 ل/ث. حينها أعمال صيانة للمضخات تتم بسهولة أكثر من وجودها في البئر الرطب.

أ. البئر الجاف

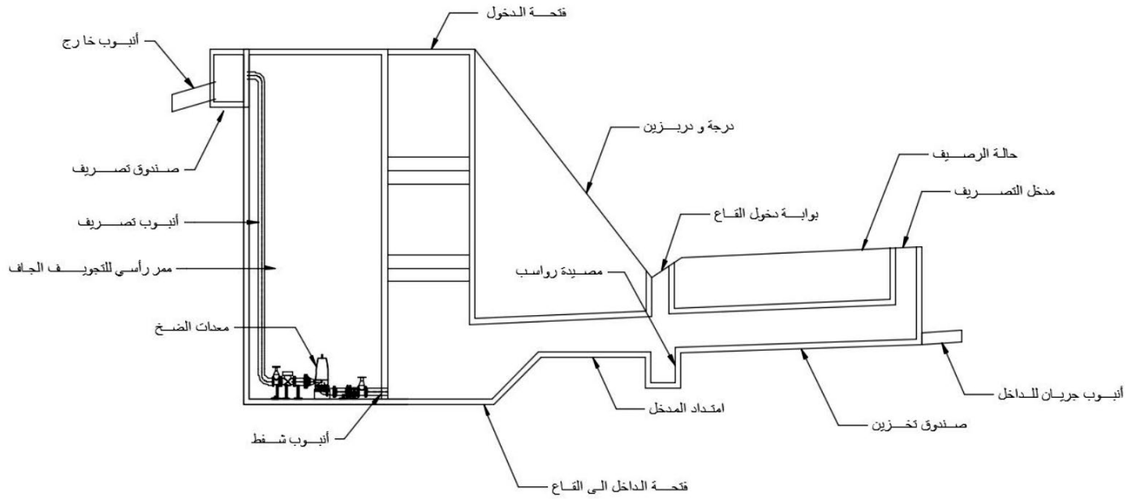
غالبًا ما يكون البئر الجاف مستطيل الشكل ويعتمد حجمه على عدد المضخات المثبتة داخله. وتوصي مواصفات التصميم القياسية باستخدام مضختين كحد أدنى. وتكون المضخات عادة من نوع الطرد المركزي غير القابل للانسداد. وهذا النوع مناسب لاستخدام مياه السيول لأنه مقاوم للاحتكاك.

2. البئر الرطب لمحطات التجويف الجاف

عادة ما تكون الآبار الرطبة لمحطات التجويف الجاف كبيرة الحجم بشكل يحقق متطلبات مساحة القاع، كما تحقق متطلبات التخزين لدورة المضخة بتصميم وحدة تخزين أو نظام تجميع كبير. ويجب أن يُصمم مدخل المضخة، حيث يضمن الدخول المنتظم للمياه إلى داخل المضخة. وعادةً ما يكون قاع البئر الرطب مقعرًا لكي يوجه المياه مباشرة إلى خط الشفط.

3. وحدة التخزين

عادة ما تتكون وحدة التخزين من عدة من القنوات على شكل براميل (الشكل 3 - 82) توصل إلى البئر الرطب من غير عوائق. وتنفذ الوحدة بميلان 2% لتقليل انفصال المواد الصلبة. وتحدث المضخات عملية تفريغ كاملة تقريبًا لوحدة التخزين والقاع بهذا التصميم.



الشكل 3 - 82: مقطع نموذجي لوحدة التخزين والبئر الجافة

3-19-4 مقارنة بين أنواع التجاويف

يغطي هذا الفصل مميزات ومساوئ محطات التجويف الجاف ومحطات التجويف الرطب.

3-19-4-1 محطات التجويف الجاف

1ـ مميزات محطات التجويف الجاف

تتضمن إيجابيات اختيار محطات التجويف الجاف ما يلي:

- توفر المساحة الجافة للموظفين لإزالة المضخات أو إجراء الصيانة الدورية والطارئة بمواسير والمضخات.
- سهولة الوصول للإصلاح والصيانة.
- حماية المعدات من الحريق والانفجار.

2. سلبيات محطة التجويف الجاف

تتمثل سلبيات اختيار محطات التجويف الجاف في:

- تكاليف التشييد أعلى بالمقارنة مع محطات التجويف الرطب.
- تحتاج في العادة إلى مساحة أكبر من محطات التجويف الرطب.

3-19-4-2 محطات التجويف الرطب

1. مميزات محطات التجويف الرطب

تتمثل مميزات اختيار محطات التجويف الرطب في:

- تتطلب بعض الأشكال مساحة سطح أقل بالمقارنة مع المحطات ذات التجويف الجاف.
- قليلة تكاليف الإنشاء بالمقارنة مع محطات التجويف الجاف.

2ـ سلبيات محطات التجويف الرطب

تتضمن بعض سلبيات اختيار محطات التجويف الرطب ما يلي:

- محدودية الوصول إلى المضخات لإجراء الصيانة بالمقارنة مع محطات التجويف الجاف.
- تتطلب إفراغ البئر من المياه لإجراء الصيانة.

3-19-5 مراحل تصميم محطات الضخ

3-19-5-1 المخططات والتفاصيل

يجب أن تتضمن المخططات الخاصة الموقع والتفاصيل الخاصة والتفاصيل القياسية على:

- مخطط عام للموقع.
- مخطط ومقطع جانبي وتفاصيل نظام التجميع.
- مخطط ومناسيب وتفاصيل وحدة التخزين.
- مخطط ومناسيب وتفاصيل البئر.
- مخطط ومناسيب وتفاصيل غرفة المضخة.
- مخطط ومناسيب وتفاصيل مواسير ومنافذ التصريف.
- المخططات والتفاصيل الكهربائية والميكانيكية.

3-19-2-5 الشروط والمواصفات والملاحظات العامة

يجب على المصمم استخدام المواصفات القياسية قدر المستطاع. وعادةً ما تحتاج محطات الضخ إلى مواصفات خاصة، واشتراطات خاصة وملاحظات عامة، وتشمل ما يلي:

- مواصفات أداء المضخة والحدود المسموحة.
- تركيب واختبار المضخة.
- متطلبات التنفيذ الخاصة.

بالإضافة إلى ذلك، جرت العادة أن يوصى بوضع دليل تشغيل واستخدام أثناء مرحلة إعداد المخططات والمواصفات والتقديرات لتستخدم بعد تشييد المحطة.

3-19-3-5 مراجعة التصميم

يجب أن تجري إدارة الطرق مراجعة داخلية للتصميم للتأكد من:

- كفاية الفرضيات والمعايير.
- دقة الحسابات والتفاصيل.
- الالتزام بمعايير التصميم والسياسات والقوانين.
- الالتزام بأي تعهدات تم قطعها في الوثائق البيئية (بما فيها تقييم الأثر البيئي).

3-19-6 التنفيذ والاختيار

على الرغم من وقوع هذه المرحلة خارج نطاق مسؤوليات المصمم، إلا أنه يجب أن يضعها في الحسبان. ويلزم التنسيق بشكل وثيق بين المصممين والقائمين على أمر التنفيذ للتأكد من أن التصميم يقدم اعتبارات مناسبة لمرحلة التنفيذ، وأن أيًّا من الدروس المستفادة من التنفيذ يمكن أن تنقل إلى المصممين. ويتم اختبار المضخة للتأكد من أنها تعمل بالشكل المطلوب. ويعد الفحص الدوري خلال العمر التشغيلي للمحطة مهم للتأكد من مواصلة المحطة العمل بالكفاءة نفسها.

3-19-7 مرحلة التشغيل والصيانة

يتضمن تشغيل وصيانة المحطة الفحص الدوري، والمراقبة والصيانة. ويجب أن تضع إدارة الطرق طريقة وبرنامج للتشغيل والصيانة. وتقوم بعض الإدارات بإجراء فحص وصيانة خاصة بها، بينما تقوم بعض الوكالات بتحويل هذه المسؤولية لوكالة محلية أو مقاول مستقل.

3-19-8 مرحلة التحديث

تعد مرحلة التحديث حيوية لكل المحطات التي لا تستبدل بشكل كامل. وتشمل مرحلة التحديث استبدال مكونات مختلفة من محطة الضخ. وعادة يتم استبدال المضخة نفسها، وفي أفضل الأوضاع تكون هذه المرحلة ضرورية فقط عند انتهاء العمر التصميمي للمكونات.

3-20 تصميم التنفيذ

3-20-1 عملية التنفيذ

خلال مرحلة تنفيذ مشروع النفق، فإن الأعمال التالية تؤثر في تقدم العمل:

3-20-1-1 التنبؤ

يتنبأ المصمم بسلوك الأرض والنفق المتوافق مع الافتراضات التي يبنى عليها التصميم. ويجب أن يعتمد التنفيذ الاقتصادي على خطة الاستكشاف المتقدمة المرحلية، حيث يتم إعداد العمل على درجات مختلفة من التفصيل بالنسبة لمسافات (وأزمنة) مختلفة بشكل مسبق، وتكون هذه الخطة مبنية على الاكتساب المتقدم للمعرفة، التي يتم فهمها على أنها تحسين نوعي مرحلي للمعلومات التنبؤية (الشكل 3ـ)، كما هو مفصل أدناه:

1ـ المرحلة 1

تقدم هذه الفترة إرشادات عامة لفترة 3ـ 6 أشهر مسبقًا للتأكد من وجود المباني والتجهيزات الخاصة قبل متطلبات المرحلة.

2ـ المرحلة 2

تقدم هذه الفترة الإرشادات الأكثر تحديدًا بالنسبة للانتقال الفوري للعمل (الطبيعة الصحيحة بما فيه الكفاية لمشكلة تصميم الحل).

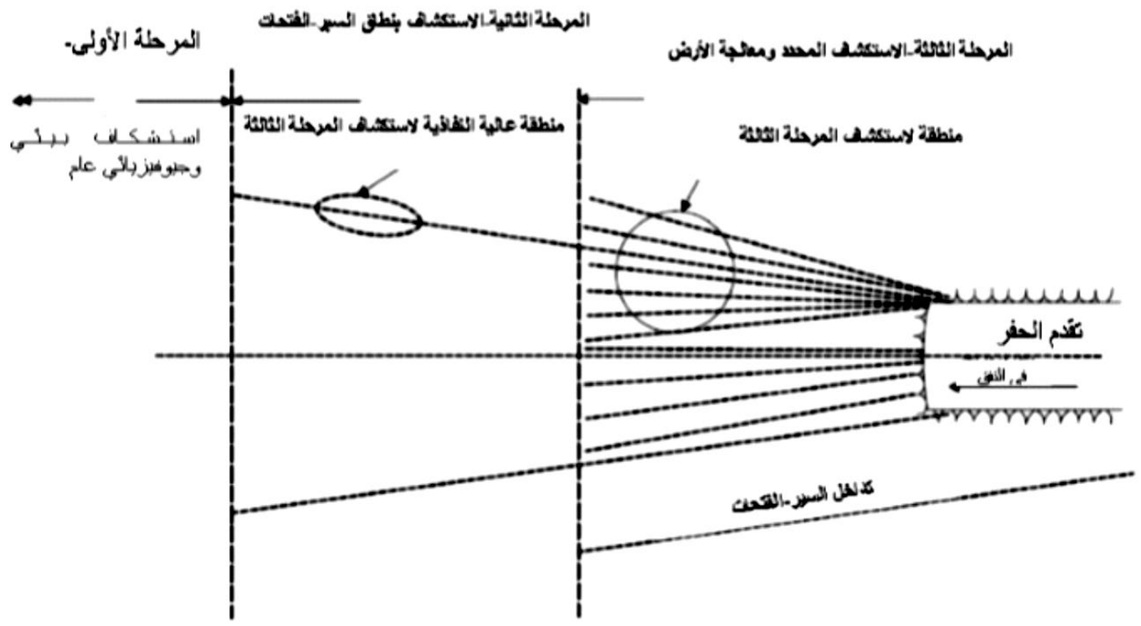
3-20-1-1 التنفيذ (الإنجاز)

يتم تخطيط التنفيذ لأخذ التنبؤات في الحسبان، من حيث السلامة والأمن الكليين للأعمال واقتصادية التشغيل. ويمكن تصنيف طرق تنفيذ الأنفاق من حيث درجة المتانة على مختلف تغيرات الأرض (انظر الشكل 3ـ):

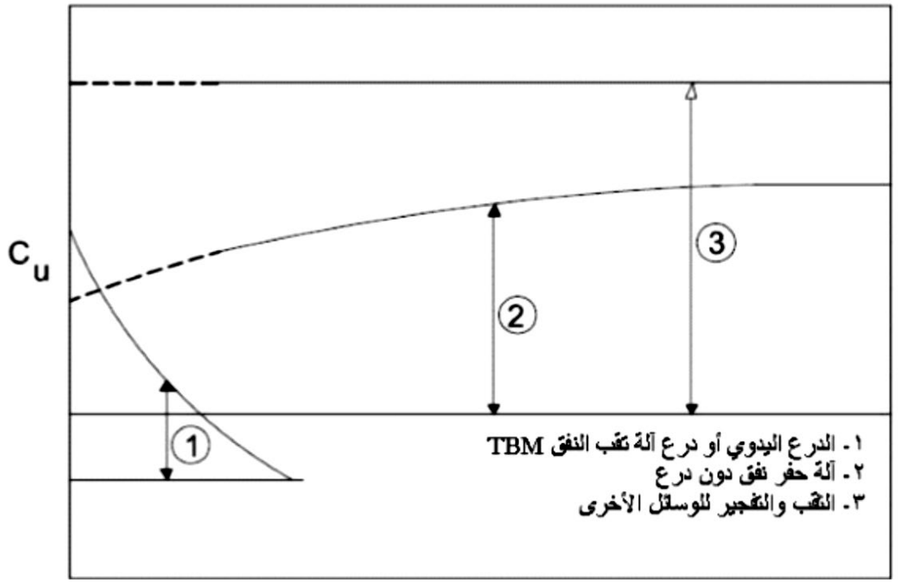
التحمل: القدرة على التشغيل ضمن مجال واسع من ظروف الأرض، وتتضمن القبول الفوري لمجال معين من الظروف.

قابلية التكيف: القدرة على أن تعدل، دون كلفة أو تأخير مقدرين، لمواجهة التغيرات المتوقعة في ظروف الأرض، وتتضمن القدرة على قبول مجال معين من الظروف.

ويفترض 83 أن كل طريقة موضحة بمثال تكون محدودة بقيمة قوة الأرض، QU العائدة للقوة المتأصلة وتحديد جودة الصخر (RQD).



الشكل 3 - 83: مراحل الاستكشاف أثناء التقدم في الحفر (أخذ عن WOOD,2000).



الشكل 3 - 84: أمثلة على التحمل في طرق شق الأنفاق (أخذ عن WOOD,2000)

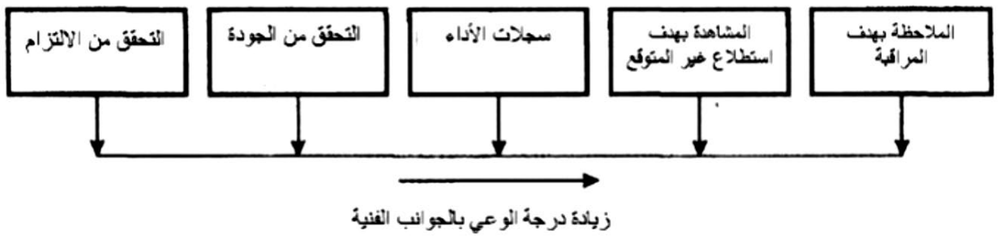
3-1-20-3 عمليات المراقبة

تتضمن معاينة التنفيذ، التي يمكن أن تتضمن توفير بيانات التصميم للسماح بتحسين التصميم الابتدائي (انظر الشكل 3-85)، عدة مهام:

المعاينة: التحقق من أنه يتم القيام بالعمل بالتوافق مع المواصفات الملحقة في متطلبات خاصة أخرى، تشغل تلك التي تنشأ من التنبؤ.

المراقبة الجيولوجية: تقدم تحذيرًا مسبقًا عن الأخطار غير المتوقعة.

مراقبة الأداء: تسجيل الخصائص الواضحة للعيوب، والانتقالات، والتشوهات، والإجهادات، ومناسيب المياه الجوفية، وضغوط المياه المسامية،... إلخ.



الشكل 3 - 85: عمليات مراقبة التنفيذ (WOOD, 2000)

3-20-2 استراتيجية المناقصة

يجب إعداد استراتيجية المناقصة، سواء كان التنفيذ منفصلاً بشكل تعاقدي عن تصميم المشروع أم لا، حيث يكون التنافس مبنيًّا على السعر في المقام الأول.

ويجب أن يكون تقدير المخاطر الجيولوجية عنصرًا أساسيًّا في استراتيجية المناقصة، ويمكن التعامل معها ضمن ثلاثة عناصر:

1. الحقائق المتوفرة عن المخاطر الجيولوجية والمتاحة لمقدم العرض.
2. تفسير البيانات الفعلية بمناطق الشك الرئيسة المحددة فيما يتعلق بالتداعيات الهندسية.
3. اعتبار مدى الخطر الجيولوجي المفروض على مقدم العرض من حيث أحكام العقد؛ ما يؤدي إلى ارتفاع للخطر الجيولوجي عند مقارنته بالطريقة المفضلة للتنفيذ.ويجب السيطرة على استراتيجية المناقصة بواسطة البند (ج) ما يؤدي إلى السيناريوهات التالية الخاصة بتقاسم الخطر:

- **لا توجد مشاركة في تقاسم الخطر** الفرض الكامل للخطر الجيولوجي على المقاول، الذي يتوقع أن يتحمل مسؤولية الظروف المتضاربة مع البيانات المزودة من قبل المصمم (المصممين).
- **حماية المقاول ضد الخطر الزائد «غير المتوقع»** ـ في غياب التزام المهندس بالكشف عن فهمه لـ«غير المتوقع» عند وقت المناقصة، تبقى هناك مشاكل في تأويل الخطر «غير المتوقع».
- **المشاركة العادلة في تقاسم الخطر** ـ يتم عناصر الخطر الجيولوجي ذي الأهمية الرئيسة على مخطط التنفيذ المفضل وعلى كلفته، حيث يقوم التعويض على ظروف مرجعية محددة.

ويجـب أن يكـون المقـاول مهيـأً بـدوره، لتأمـين، مـن وقـت لآخـر، تفاصيـل عروضـه لتعهـد العمـل بتفصيـل كافٍ للسـماح بالتقديـرات مقابـل أي اهتمامـات خاصـة مـن المالـك ويمكـن أن تكـون قـد تأثـرت.

3-20-3 اختيار الطريقة

يكـون اختيـار الطريقـة عـادة مفروضًـا بدرجـة اليقـين التـي يمكـن فيهـا تعيـين وتحديـد مواقـع المشـاكل الجيولوجيـة المحتملـة، ويجـب أن تتضمـن اعتبـار العوامـل التاليـة:

- ظروف الأرض.
- طول النفق المستمر بقياس معين.
- مدى الربط البيني بين الأنفاق.
- الفراغ النفقي المفيد فيما يتعلق بمقاطع النفق الممكن إجراؤها.
- قيمة الزمن.
- التباعد بين الأنفاق.
- التجارب المحلية ووسائل الصيانة.
- إمكانية الوصول للمشروع.
- الاهتمامات البيئية.

مـن أجـل تحقيـق اقتصاديـة المـشروع ككل واسـتراتيجية التنفيـذ الأمثـل، فإنـه مـن الـضروري أن يكـون واضحًـا الفهـم المتبـادل لأهميـة العوامـل المبينـة أعـلاه.

تظهر تفاصيل عن الأهمية المحتملة لكل من هذه العوامل في.(2000) WOOD

3-25 مراجع الجزء الثالث

BICKEL, J.O., KUESEL, T.R., AND KING, E.H., 1996, TUNNEL ENGINEERING HANDBOOK

AASHTO LRFD “BRIDGE DESIGN SPECIFICATIONS” ـ 8TH EDITION 2017

ACI 318ـ 05 “AMERICAN CONCRETE INSTITUTE”

AMADEI, B., AND PAN, E. 1992. GRAVITATIONAL STRESSES IN ANISOTROPIC ROCK MASSES WITH ANSI/IESNAـ PRـ 22ـ 05 TUNNEL LIGHTHING STANDARD PRACTICE

BATHE,Kـ J. 1982. FINITE ELEMENT PROCEDURES IN ENGINEERING ANALYSIS. PRENTICEـ HALL: 735.

BERGE, P.A. WANG, H.F. AND BONNER, B.P. 1993. PORE PRESSURE BUILDUP COEFFICIENT IN SYNTHETIC AND NATURAL SANDSTONES, INT.J.ROCK MECH.MIN.SCI & GEOMECH.,ABSTR., VOL.30, NO.7:1135ـ 1141.

CHENG. A.Hـ D., ABOUSLEIMAN,Y.,AND ROEGIERS, J.C. 1993, REVIEW OF SOME POROELASTIC EFFECTS IN ROCK ECHANICS, INT.J.ROCK IVLECH. MIN.SRI & GEOMCRH,ABSTR., VOL.30, NO. 7:1119ـ 1126.

CIE: INTERNATIONAL COMMISSION ON ILLUMINATIONA STANDARDS

CORDING & HANSMIRE (1975), EXAMPLES OF ACTUAL MEASUREMENTS OF GROUND MOVEMENT ABOUT TUNNELS IN SAND.

CORDING, E.J., AND W.H.HANSMIRE, (1975). DISPLACEMENTS AROUND SOFT GROUND TUNNELS.PROCEEDINGS, FIFTH PANAMERICAN CONGRESS ON SOIL MECHANICS AND FOUNDATION ENGINEERING. BUENOS AIRES.

CUNDALL, P.A. 1976. EXPLICIT FINITE DIFFERENCE METHODS IN GEOMECHANICS, NUMERICAL METHODS IN ENGINEERING. PROCEEDING OF THE EF CONFERENCE ON NUMERICAL METHODS IN. GEOMECHANICS, BLACKSBURG, VIRGINIA VOL.1:132ـ 150.

CUNDALL, P.A. AND HART,R.D,1993, NUMERICAL MODELING OF DISCONTINUE. COMPREHENSIVE ROCK ENGINEERING VOL.2,J.A.HUDSON, ED. PERGAMMON PRESS:231ـ 243.

DIMITRIOS KOLYMBAS, TUNELLING AND TUNNEL MECHANICS A RATIONAL APPROACH TO TUNNELLING: APRIL 2005.

EPA STANDARDS

FEMANDEZ, G., AND ALVAREZ, T.A. 1994,SEEPAGE – INDUCED EFFECTIVE STRESSES AND WATER PRESSURES AROUND PRESSURE TUNNELS, JOURNAL OF GEOTECHNICAL ENGINEERING, AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS.

FHW AL AAHSTO REPORT ENTILED: RECOMMENDATIONS FOR BRIDGE AND TUNNEL SECURITY:

FHWA ROAD TUNNEL DESIGN GUIDELINES JANUARY, 2004.

FHWA STANDARDS

GOODMAN, R.E. AND SHI, G.H. 1985, BLOCK THEORY AND ITS APPLICATION TO ROCK ENGINEERING, PRENTICE_HALL, NEW JERSEY.

HASHASH, Y.M.A.AND COOK, R.F. 1994, EFFECTIVE STRESS ANALYSIS OF SUPERCOLLIDER TUNNELS, 8TH INT. CONF. ASSOC.COMP. METHOS AND ADVANCES IN ROCK MECHANICS, MORGANTOWN,WEST VIRGINIA.

HATZOR, Y. AND GOODMAN, R.E.1993 DETERMINATION OF THE DESIGN BLOCK FOR TUNNEL SUPPORTS IN HIGHLY JOINTED ROCK COMPREHENSIVE ROCK ENGINEERING, VOL. 2, J.A, HUDSON, CD.PERGAMMON PRESS: 263_292.

HOECK. AND BROWN , E.T. 1980 UNDERGROUND EXCAVATIONS IN ROCK, INSTITUTION OF MINING AND METALLURGY, LONDON, ENGLAND; 527.

HOCKING, G. 1978, STRESSES AROUND TUNNEL INTERSECTIONS,IN COMPUTER METHODS IN TUNNEL DESIGN, INSTITUTION OF CIVIL ENGINEERS; 41_59.

IES: ILLUMINATING ENGINEERING SOCIETY.

ITASCA, 1992D, FAST LAGRANGIAN ANALYSIS OF CONTINUA, VERSION 3.2. USER'S MANUAL.VOL.III.

MINDLIN,R.D. 1939. STRESSES DISTRIBUTION AROUND A TUNNEL, AMERICAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS, NEW YORK.

NATIONAL FIRE PROTECTION ASSOCIATION (NFPA) STANDARDS.

PALMER & BELSHAW (1979, 1980, EXAMPLE OF GROUND MOVEMENT ABOUT TUNNELS IN CLAY.

PALMER, I.H.L., AND D.I. BELSHAW 1979, LONG_TERM PERFORMANCE OF A MACHINE_BORED TUNNEL WITH USE OF AN UNREINFORCED, PRECAST SEGMENTED CONCRETE LINING IN SOFT CLAY. PROCEEDINGS TUNNEL 79, LONDON: INSTITUTION OF MINING AND METALLURGY.

PALMER, J.H.L., AND D.J.BELSHAW 1980, DEFORMATIONS AND PORE PRESSURES IN THE VICINITY OF A PRECAST, SEGMENTED, CONCRETE LINED TUNNEL IN CLAY. CANADIAN GEOTECHNICAL JOURNAL, 17.

PAN,E, AND AMADEI,B,1993, GRAVITATIONAL STRESSES IN LONG ASYMMETRIC RIDGES AND VALLEYS IN ANISOTROPIC REEK,INT.J.ROCK MECH.MIN.SCI & GEOMECH, ABSTR. VOL. 30 NO: 7: 1005_1008.

PENDER, M.J. 1980 ELASTIC SOLUTIONS FOR A DEEP CIRCULAR TUNNEL, GEOTECHNIQUE. SBC: SAUDI BUILDING CODE.

SCHWARTZ, C.W. AZZOUZ, A.S. AND EINSTEIN, H.H. 1980, IMPROVED DESIGN OF TUNNEL SUPPORTS, U.S. DEPARTMENTOF TRANSPORTATION, REPORT NO. UMTA – MA – 06_0100_80_5

SLOAN , S. 1981. NUMERICAL ANALYSIS OF INCOMPRESSIBLE AND PLASTIC SOLIDS USING FINITE ELEMENTS, PH.D. DISSERTATION, TRINITY COLLEGE, CAMBRIDGE UNIVERSITY, UNITED KINGOM,

TERZAGHI, K. AND RICHART, F.E.1952, STRESSES IN ROCK ABOUT CAVITIES, GEOTECHNIQUE, VOL.3,

U.S.ARMY CORPS OF ENGINEERS, ENGINEER MANUAL 1110_2_2901 ENGINEERING AND DESIGN TUNNEL AND SHAFTS IN ROCK 30 MAY 97.

VENTURINI, W.S. 1983. BOUNDARY ELEMENTS METHODS IN GEOMECHANICS, LECTURE NOTES IN ENGINEERING, 4.C.A. BREBIA AND S.A. ORSZAG,CD. SRINGER_VERLAG, NEW YORK.

WARPINSKI, N.R. AND L.W. TEUFEL, 1993, LABORATORY MEASUREMENTS OF THE EFFECTIVE_STRESS LAW FOR CABONATE REEKS UNDER DEFORMATION, INT. J.ROCK H4CCH. MIN.SCI. & GEOMECH. ABSTR. VOL.30, NO. 7: 1169_1172.

WHITTLE, A.J. 1987, SC.D. DISSERTATION, DEPARTMENT OF CIVIL ENGINEERING,MASSACHUSETTS INSTITUTE OF CAMBRIDGE, MA 427.

ZHU, W., AND WANG, P.1993, FINITE ELEMENT ANALYSIS OF JOINTED ROCK MASSES AND ENGINEERING APPLICATION, INT.J.ROCK MECH.MIN. SCI.& GEOMECH.ABSTR.,VOL.30 NO:5;537_544.

BARTON, N., LIEN, R. AND LUNDE, J. (1974) ENGINEERING CLASSIFICATION OF ROCK MASSES FOR THE DESIGN OF TUNNEL SUPPORT. ROCK MECHANICS

BICKEL, J.O., KUESEL, T.R., AND KING, E.H., 1996, TUNNEL ENGINEERING HANDBOOK

BIENIAWSKI, Z.T. (1979) THE GEOMECHANICS CLASSIFICATION IN ROCK ENGINEERING APPLICATION

BREKKE T.L. AND HOWARD T.R. (1972): STABILITY PROBLEMS CAUSED BY SEAMS AND FAULTS. RAPID TUNNELING & EXCAVATION CONFERENCE, 1972

BROWN, E. T. ET AL. (1983) GROUND RESPONSE CURVE FOR ROCK TUNNELS. ASCE J. GEOTECH. ENG. DIV.

BS_ 5489_ 2:2016, CODE OF PRACTICE FOR THE DESIGN OF ROAD LIGHTING. PART 2: LIGHTING OF TUNNELS

DON U. DEERE, RICHARD FLOYD COON, ANDREW H. MERRITT (1969) ENGINEERING CLASSIFICATION OF IN_ SITU ROCK

DUDDECK , H. AND ERDMAN, J. 1982. STRUCTURAL DESIGN MODELS FOR TUNNELS

HASHASH, Y.M.A., HOOK, J. J., SCHMIDT, B., YAO, J. I.C., 2001. “SEISMIC DESIGN AND ANALYSIS OF UNDERGROUND STRUCTURES”. TUNNELLING AND UNDERGROUND SPACE TECHNOLOGY 16 247_ 293.

JAPANESE SOCIETY OF CIVIL ENGINEERINGS (JSCE), “JAPANESE STANDARD FOR SHIELD TUNNELING”, 3RD ED. 1996, TOKYO, JAPAN.

KAROL, R. H. (1990) CHEMICAL GROUTING (SECOND EDN). MARCEL DECKER INC., NEW YORK.

KONOHA Y., YAMAMOTO Y. 2002 TURNING SIMPLE IDEAS INTO REALITY: DEVELOPMENT AND APPLICATION OF UPWARD SHIELD TUNNELING METHOD FOR THE SEWER CONSTRUCTION PROJECT ALONG BANDAI _ HANNAN LINE, OSAKA CITY, JSCE 2003 53_ 57

LAMA, R.D. AND VUTUKURI, V.S. (1978) HANDBOOK ON MECHANICAL PROPERTIES OF ROCKS. 2ND EDITION, TRANS TECH PUBLICATIONS, SWITZERLAND.

K.Y. LO, C.M.K. YUEN, DESIGN OF TUNNEL LINING IN ROCK FOR LONG TERM TIME EFFECTS, CANADIAN GEOTECHNICAL JOURNAL, 18 (1) (1981), PP. 24_ 39

HIGHWAYS AGENCY (1996A). THE VALUE FOR MONEY MANUAL.

U.S. DEPARTMENT OF THE ARMY; ARMY CORPS OF ENGINEERS 1997 “ENGINEERING AND DESIGN, TUNNELS AND SHAFTS IN ROCK” EM 1110_ 2_ 2901, MAY.

SAUDI BUILDING CODE REQUIREMENTS FOR CONCRETE STRUCTURES (SBC 304)

“TERZAGHI K., 1946. ROCK DEFECTS AND LOADS ON TUNNEL SUPPORT. INTRODUCTION TO ROCK TUNNELLING WITH STEEL SUPPORTS. EDS, R.V., PROCTOR AND WHITE, T.L., COMMERCIAL SHEERING & STAMPING CO., YOUNGSTOWN, OHIO, U.S.A., 271

RABCEWICZ, L. 1969. STABILITY OF TUNNELS UNDER ROCK LOAD. WATER POWER 21

مدة التحديث وحقوق الملكية والمرجعية

مدة التحديث وحقوق الملكية والمرجعية

- يتم تحديث هذا الدليل كل خمس سنوات بصورة دورية.
- يمكن إجراء تحديثات أخرى إذا دعت الضرورة لذلك.
- تستثنى المشاريع التي تم التعاقد على تصميمها قبل صدور هذا الدليل.
- لا يجوز اقتطاع جزء من هذا الإصدار واستخدامه بمفرده، ولا يجوز استخدام مكونات الإصدار في أعمال إخراج إصدارات أخرى من دون إذنٍ كتابيّ من وزارة الشؤون البلدية والقروية.
- تمت مراعاة قواعد حدود الملكية الفكرية في إنتاج هذا الإصدار، ويحتوي في نهاية كل جزء على قائمة بجميع المراجع التي تم الرجوع إليها عند إعداده.

وزارة الشـــؤون
البلدية والقروية

Ministry of Municipal & Rural Affairs