الفصل الأول : الأنـفـــاق

1.1.2 تمهيد:

كل حضاره لها أثر كبير في حياة الانسان فهي ركيزة من ركائز الحياة ، خلالها تتطور حياة الانسان وتكتشف ثقافات ونظم لم تعرف من قبل ، ونجد أن في كل حضارة سمة إنبثقت منها تعابير وملامح جديدة سواء كان بتطوير الإكتشافات السابقة أو إكتشافات جديدة فمن هذه الإكتشافات كانت الأنفاق .

نفذت الأنفاق في العصور الوسطى تحت القلاع والحصون من أجل إستخدامها كممرات سرية وأحياناً للعبور تحت جدران هذه القلاع لمهاجمتها والدخول إليها، كما نفذت ومازالت تنفذ الأنفاق على أعماق كبيرة بوصفها ممرات تحت الأرض للوصول إلى أماكن فلزات المعادن الثمينة، وأستخدمت الأنفاق أيضاً في نقل المياه العذبة أو تصريف المياه العادمة كتلك التي نفذت في المدن القديمة كالقدس وروما وأثينا.

إضافة إلى إستخداماتها القديمة شهد تنفيذ الأنفاق توسعاً كبيراً بعد القرن الثامن عشر لحل مشكلات النقل بأنواعه حيث ساعدت على تجاوز العقبات والعوائق التي تظهر على سطح الأرض، ووفرت نقلاً مباشراً للناس والبضائع من دون الحاجة إلى الإلتفاف حول هذه العوائق ولهذا فإنها مازالت تنفذ تحت الجبال والأنهار والبحار والمناطق السكنية والصناعية المكتظة بهدف نقل الأشخاص والبضائع بالسيارات والقطارات ومن أجل مرور المياه أو أنابيب الغاز أو شبكات الكهرباء.

1.1.1.2 لمحـــة تاريخيـــة:

تم إنشاء الأنفاق قديماً من قبل المهندسين الرومان بغرض نقل المياه فقط ، حيث قام الرومان ببناء أعقد شبكة أنفاق في العالم القديم ، والتي تميزت بالإنشاءات المنحدرة (المائلة) التي تدعى القنوات ، وذلك بهدف نقل المياه من الينابيع الجبلية الى المدن والقرى القريبة .

قام المهندسون الرومان بنحت وحفر غرف تحت الأرض وانشاء المنحنيات القوسية الفنية الرائعة ليس فقط لإستحضار المياه العذبة من الجبال إلى المدن وإنما للتخلص من مياه التصريف الصحي أيضاً .

وخلال القرن السابع عشر كانت الأنفاق تبنى فقط كقنوات بلا طرقات أو سكك حديدية ، حيث أصبحت القنوات المائية السريعة أفضل السبل لنقل الشحنات المختلفة والمواد الخام من المناطق المختلفة الى المدن وعبر مسافات شاسعة .

ومع ظهور السيارات والقطارات أخذت إنشاءات الأنفاق بالتوسع والتطور بشكل ملحوظ ، فخلال القرن التاسع عشر ، حدثت تطورات كبيرة في هندسة الانفاق وشق الطرقات الأسفلتية للسيارات والسكك الحديدية للقطارات ، حتى أصبحت الأنفاق أكثر ضخامة وأفضل تصميماً وتمتد لمسافات أكبر تحت الأرض .

في عصرنا الحالي لم يقف المهندسون عند مسألة حفر الأنفاق داخل الجبال وفي المحيطات فمع آخر الإبداعات الإنشائية العصرية أصبح المهندسون قادرون على حفر وإنشاء أعقد الأنفاق الجبلية ، وتحت مجاري الأنهار ، وحتى تحت المدن النشيطة بالأعمال ، حيث يقوم المهندسون قبل البدء بأي عملية حفر بإجراء الدراسات الضرورية والتحريات عن أوضاع الأرض والتربة من خلال عمليات تحليل التربة وعينات من الصخور الموجودة ، وأحياناً يقومون باجراء عمليات حفر اختبارية مسبقة.

ومن أمثلة الأنفاق القديمة التي شيدت وكان إستخدامها في بادئ الأمر للتزود بمياه الشرب أو للصرف الصحي خاصة هي:

- نفق الصرف الصحي بوادي الهندوس (Indus Valley) في مدينة موهنجو. دارو (Mohenjo-Daro) الذي بني بين عامي (2500–1500) قبل الميلاد.
- نفق تحويلة نهر الفرات الذي نفذه البابليون نحو عام 2100 قبل الميلاد حيث حفروا خندقاً بطول 900m من القصر الملكي إلى المعبد الرئيسي وبنوا فيه ممراً من الآجر بعرض 3.6m وارتفاع 4.6m ومن ثم أعادوا النهر إلى مجراه الأول ليمر فوق النفق.
- نفق تزويد مدينة القدس بمياه الشرب بطول 535m، بُني نحو عام 700 قبل الميلاد.
- بنى اليونانيون القدامى أنفاق مياه الشرب وكان أكثرها شهرة النفق الذي بني في جزيرة ساموس (Samos) في العام 530 قبل الميلاد حيث نفذ بطول 1000m في صخور من الحجر الكلسي وبُطِّن من الداخل بأنابيب فخارية لجر مياه الينابيع إلى المدينة.
- كان المصريون القدماء من أكثر الشعوب طموحاً في تنفيذ الأنفاق فاخترعوا العديد من الطرائق لحفر الصخور القاسية وقطعها، فمثلاً يعود لهم الفضل في عام 1300 قبل الميلاد بقطع الصخور وفق سطوح محددة حيث كانوا يحفرون أخدوداً في الصخور بعمق(10 – 50) cm ثم يحشرون أسافين خشبية فيه ويسكبون عليها الماء فيكبر حجمها وينشق الصخر وفق السطح المطلوب، ويعود لهم الفضل أيضاً في وضع تقانة قص الصخور بتسخينها بالنار عند سطوح محددة ثم تبريدها فجأة فيتشقق الصخر.
- تم تنفيذ العديد من الأنفاق في عهد الرومان من أشهرها النفق الذي بُني في القرن الرابع قبل الميلاد بطول 1830m لتفريغ مياه بحيرة ألبانو (Lake Albano) حيث استخدم في تنفيذه خمسون نفقاً مائلاً لتسريع تنفيذ النفق الرئيسي ولتهويته.

- كما نُفذ نفق الرومان الأعظم (The greatest Roman tunnel) في عهد كلوديوس الأول (Claudius I) ليصرف مياه بحيرة فوشينو (Fusion) الذي أنجز في عام 50 ميلادية بعد أحد عشر عاماً من العمل شارك فيه 30,000 عامل، وكان طول النفق نحو 5.6Km وتم تنفيذه من خلال أربعين نفقاً شاقولياً.

ولابد من الاشارة أنه قد توقف تقريباً تنفيذ الأنفاق في العصور الوسطى لعدم توفر التقنيات المناسبة للتعامل مع الصخور الطرية وبالتالي نفذت في هذه الفترة بعض الأنفاق كما في العصور القديمة في الصخور القاسية.

وعلى الرغم من أن البارود استخدم أول مرة في أعمال التفجير اللازمة لتفتيت الصخور في ألمانيا من قبل مارتين ڤيغل (Martin Vie gel) في عام 1613 لكنه لم يلق رواجاً لأنه كان غالياً وصعب الاستعمال.

ومن هنا بدأ عهد جديد لتنفيذ الأنفاق عند زيادة الطلب لتحسين النقل بوساطة الأقنية في الفترة بين (1760 – 1830) حيث استعمل البارود استعمالاً واسعاً في الأطلسي والبحر المتوسط في الأعوام (1679 – 1681) فتم حفر نفق بعرض 6.7m وارتفاع 8.8m وطول 155m، ومنها أيضاً :

- بنى جيمس برندلي (James Bindley) في بريطانيا قناة بطول 17Km افتتحت قي عام 1761 لنقل الفحم من منجم ورسلي (Wesley) إلى مدينة مانشستر، وقد اشتملت القناة على نفق عند المنجم وآخر عند مدينة مانشستر.
- بني أول نفق كبير في الولايات المتحدة الأمريكية بين عامي (1818– 1821) جزءاً من قناة سسكهنا (Susquehanna) في بنسلفانيا (Pennsylvania) فكان طول النفق 135m وارتفاعه 5.5m.

2.1.1.2 أطـول الأنفــاق في العــالم:

- يُعد نفق سَيكان (Seikan Tunnel) في اليابان أطول نفق قطارات في العالم حيث بلغ طوله 53.9 km منها23.3 km تحت البحر.
- يُعد نفق القناة (Channel Tunnel) بين فرنسا وبريطانيا ثاني أطول نفق قطارات في العالم بطول 50.5 km منها 39 km تحت البحر.
- ويُعد نفق لِردال (Laerdal Tunnel) في النرويج أطول نفق سيارات في العالم بطول 24.5 km.
- ويعد نفق جونغنان شان (Zhongnanshan) في جبل جونغنان في الصين أطول نفق سيارات في العالم بطول18.04 km .
- كما يُعد نفق القديس غوتهارد (St.Gotthard Tunnel) في سويسرا ثاني أطول نفق سيارات بطول 16.32 km .
- يُعد نفق هسووِّشان (Hsuehshan Tunnel) في شمال تايوان أطول نفق سيارات في آسيا بطول 12.955 km .

2.1.2 تعريف الأنفاق والهدف منها وفوائدها:

1.2.1.2 تعريف الأنفاق (Definition of tunnels):

تعريف أنفاق الطريق الذي حددته اللجنة الفنية للأنفاق هو أنها الطرق المغلقة مع طريق لعبور السيارة عبر البوابات في بداية ونهاية النفق، وتحدد اللجنة كذلك أن أنفاق الطريق لا تشمل الطرق المغلقة التي أنشأتها جسور الطرق السريعة أو الجسور السكك الحديدية أو الجسور الأخرى.

الأنفاق هي هياكل تتطلب إعتبارات خاصة في التصميم قد تشمل الإضاءة والتهوية وأنظمة الحماية من الحرائق، ومخارج الطوارئ وينطبق هذا التعريف على جميع أنواع الهياكل النفق وطرق الأنفاق.

2.2.1.2 هدف النفق (Aim of tunnel):

هدف النفق هو الربط بين منطقتين.

ويمكن أن نقول أن وظيفة النفق لا تنحصر فقط على النقل بل تتعداها إلى:

- أنفاق التعدين التي تستخدم في إستخراج معادن الخام.
- أنفاق الأعمال العامة وهي أنفاق تنقل المياه أو خطوط الغاز أو البترول أو مياه المجاري.

وعلى المهندس المدني أن يراعي أمرين هامين هما :

1/ أمان النفق وديمومته. 2/ تكلفة المشروع.

3.2.1.2 فوائد الأنفاق (Benefits of tunnel) :

لا يمكن المبالغة في تقدير ضرورة الأنفاق والفوائد التي تجلبها بالرغم من أن بناء الأنفاق محفوف بالمخاطر ومكلف وتتطلب مستوى عال من المهارة الفنية إلا أنها:

1. تُسهل من الإتصال بين المناطق المختلفة و حركة المرور تحت الأرض .
2. تحسن نوعية الحياة فوق سطح الأرض ويمكن أن يكون لها تأثير إقتصادي هائل.
3. إستخدام الفضاء تحت الأرض لمحطات التخزين والطاقة ومعالجة المياه والدفاع المدني وغيرها من الأنشطة التي في كثير من الأحيان لا بد من مساحة محدودة لها.
4. أنفاق الطريق تعد البديل الممكن لعبور الأجسام المائية أو إجتياز الحواجز الطبيعية مثل الجبال والغير طبيعية مثل الطرق والسكك الحديدية و المرافق.

5. أنفاق الطريق هي وسائل ناجحة للحد من الأثار البيئية المحتملة من ازدحام حركة المرور وحركة المشاة وجودة الهواء وتلوث الضوضاء أي أنها تعد حماية للبيئة وتوفير الطاقة.

6. حماية المناطق ذات القيمة الثقافية أو التاريخية الخاصة.

4.2.1.2 شروط إنشـاء نفـق:

عند انشاء نفق لابد من التركيز على اهم شرط وهو :

1. **إختيار المسار:**

معظم الأنفاق خاصة طويلة المسار تكون منحنية أو متعرجة أي غير مستقيمة وذلك لتفادي المناطق التي تحتوي على صخور صلبة فنختار المناطق التي بها صخور لينة لسهولة الحفر فيها ولإختصار الوقت والتكلفة ، كما نتجنب الأحواض المائية لأنها معرضة لانهيارات أثناء التنفيذ ، ولابد للاشارة أنه في حالة تعذر إبعاد هذه المشاكل عن مسار النفق نلجأ إلى بنائه تحت أعماق كبيرة وبصفة عامة يشترط على المهندس المدني تأمين الشروط التالية :

1. لايتعدى إرتفاع النفق طوله.
2. نراعي المنشآت الموجودة فوق النفق وخاصة شبكات نقل المياه.
3. أن يكون في تربة طينية.
4. أن لايمر على مناطق زلزالية.
5. إضافة 2% من ميل النفق باتجاه النهايتين وذلك لسماح للمياه بالخروج.

مع مراعاة ألا ننسى الهدف الذي يبنى من أجله النفق.

2. المقطع العرضي للنفق:

يتم تحديده تبعا لـ:

1. تأثير الصخور وطبيعة الأرض فكلما كان الصخر لينا وغير ثابت ازدادت مخاوف تهدم الأرض لذا يكون مقطع النفق اهليجي أما في الأرض الغضارية فيأخذ المقطع شكل دائري.

2. طريقة الحفر التي لها أثر في اختيار الشكل العرضي لنفق فمثلاً الطرق الكلاسكية اليدوية تحقق مقاطع شكل حذوة حصان ، أما طريقة الحفر بواسطة الستارة تناسب المقاطع الدائرية فقط.

ومن الأمثلة علي بعض المقاطع :

1. يكون المقطع بمثابة حذوة حصان في أنفاق السكة الحديدية.
2. يكون المقطع بمثابة سلة في أنفاق المترو.
3. يكون المقطع بمثابة مستطيل أو نصف دائري في أنفاق المشاة .
4. يكون المقطع بأشكال متنوعة "مستطيل أو حذوة حصان" في أنفاق الطرق.

3.1.2 أساسيات النفق:

تتم هندسة النفق مثل هندسة الجسر أي يجب أن تتعلق بمنطقة الفيزياء المعروفة بعلم توازن القوى إذ يقوم علم توازن القوى بوصف كيفية قيام القوى التالية بالتفاعل لإحداث الموازنة في الأبنية مثل الأنفاق والجسور:

1. الشد الذي يقوم بتوسيع أو سحب المواد.
2. الضغط الذي يقوم بتقصير أو ضغط المواد.
3. القص الذي يتسبّب بإنزلاق أجزاء المواد وبمرورها باتّجاهات معاكسة لبعضها البعض.

4. الإلتواء الذي يتسبب بإنحناء المواد.

إن على النفق أن يقاوم هذه القوى بمواد قوية مثل الفولاذ والحديد والأسمنت، ولكي تبقى الأنفاق ساكنةً يجب أن تكون قادرة على مقاومة الأحمال التي وضعت عليها ويشير الحمل الميت إلى وزن التركيب بنفسه بينما الحمل الحيّ يشير إلى وزن العربات والناس الذين يتحرّكون خلال النفق.

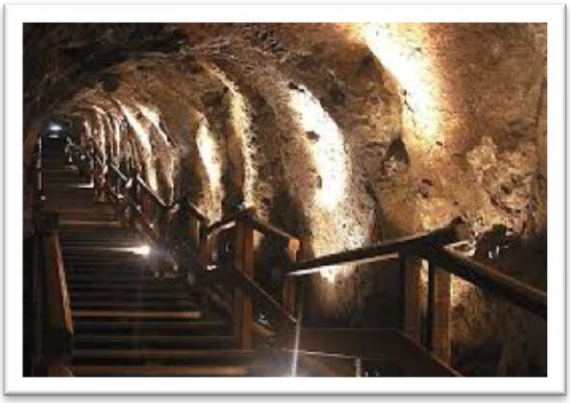
4.1.2 أنواع الأنفاق :

1.4.1.2 تصنيف الأنفاق بشكل رئيسي :

بشكل عام تصنف إلى:

1. أنفاق التعدين :

تستخدم أنفاق التعدين أثناء استخراج معادن الخام وتُمكّن العمّال أو الأجهزة من الدخول إلى عمق حيث أماكن تواجد المعادن داخل الأرض و هذه الأنفاق أدت إلى استخدام التقنيات المماثلة كالأنواع الأخرى من الأنفاق ولكنّ كلفتها في البناء أقل ، وعلى أي حال إن أنفاق التعدين ليست آمنة كالأنفاق المصممة من أجل الاستخدام الدائم الشكل رقم(1-2).



الشكل رقم (1-2) يوضح أنفاق التعدين

2. أنفاق الأعمال العامة:

تنقل أنفاق الأعمال العامة المياه أو خطوط الغاز أو مياه المجاري عبر مسافات طويلة وكانت الأنفاق السابقة تستخدم لنقل الماء إلى المناطق المأهولة بالسكان بشدّة ومياه المجاري بعيداً عنها وقد استخدم المهندسون الرومان شبكة شاملة من الأنفاق للمساعدة على حمل الماء من الجبل إلى المدن والقرى وكانت هذه الأنفاق جزء من أنظمة القناة التي تشمل أيضاً غرفاً تحت الأرض وجسراً منحدراً كالأبنية المدعومة بسلسلة من الأقواس وفي عام 97 بعد الميلاد قامت تسع قنوات تقريباً بحمل 85 مليون غالون من الماء يومياً من الجبل إلى مدينة روما.

3. أنفاق النقل:

كان هناك قنوات لممرات مائية اصطناعية استخدمت للسفر أو للشحن أو للري قبل تواجد القطارات والسيارات واليوم تمتد هذه القنوات كسكك الحديد والطرق لمسافات طويلة عادة فوق سطح الأرض وقد ألهم بناء القناة ببعض من أنفاق العالم السابقة الشكل رقم (2-2)

الشكل رقم (2-2)يوضح أنفاق النقل

2.4.1.2 تصنيف الأنفاق طبقاً لإستخداماتها:

بشكل مفصل إلى تصنف الي:

1. أنفاق القطارات (Railway Tunnels):

تعد أنفاق القطارات من أهم أنفاق النقل، وتكثر عادة في المناطق الجبلية وتنفذ أحياناً للعبور تحت الأنهار أو لتجاوز المناطق السكنية المكتظة الشكل رقم (3-2).

الشكل رقم (3-2) يوضح أنفاق القطارات

2. أنفاق الطرق (Highway Tunnels):

مع زيادة حركة السير على الطرق الرئيسية ومع تطور صناعة السيارات أصبح تنفيذ هذا النوع من الأنفاق لإختراق المناطق الجبلية أو تحت المجاري المائية (الأنهار) أو تحت الساحات والمناطق المكتظة ضرورة ملحة لتشكل إستمراراً مباشراً للطرق .(الشكل رقم4-2)

الشكل رقم (4-2) يوضح أنفاق الطرق

3. أنفاق المشاة (Pedestrian Tunnels):

ينتمي هذا النوع من الأنفاق إلى أنفاق الطرق لكن مقطعها العرضي أصغر لأنها غير مخصصة لمرور السيارات بل يستخدمها المارة وبالتالي ليس من الضروري أن تكون مقاطعها العرضية كبيرة أو ميولها الطولية صغيرة ، ويمكن أن تنتهي بأنفاق شاقولية تحتوي على مصاعد لنقل المارة من خلالها إلى سطح الأرض الشكل رقم (5-2).

الشكل رقم (5-2) يوضح أنفاق المشاة

4. أنفاق المحطات الكهرومائية (Hydroelectric Plant Tunnels):

يتم تحويل مياه الأنهار وتمريرها عبر أنفاق تصل عادةً بين خزان مياه (reservoir) عالي المستوى إلى محطة لتوليد الطاقة الكهربائية تقع في مستوى منخفض ، وُيصمم المقطع العرضي لهذه الأنفاق على شكل حذوة حصان أو دائري ليتحمل ضغط المياه العالي الناتج من الفرق الكبير بين مستوى المياه في الخزان ومستوى محطة توليد الطاقة الشكل رقم(6-2).

الشكل رقم(6-2) يوضح أنفاق المحطات الكهرومائية

5. أنفاق تزويد المياه (water tunnels):

تستخدم هذه الأنفاق لنقل مياه الشرب بالجريان الحر من الينابيع أو الأنهار إلى خزانات تجميع المياه في المدن مثل نفق مياه عين الفيجة الذي يجر مياه نبع عين الفيجة إلى مدينة دمشق الشكل رقم(7-2).

الشكل رقم(7-2) يوضح أنفاق تزويد المياه

6. أنفاق مياه المجاري (الصرف الصحي)(Sewer Tunnels):

تنفذ هذه الأنفاق لتصرف المياه الناتجة من الإستخدامات المختلفة (مياه عادمة) (sewage) ، وهي تشبه أنفاق التزويد بمياه الشرب من حيث أن الجريان فيها يتم تحت تأثير الثقالة، ولكن يجب حماية جدران هذه الأنفاق بطلائها بمواد خاصة لأن المياه المصروفة تكون محمّلة عادةً بمواد عدوانية تؤدي إلى تآكل المواد المكونة لجدران الأنفاق الشكل رقم(8-2).

الشكل رقم (8-2) يوضح أنفاق الصرف الصحي

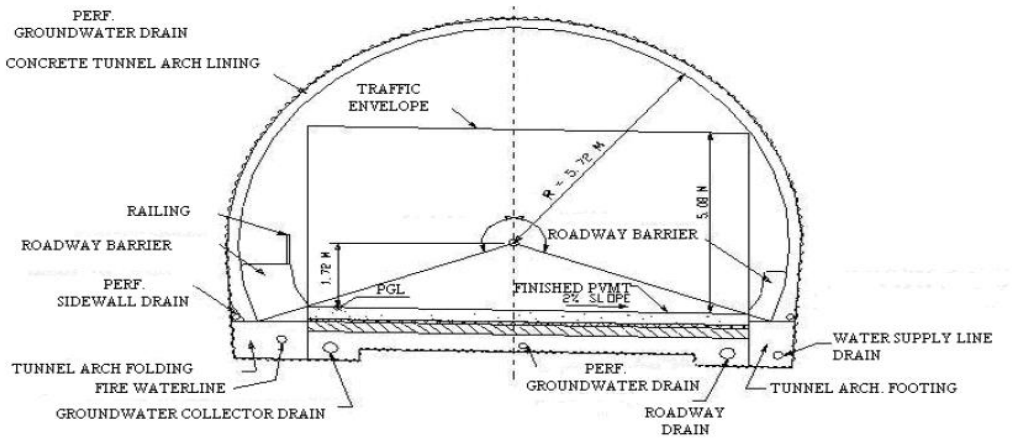
7. أنفاق المرافق (Utilities Tunnels):

تنفذ هذه الأنفاق عادةً في المدن ليمرر فيها كابلات الطاقة والهاتف وأنابيب الماء والغاز ، ويمكن أن تتسع لمرور آلية أوعربة من قياس معين تستخدم في أعمال الكشف عن الأعطال والصيانة، ويختلف هذا النوع من الأنفاق عن الأنفاق السابقة بطريقة الدخول والخروج من النفق حيث يتم غالباً الوصول إلى سطح الأرض عبر أنفاق شاقولية الشكل رقم (9-2)

الشكل رقم (9-2) يوضح أنفاق المرافق

5.1.2 عناصر مقطع النفق الرئيسية :

على الرغم من أن العديد من أنفاق الطريق تظهر مستطيلة من الداخل تحدها الجدران والسقف والرصيف ، لكن قد لاتكون الشكل الفعلي للنفق مستطيل، وهناك عادة ثلاثة أشكال عامة للأنفاق وهي إما دائرية أو مستطيلة أو وحدوة حصان، ويعتمد تحديد شكل مقطع النفق بشكل أساسي على حالة الأرض وأساليب التشييد المتبعة،الشكل رقم (10-2)



الشكل رقم (10–2) يوضح العناصر المكونة لمقطع النفق

وتشمل عناصر المقطع العرضي النموذجية:

- ممرات التنقل (Travel lanes).
- أكتاف (Shoulders).
- الأرصفة وحواف الأرصفة (Sidewalks and Curbs).
- تصريف النفق (Tunnel drainage).
- تهوية النفق (Tunnel ventilation).
- إضاءة النفق (Tunnel lighting).
- مرافق النفق والطاقة (Tunnel utilities and power).
- أنابيب إمدادات المياه لإطفاء الحرائق (Water supply pipes for firefighting).
- خزائن بكرات خراطيم وطفايات الحريق

(Cabinets for hose reels and fire extinguishers).

- اشارات وعلامات فوق ممرات الطريق

(Signals and signs above roadway lanes).

- كاميرات المراقبة (CCTV surveillance cameras).
- هواتف الطوارئ (Emergency telephones).
- هوائيات الاتصالات / معدات (Communication antennae/equipment).
- معدات مراقبة الانبعاثات الضارة والرؤية

(Monitoring equipment of noxious emissions and visibility).

- مخارج الطوارئ وعلامات مضيئة في مستوى منخفض (بحيث تكون مرئية في حالة نشوب حريق أو الدخان)

(Emergency egress illuminated signs at low level (so that they are visible in case of a fire or smoke condition)).

قد تكون هناك حاجة عناصر إضافية في إطار متطلبات التصميم معينة ويجب أن تؤخذ بعين الاعتبار عند وضع التكوين الهندسي النفق.

6.1.2 خطوات إنشاء النفق :

هنالك ثلاث خطوات أساسية يجب اتباعها بجدية خلال عمليات إنشاء وبناء الأنفاق النظامية عموما :

- **الخطوة الأولى** : وهي عملية التنقيب حيث يقوم المهندسون بعملية تثقيب في الأرض بإستخدام التقنيات المناسبة وذلك تبعاً لنوع التربة والصخور .
- **الخطوة الثانية** : وهي عملية التدعيم حيث يجب على المهندسين خلال عملية الحفر البدء بإجراءات التدعيم للأسقف والجدران غير المستقرة و القابلة للانهيار .
- **الخطوة النهائية** : وهي عملية التبطين حيث يقوم المهندسون بإضافة اللمسات الأخيرة ، كرصف الطرقات والإنارة والعمليات التكميلية الأخرى .

7.1.2 بطانــة الانفــاق :

1.7.1.2 تعريف البطانة:

بما أن الانفاق تحفر تحت الأرض وخوفا من سقوط السقف الذي هو مجموعة من الأتربة يتم تدعيمها بالبطانة التي تصنع من مواد مختلفة منها: الخشب، البلاستيك ،المعادن، الخرسانة المسلحة، والتي يتم تحديد نوعية البطانة فيها بإعتبار المقطع العرضي للنفق ، فاذا كان:

- المقطع منتظم وسهل مثل المستطيل نستعمل بطانة جاهزة مسبقة الصنع .
- المقطع غير متجانس نستعمل بطانة مباشرة يتم صنعها في الموقع.

2.7.1.2 الشروط التي يجب أن تتوفر في البطانة :

1. سهولة التنفيد .
2. التماسك مع التربة.
3. لا تتفاعل مع الوسط الخارجي.

3.7.1.2 أنواع مواد التبطين:

1. التبطين بالخشب:

هي مادة رخيصة نظراً لوجودها في طبيعة مثل أشجار الصنوبر توضع على شكل ألواح .

من مميزاتها: قلة وزنها ، سهولة استعمالها.

من عيوبها: قصر عمرها بسبب تعفنها، ضعف تحملها ،سهولة تخريبها.

2. التبطين بالمعادن :

هي أفضل من سابقتها مثال لها الزهر والفولاذ.

من مميزاتها : انها ذات مقاومة عالية .

من عيوبها: تكلفتها الباهضة، وتعرضها إلى الصدأ بسبب سهولة تفاعلها مع المياه والغازات الموجودة في باطن الأرض.

3. التبطين بالخرسانة والخرسانة المسلحة :

تعتبر الخرسانة أحسن أنواع التبطين وهي شائعة الإستعمال في الوقت الحالي ولتدعيمها نضيف للخرسانة الفولاذ وتسمى بخرسانة مسلحة ، نستعمل هذا النوع في الأنفاق التي تبنى في الأرض جافة، ولا يناسب الأراضي التي تحتوي على كمية كبيرة من الماء وذلك بسبب صدأ الفولاذ بالتالي نقص في مقاومة الضغط ، وكذلك تسرب المياه من البطانة إلى النفق فتكثر الرطوبة داخل النفق .

من مميزاتها : تتحمل الضغط الكبير الذي تولده الأرض على النفق ، كما أن تفاعلها مع الوسط المحيط به وما يحتويه من ماء وغازات قليل ، تكلفتها الرخيصة.

ندعم البطانة بملء الشقوق بين المقاطع بالرصاص ، أما الفراغ الموجود بين البطانة والتربة يملأ بالكلس.

8.1.2 تشييد النـفـق :

إن كلّ نفق تقريباً هو حل لتحدي أو لمشكلة معيّنة في العديد من الحالات ، و هذا التحدي هو عقبة على طريق أو على سكة حديد ويقوم النفق بتجاوزها فربما تكون هذه العقبة أجسام مائية أو جبال أو طرق نقل أخرى وأحياناً تكون حلاً أكثر أماناً.

تعتمد كيفية بناء النفق بشدّة على المواد التي تساهم في بنائه كما أن حفر النفق خلال أرض ناعمة على سبيل المثال تتطلّب تقنيات مختلفة جداً عن حفر نفق خلال الصخر الصلب أو الصخرة الناعمة مثل الطين الصفحي أو الطباشير أو الحجر الرملي وبنفس المنوال فإن حفر نفق تحت الماء يشكل تحدّياً أكبر في كلّ البيئات ولهذا السبب إن التخطيط مهم جداً من

أجل مشروع نفق ناجح إذ يقوم المهندسون بإجراء تحليل جيولوجي شامل لدراسة نوع المادّة التي سيحفرون النفق خلالها ويقيّمون الأخطار النسبية للمواقع المختلفة ويأخذون بعين الاعتبار العديد من العوامل مثل :

1. أنواع الصخور والتربة.
2. الطبقات والمناطق الضعيفة و يتضمن ذلك مناطق القصّ والشقوق.
3. المياه الجوفيّة و يتضمن ذلك نمط التدفق والضغط.
4. أخطار خاصّة كالحرارة والغاز وخطوط الشق.

في أغلب الأحيان يشيد النفق الواحد بأكثر من نوع واحد من المواد أو سيواجه أخطار متعدّدة ولهذا يسمح التخطيط الجيد للمهندسين بالتصميم من أجل هذه الاختلافات منذ البداية وهذا يقلل التأخيرات الغير متوقّعة التي تحدث في منتصف المشروع وعندما يقوم المهندسون بتحلّيل المواد التي سيشيد بها النفق ويقومون بخطة تنقيب عامّة يمكن وقتها بدء البناء ولذلك كان لابد من عمل تحريات جيولوجية .

1.8.1.2 التحريات الجيولوجية (Geological Investigation) :

قبل تنفيذ أي نفق لابد من اجراء تحريات جيولوجية مستفيضة للموقع المختار لتقدير المخاطر التي يمكن مواجهتها وللتأكد من شروط التربة والمياه الجوفية.

ومن أهم العوامل بالإضافة إلى أنواع التربة والصخور التي تحدد سلوك كتل الصخور ما يأتي:

1. حجم كتل الصخور بين نقاط اتصالها (rock joints).
2. تحديد الطبقات والمناطق الضعيفة مثل الصدوع والمناطق المتأثرة بالعوامل الجوية.
3. طبقات المياه الجوفية وكميتها و نوعها ونمط جريانها وضغطها.
4. دراسة بعض المخاطر الخاصة كالحرارة والغازات والهزات الأرضية.

تقسم التحريات إلى تحريات جوية وسطحية وعميقة حيث تحفر آبار عميقة يتم من خلالها تعرف طبقات الأرض وخصائصها الكيميائية والفيزيائية والميكانيكية.

عندما تكون الشروط الجيولوجية معقدة ومقطع النفق العرضي كبيراً يصبح تنفيذه مكلفاً جداً وأحياناً غير عملي، ولهذا يجب تنفيذ برنامج تحريات جيولوجية مكثّفة في مرحلة التصميم للتأكد من الشروط الجيولوجية على طول مسار النفق، وتستمر التحريات الجيولوجية في أثناء التنفيذ بحفر نفق استكشافي في مقدمة النفق المراد حفره ، وقد يؤدي ذالك في كثير من الأحيان إلى معلومات جيولوجية جديدة تحتم تغيير التصميم الأصلي للنفق.

عندما يكون النفق غير عميق من سطح الأرض يصبح تنفيذ آبار شاقوليه لتحري الطبقات من سطح الأرض حتى تلك التي سيحفر فيها النفق أمراً ضرورياً وعملياً. ولهذا في أغلب الأنفاق غير العميقة تنفذ آبار على طول محور النفق عند مسافات بين (30–150 m) لأخذ عينات غير مضطربة من التربه والصخور لتحديد خصائصها الهندسية المختلفة كمقاومتها ومساميتها، وكذلك لتحديد مستوى المياه الجوفية وكميتها ونوعيتها.

2.8.1.2 تهوية الأنفاق :

تنقسم إلى قسمين:

1. أثناء التشـــييد:

تحتاج الأنفاق إلى التهوية للمحافظة على العاملين وذلك بتزويدهم بكميات كافية من الأكسجين كذلك لتخفيف درجة تركيز الغازات (خاصة بعد أعمال التفجير) والأتربة والظروف الجوية العادية ويمكن تحقيق ذلك عن طريق فتحات رئيسية مؤقتة (Shaft) تمتد من السطح الى سقف النفق أو عن طريق مداخل النفق وذلك بتركيب مراوح سحب (Exhaust Fan) لتزويد الأنفاق وبإستمرار بكمية كافية من الهواء وطرد الملوث منها .

2. بعد التشـييد:

قد تتطلب الأنفاق التهوية لمجموعة متنوعة من الأسباب ، على سبيل المثال لضمان كمية الهواء الكافية ، للسيطرة على انتشار الدخان في حالة نشوب حريق ، أو لتقليل درجات الحرارة إلى حدود مقبولة وتختلف نظم التهوية باختلاف نوع النفق (أنفاق المركبات: الطرق والسكك الحديدية والمترو) عموما تتطلب الأنفاق نوعية وجودة هواء عالية في حالة الدخان العادي بالاضافة للتحكم في كمية الهواء في حالة نشوب حريق، وتتطلب أنفاق المناجم والأنفاق عموما محطة تهوية كافية لتلبية الاحتياجات الفسيولوجية والتبريد والسيطرة على الدخان.

- **المبدأ الأساسي لتهوية النفق :**

المبدأ هو التخفيف من الإنبعاثات الصادرة من المركبات عن طريق توفير الهواء النقي ومن ثم إزالة الهواء العادم من النفق. ويمكن إزالة الهواء العادم عبر بوابة الموقع حيث يفتح النفق مسار يصل إلى البيئة المحيطة أو التهوية عن طريق منفذ (مثل كومة) ، أو عن طريق مزيج من الاثنين معا .نجد أن كمية الملوثات التي يتم إنتاجها في نفق في وحدة الزمن يتم تحديدها من قبل حساب العدد الإجمالي للسيارات في النفق مضروباً في نسبة الانبعاثات من كل السيارة.

- **نظم التهوية:**

هناك عدد من الخيارات المتاحة لأنظمة التهوية الأنفاق ، بما في ذلك : عرضية وشبه عرضية و وطولية .

1. التهوية العرضية:

التهوية العرضية تعمل على نفس مبدأ تخفيف وإزالة الهواء كما في التهوية الطولية ولكن ادخال الهواء النقي وإزالة الهواء العادم يحدث عبر النفق (أي بالعرض). يتطلب هذا النظام

اثنين من القنوات على طول النفق، واحدة لتوريد الهواء النقي واحد لإستنفاد الهواء الملوث . هذه القنوات يمكن أن تكون موجوده في مستوى عال أو منخفض في النفق، أو واحد على أدنى مستوى وواحد على مستوى عال. وقد استخدمت التهوية العرضية في الماضي حيث أن التهوية الطولية لم تستطع إدارة مستويات الملوثات للأنفاق بطريقة كافية . التهوية العرضية هي أيضا فعالة في الأنفاق ثنائية الإتجاه (حيث المركبات تتحرك في كلا الإتجاهين من نفس النفق) فنتيجة لظروف حركة المرور هذه ، تصبح مستويات الملوثات أكثر لذلك توزع بالتساوي على طول النفق.

2. التهوية شبه العرضية:

التهوية شبه العرضية هي مزيج كل من التهوية الطولية والعرضية . يمكن توفير الهواء النقي من البوابات والذي يستنفد بشكل مستمر على طول النفق من خلال لاصق على طول النفق. بدلا من ذلك الهواء النقي يمكن توفيره بشكل مستمر على طول النفق عبر القناة واستنفدت للخروج من النفق عبر البوابات أو كومة.

3. التهوية الطولية :

هي أبسط شكل من أنظمة التهوية، وينطوي على إدخال الهواء النقي من بوابة الدخول و إزالة الهواء العادم بالخروج من بوابة الخروج أو منفذ التهوية (أو مزيج من الاثنين معاً)، وتستخدم للأنفاق القصيرة التي هي على بعد (3km) أو أقل في الطول، ويفضل أنظمة التهوية الطولية عموما بسبب تكلفة البناء المنخفضة بالإضافة إلى أنها تعمل على التخفيف من خطر الحرائق والحفاظ على نوعية وكمية الهواء الكافية ، يمكن تثبيت أنظمة التهوية الطولية في أنفاق أطول بكثير حوالي(18 km) لكن تغير نهج تهوية الأنفاق وأصبح أكثر كفاءة وفعالية ، وكانت التهوية الطولية في مرة واحدة بكميات من الهواء النقي ليست مناسبة لتخفيف الإنبعاثات

من المركبات .لكن بسبب صناعة المركبات الأنظف، والمصممة تصميماً جيداً يمكن لنظام التهوية الطولي الأن بسهولة الحفاظ على نوعية هواء مقبولة في أنفاق ذات طول أكبر. جميع أنفاق الطريق التي بنيت في أستراليا خلال آخر20 عاما قد تم تصميمها مع أنظمة تهوية طولية. نفق ميناء سيدني شيد عام 1992 مع نظام تهوية عرضي ولكن مع ذلك يبدو كما لو انه يستخدم التهوية العرضية .

3.8.1.2 تصريف الأنفاق :

في التصميم الجيد لا بد من الأخذ في الإعتبار التصريف ، عادة يتم توفير أنظمة مضخة في البوابات وعند نقاط منخفضة ، وينبغي توفير الصرف الصحي للطرق في جميع أنحاء النفق باستخدام مداخل وأنابيب الصرف الصحي، وأيضاً تصميم نظام الصرف الصحي للتعامل مع الصرف السطحي وكذلك أي تسلل للمياه الجوفية داخل النفق، بالإضافة لمناطق أخرى من الأنفاق، مثل أنابيب التهوية والمواقع المحتملة للتسرب .

- **متطلبات تصريف الأنفاق:**

1. يجب أن تكون أنفاق الطريق مجهزة بنظام الصرف الصحي الذي يتكون من أنابيب وقنوات و مضخة ، وأنظمة التحكم الآمنة والموثوق بها مثل جمع وتخزين والتخلص من المواد السائلة التي قد جمعت وما تحتويه و خلاف ذلك.
2. يجب توفير الصرف الصحي في الأنفاق للتعامل مع المياه السطحية وكذلك تسرب المياه ، ومع ذلك ينبغي أن يكون حجم خطوط الصرف الصحي وحوض المضخات كافي لإستيعاب تسرب المياه و متطلبات مكافحة الحرائق.
3. وينبغي أن تصمم بحيث أنه في حالة نشوب حريق ألا ينتشر من خلال نظام الصرف الصحي في الأنابيب المجاورة و ذلك من خلال عزلهم لضمان الأمن والسلامة ، لذلك

نجد أن الأنابيب البلاستيكية، وأنابيب الألياف الزجاجية ، أو أي مواد أخرى قابلة للاشتعال لا ينبغي أن تستخدم.

4. وينبغي توفير برك مع الشباك لجمع وازالة المواد الصلبة وينبغي توفير مصائد الرمال ، وكذلك فصل النفط والوقود، ويمكن الافتراض أنه في التحجيم للبرك أن الحرائق والعواصف لا تحدث في وقت واحد.
5. يجب أن تكون البرك والمضخات في نقاط منخفضة من النفق وعلى البوابات للتعامل مع المياه التي قد تنجم داخل النفق ، ويجب أن يكون حجم البرك يتتناسب مع دورة مضخات التفريغ بحيث لا تسبب الحركة أي تدفق ، وينبغي تصميم البرك لتكون قادرة على أن يجري تنظيفها بانتظام.

4.8.1.2 الإضاءة في الأنفاق :

الإضاءة في الأنفاق تساعد السائق في تحديد المخاطر أو مركبات المعاقين داخل النفق وتعمل علي توفير مسافة كافية للرد بأمان أو للتوقف.

ضوء المستويات العالية (ضوء منطقة البوابة) وعادة ما تكون مطلوبة في بداية النفق خلال النهار للتعويض عن(تأثير الثقب الأسود) الذي يحدث من قبل التظليل الناتج علي الطريق من قبل هيكل النفق وسوف تستخدم هذه المستويات ارتفاع الضوء فقط خلال النهار.

تقع مصابيح النفق عادة في السقف أو تشيد على الجدران بالقرب من السقف.

لا بد من أن نلاحظ أن الموقع والحجم ونوع وعدد من مصابيح تؤثر على المتطلبات الهندسية للنفق وينبغي أن تؤخذ بعين الإعتبار.

9.1.2 تنفيـذ الأنفــاق :

بعد تحديد مسار النفق وإنجاز التحريات الجيولوجية لطبقات التربة والصخور يُصمم شكل المقطع العرضي للنفق وهيكله الإنشائي ليقاوم الأحمال المنقولة إليه نتيجة الإخلال بعملية التوازن بين الصخور في أثناء حفر النفق ، وعموماً يتم اختيار مقطع عرضي دائري أو قريب من ذلك ليقاوم القوى الخارجية والداخلية، وتنفذ أعمال الحفر في الصخور القاسية جداً بالتثقيب والتفجير، تتم أعمال الحفر في الصخور المتوسطة القساوة بواساطة مكنات حفر الأنفاق(tunnel-boring machine) ، أما في الصخور والتربة الطرية فتنفذ بوساطة درع (advancing shield) يتقدم فيضغط التربة إلى داخل النفق، وفي جميع الأحوال تُجمع نواتج الحفر (الأنقاض) وتُنقل إلى خارج النفق.

1.9.1.2 تنفيذ الأنفاق في الصخور الصلبة (hard rock tunneling):

تُنفذ الأنفاق القصيرة فقط من بوابة النفق، في حين يتم تنفيذ الأنفاق الطويلة بمساعدة أنفاق شاقولية إضافية أو بمساعدة نفق صغير موازٍ للنفق الرئيسي ويتصل به عند عدة نقاط. يعد النفق الصغير نقاط عبور للنفق الرئيسي وطريقاً لنقل الأنقاض ومجاري التهوية وخطوط الصرف.

عندما يكون المقطع العرضي للنفق كبيراً يُنفذ الحفر على مرحلتين متتاليتين الاولى للجزء العلوي من المقطع العرضي (heading)، تتبعها الأخرى للجزء السفلي (bench) مما يسمح بتزامن أعمال التثقيب للمتفجرات في الجزء العلوي والترحيل في الجزء السفلي، وعندما تطورت طرائق تنفيذ الأنفاق ومعداتها صار من الممكن تنفيذ أعمال الحفر على كامل المقطع العرضي(full-face) وذلك بعد اختراع آلة حفر الثقوب العملاقة الجامبو(jumbo)، وهي

منصة مُتحركة رُكِّب عليها أذرع تثقيب عملاقة تستطيع تنفيذ ثقوب لتزرع فيها المتفجرات على كامل وجه النفق (المقطع العرضي) دفعة واحدة.

تُحفر ثقوب التفجير بقطر بضع سنتمترات بوساطة مثاقب فولاذية دوارة مع ضخ للماء عبر ثقب عند رأس المثقب فيبرده من جهة ويُخفض كمية الغبار الناتج من الحفر، يتراوح عمق الثقوب بين 1.2m و3.5m، ويؤدي نوع الصخور دوراً أساسياً في تحديد عمق الثقوب فيقل العمق عندما تكون الصخور ضعيفة ومفككة، وفي كل الأحوال يجب ألا يزيد عمق الثقوب عن عرض النفق.

تُنفّذ الثقوب عادةً طبقاً لنمط أو شكل محدد مسبقاً وذلك طبقاً لنوع الصخور وشكل طبقاتها، ويتم التفجير وفق تتابع زمني محدد، وذلك بغية الحصول على أكبر كمية من الحفر في عملية تفجير واحدة ، وقد جرت العادة أن تُنفذ مجموعة من الثقوب المائلة إلى الداخل على شكل حلقة في مركز وجه النفق وأن يتم تفجيرها أولاً ومن ثم يتبعها بتأخير زمني قليل تفجير الثقوب الأبعد عن المركز والتي تميل إلى الخارج ، وذلك باستخدام صواعق تفجير تأخيرية ، ويعتمد مقدار هذا التأخير على طبيعة نوع الصخور.

يتم إزالة الصخور المخرَّبة بالتفجير بوساطة آليات كهربائية مخصصة، وفي بعض الأحيان عندما تكون تهوية النفق جيدة تُستخدم الآليات التي تعمل على الديزل لرفع نواتج الحفر ونقلها إلى خارج النفق.

يجب تدعيم النفق مع استمرار الحفر في أغلب شروط الصخور عدا حالة التشكلات الصخرية القاسية لأن التدعيم يمنع تساقط الصخور في أثناء أعمال التفجير التالية ويسند كتل الصخور التي ضعفت نتيجة أعمال الحفر ولتثبيت كتل الصخور مع بعضها خاصة في منطقة

السقف حيث يتم إدخال هذه القضبان في ثقوب معدة مسبقاً تحقن في أغلب الأحيان حولها مادة رابطة لضمان التماسك بين هذه القضبان وكتل الصخور.

بعد الانتهاء من أعمال التدعيم تُنفذ للنفق بطانة خرسانية، وتؤجل هذه البطانة عادةً إلى ما بعد الانتهاء من أعمال التثقيب والتفجير والترحيل إلا إذا كان هناك حاجة إلى البطانة الخرسانية لسند الصخور الضعيفة، تُصنع القوالب الخاصة لصب هذه البطانة من الخشب أوالحديد وفي كثير من الأحيان تركَّب هذه القوالب على سكك من أجل سرعة حركتها، وأحياناً أخرى تُصنع قوالب متحركة تلسكوبية (telescope) بحيث يدخل جزء القالب غير المستخدم تحت الجزء المستخدم ويحرك إلى موقع متقدم ليُرفع هدروليكياً إلى الارتفاع المناسب وتُصب الخرسانة بينه وبين الفجوة المحفورة .

- القوى المؤثرة على الأنفاق الصخرية:

الجدران الصخرية تتميز بتماسكها وكثافتها لتشكل دعامة مسبقة للنفق ، وبعض المقاطع العرضية في الصخر أقل كثافة من الأجزاء الأخرى ، وبالتالي تقوم هذه المقاطع الغير ثابتة (غير مستقرة) بالتأثير بقوة على جدران النفق .

2.9.1.2 تنفيذ الأنفاق في الأرض الطرية (soft-ground tunneling):

الانفاق هنا تعرف بانها أنفاق نموذجية قليلة العمق تستخدم عادة كأنفاق مشاة ، ذات أنظمة تصريف للمياه وبالوعات ، بسبب طبيعة الأرض الطرية تستخدم الإنشاءات التدعيمية التي تدعى واقية النفق Tunnel Shield التي يتم تثبيتها في مقدمة النفق لحمايته من التداعي والانهيار بسبب طبيعة أرضه أو تربته الرخوة .

- القوى المؤثرة على هذا النوع من الأنفاق:

هي التربة الثقيلة والرطبة تدفع من مختلف الجهات بإتجاه النفق ، وتخضع الجدران لقوى ضغط تجاذبية من قبل الأرض ومن مختلف الجهات .

وتشمل الأنفاق التي تحفر في الصخور الطرية أو التربة بجميع أنواعها، ولا تحتاج إلى أعمال التفجير التي ذكرت في الجزء السابق ، ويشتمل حفر هذا النوع من الأنفاق على مخاطر عديدة نتيجة الإنهيارات التي يمكن أن تحدث في أثناء تنفيذ أعمال الحفر، ولهذا يدعَّم سقف النفق وجدرانه بأسطوانة فولاذية تدعى الدرع(shield) ليتحمل ضغط التربة الطرية، يتألف الدرع من غلاف من الصفائح الفولاذية على شكل أسطوانة تقسم إلى ثلاثة أجزاء تختلف بصلابتها ومرتَّبة طبقاً للغاية منها وهي:

1. **الجزء الأمامي:** مقوى بفولاذ مصبوب ليشكل النهاية القاطعة (cutting edge) مهمته الأساسية تسهيل تقدم الدرع وتوجيهه بإختراق التربة والصخور، ومهمته الثانوية توفير ملجأ آمن لعمال الحفر. تمتد النهاية القاطعة بضع أقدام أمام حاجز (diaphragm) مدعم بقوة يحتوي على عدة فتحات تستخدم في حفر الصخور والأتربة الواقعة أمام الدرع.
2. **الجزء الأوسط** : يوفر حجرة لمعدات الدفع الهيدروليكية وأجهزته.
3. **جزء الذنب** : يساعد على بناء بطانة النفق، خاصة إذا كانت من النوع الذي يركب من أجزاء مسبقة الصنع.

يُلحق بالدرع عادةً تجهيزات حفر ورفع للأنقاض وسيور ناقلة ومعدات لتركيب بطانة النفق والحقن خلفها .

وحديثاً تم تزويد هذا النوع من الآلات بأذرع هدروليكية تقوم بالحفر أمام الدرع .

تتألف دورة العمل (cycle of operation) من دفع إلى الأمام ثم تبطين النفق ثم ترحيل الأنقاض. ويستخدم في التبطين قطع من الخرسانة مسبقة الصنع تركب وتجمع مع بعضها ببراغٍ من أجل التدعيم المناسب لجدران النفق وسقفه، ولضمان عدم تسرب الماء بعد أن تغلق الفواصل بين القطع بمواد خاصة.

ومن الملاحظ أنه عند حفر الأنفاق في الأرض تحت الأجسام المائية يؤدي ذلك إلى تسرب كمية كبيرة من المياه إلى داخل النفق في أثناء تشييده ولمنع ذلك يتم ضخ كمية كبيرة من الهواء عند رأس النفق للحصول على ضغط عالٍ يفوق ضغط الماء في خارجه فيتوقف تسرب الماء (استخدمت هذه الطريقة في تنفيذ أنفاق القطارات تحت نهر التايمز في لندن وكذلك تحت نهر إيست ريفر في نيويورك).

3.9.1.2 تنفيذ الأنفاق المغمورة (sunken-tube tunnel):

تنفذ الأنفاق المغمورة بحفر خندق في قاع نهر أو أي جسم مائي ثم يجري تعويم أجزاء النفق الفولاذي أو الخرساني مسبق الصنع المقفل الأطراف (الشكل 10) حتى يصل إلى المكان المناسب فوق الخندق فَتُرسى في المكان المخصص لها في الخندق وتُجمع الأجزاء لتشكل نفقاً تحت الماء (استخدمت هذه الطريقة في نفق نهر ديترويت في الولايات المتحدة الأمريكية الذي تم بناؤه بين عامي(1906–1910)

- القوى المؤثرة على الأنفاق تحت المائية:

يؤثر ضغط الماء بقوى عمودية على جدران النفق ، وتنضغط جدران النفق بتأثير القوى الضاغطة المائية .

4.9.1.2 تنفيذ الأنفاق قليلة العمق (shallow tunnels):

يكون عمق النفق عن سطح الأرض عادة في المدن قليلاً بغية تسهيل وصول الركاب وأعمال الصيانة ، لذا يحفر خندق على طول النفق وينفَّذ فيه هيكله الخرساني المسلح ثم يعاد ردم التربة حوله بعد تنفيذ طبقات عزل مائي مناسبة له من الخارج تسمى هذه الطريقة بطريقة الحفر ثم الردم (cut-and-cover) وفي هذه الحالة يصمم الهيكل الإنشائي للنفق ليحمل كل وزن التربة فوقه لأن الفعل القوسي في التربة لم يعد موجوداً بسبب تخرب التربة عند حفرها.

و هذه الطريقه اقتصادية و سريعة مقارنةً بالطرق الأخرى كما أنه بواسطتها يمكن العمل في طول المنشأ ككل وفي آن واحد إلا أنه يعيبها أنها تعطل حركة المرور على السطح أثناء الانشاء و ترتبط بالتخطيط الموجود للشوارع و مكلفة في تحويل الخدمات مثل خطوط التلفون ، و خطوط القوى و المجاري و المياه و الغاز ... الخ .

ولابد من الاشارة أنه وفي أغلب الأحيان يتم استخدام طريقة المناجم لتنفيذ الأنفاق ويتم الحفر في باطن الارض دون الاخلال بسمك التربة الموجودة فوق النفق و دون المساس بالسطح و هذه الطريقة يمكن استعمالها بالنسبة للأعماق الكبيرة أكثر من 10m و يجب ملاحظة أن تقدم العمل في إنشاء الممرات تحت الأرض تكون بطيئة بهذه الطريقة فلا تتعدى سرعة الانشاء عن10m−30 طولي في الشهر الواحد و ذلك بالنسبه لأنفاق المواصلات تحت المدن و في هذه الطريقة يقسم النفق الى أجزاء يبلغ طول الواحد منها حوالي كيلومتر أو اكثر ثم تنشأ آبار رأسية في كل جزء على حدة حتى تصل إلى المنسوب المطلوب ثم بعد ذلك يبدأ العمل في حفر النفق أفقياً من كل بئر و في إتجاهين متضادين أي في إتجاه البئرين القريبين و هكذا يستمر العمل في جميع الآبار حتى يتم توصيل الأنفاق ببعضها البعض فنحصل في النهاية على الشكل النهائي للنفق المطلوب ، و الغرض من الآبار في أنها تحقق زيادة مواجهة

العمل كما أنها تستخدم كوسيلة لإنزال العمال و الماكينات و المواد اللازمه للعمل و كذلك استخراج ناتج الحفر كما تستخدم بعد انتهاء العمل لأغراض التهوية و ذلك في حالة وجود النفق في أرض جافة أما بالنسبة اذا كان طول النفق صغيراً أو على عمق كبير من سطح الأرض بحيث أن تكاليف الآبار ستكون مرتفعة بالنسبة لتكاليف الانشاء كما هو الحال بالنسبه للانفاق التي تخترق الجبال لتصل بين مدينتين فيبدأ العمل من الطرفين دون الحاجة إلى إنشاء الآبار .

و بالنسبة للمنشآت تحت الارض المستعملة كمصانع أو كمخازن للاغراض العسكرية و كذلك كملاجئ للطائرات فيمكن الوصول إليها عن طريق مداخل رأسية أو مداخل مائلة أو مداخل أفقية على ألا يقل عددها عن اثنتين بأي حال من الاحوال.

10.1.2 حفر التربة :

1.10.1.2 الوسائل المستخدمة في حفر التربة (حسب صلابه و خواص التربه):

1. يدويا بالأزميل و الكواريك و تستعمل في حالة عدم وجود أي وسائل ميكانيكية أو في حالة أن تكون الأراضي في ظروف هيدرولوجية صعبة .

2. بواسطة الأدوات و الآلات الميكانيكية و ذلك بواسطة الشواكيش الكهربائية و التي تعمل بالهواء المضغوط .

3. بواسطه معدات الحفر(HEADING MACHINE) و هي عبارة عن ماكينات تقوم بحفر التربة و تحميله على وسائل النقل .

4. بواسطه وسائل التخريم و النسف و تنفذ في حالة الصخور الشديدة الصلابة و المتوسطة و تتوقف تحديد كمية المفرقعات اللازمة للمتر المكعب من الصخور في النفق على نوع المفرقعات و صلابة الصخور و سطح القطاع و نسبة المتشققات الطبيعية الموجودة بها و

تنفذ أعمال التخريم في توالٍ محدد على هيئة دورة cycle و عناصر هذه الدورة هي وضع معدات التخريم ، تخريم الأخرام ، سحب المعدات من الواجهة ، وضع العبوات و تفجير الأخرام ، تهوية الحفر (بهواء نظيف) ، معاينة الواجهة و إزالة الأجزاء العالقة من التربة و في النهاية تحميل التربة المنسوفة و نقلها من الواجهة .

5. بواسطة الوسائل الهيدروميكانيكية .

6. بواسطة طرق خاصه نلجأ إليها في بعض الطبقات مثل الأراضي الرملية أو الطبقات الطينية أو الأراضي الصخرية الموجودة بها نسبة كبيرة من التشققات و المياه الجوفية التي تتدفق مع استمرار العمل بحيث توقفه و تصبح معطلة له و كذلك الطينية و الرملية الموجودة تحت منسوب المياه الجوفيه و في هذه الحالة نلجأ إلى استعمال احدى الطرق الخاصة .

2.10.1.2 تنفيذ الأنفاق بواسطة آلة الحفر

(TBM) (Tunnel-Boring Machines)

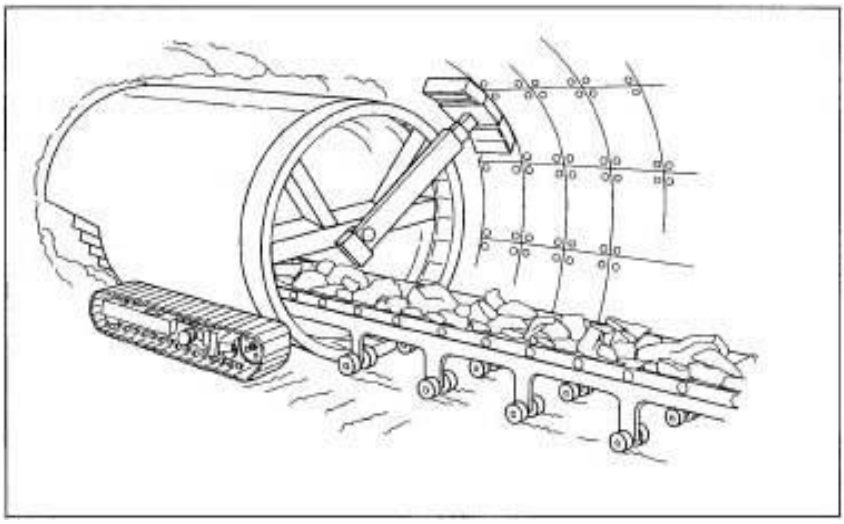
أستعملت أول مرة عام 1883 من قبل المهندس البريطاني فريدريك بومونت (Frederick Beaumont) عندما بدأ التفكير بتنفيذ نفق تحت القنال الإنكليزي وعلى الرغم من أن العمل أُوقف في حينها فإن آلة الحفر TBM شكلت نجاحاً غير مسبوق حيث كانت تحفر 15mمن طول النفق يومياً، ونجد أنها أستخدمت أيضاً عندما صار تنفيذ الأنفاق ضرورة ملحة ونتيجة إرتفاع أجور العمال إرتفاعاً كبيراً وزيادة الطلب على تنفيذ الأنفاق.

تستعمل آلات TBM لحفر الأنفاق ذات المقطع الدائري في كل أنواع الصخور والتربة بدءاً من الصخور القاسية جداً حتى التربة الرملية وبقطر من 1.5m حتى 15m، والحفر بهذا النوع من الآلات لا يؤدي إلى إضطراب التربة المحيطة بالنفق ويضمن سطوح حفر ناعمة مما يخفِّض تكلفة تبطين النفق إلى حدٍ كبير، أما ما يعيب التنفيذ هذه الطريقة فهي كلفتها المرتفعة.

تتكون آلة TBM عادة من درع أو درعين (أسطوانة فولاذية كبيرة) وآليات استناد، يتقدم الدرع قرص قاطع دوار مثبت عليه أسنان حادة يعمل كمثقب عملاق، تدخل نواتج الحفر (الأنقاض) إلى حجرة خلف القرص الدوار لترحيلها على سيور متحركة أو مزجها بالماء وضخها بأنابيب إلى خارج النفق وذلك طبقاً لنوع الأنقاض ، الشكل رقم (11–2) يوضح شكل الآلة .

أستخدمت أنماط مختلفة من آلات TBM في حفر العديد من الأنفاق مثل:

- حفر نفق مائي يمثل جزءاً من سد آوه (Oahu Dam) على نهر ميزوري (Missouri) بقطر نحو 9m عام1960.
- حفر نفق مائي يمثل جزءاً من سد منغلا (Mangle Dam) في باكستان بقطر 11m في بداية الستينات من القرن العشرين.
- حفر نفق تحت نهر ميرسي (Mersey) في إنكلترا في مطلع سبعينيات القرن ذاته.
- حفر نفق القنال (The Channel Tunnel) بين بريطانيا وفرنسا تحت القنال الإنكليزي ويتألف من ثلاثة أنفاق متوازية منها نفقان للقطارات بقطر 7.6mوالثالث للخدمات بقطر 4.8m يقع بين النفقين السابقين ويتصل بهما بممرات عرضية كل 375m تقريباً ، تم إنجاز المشروع عام 1994 بعد أن استخدمت في حفره إحدى عشرة آلة TBM.
- يتم اليوم استخدام آلتين TBM بقطر 15.2mفي حفر الأنفاق على الطريق المحلق بمدينة مدريد وآلتين أخرتين بقطر 15.4mفي حفر نفق منغ (Ming) في مدينة شنغهاي في الصين.



الشكل رقم (2-11)يوضح الاله المستخدمة في حفر الأنفاق

3.10.1.2 مستقبل حفر الأنفـاق:

بينما تتحسّن وسائل حفر الأنفاق يواصل المهندسون بناء أنفاق أطول وأكبر وتوفرت مؤخراً تقنية التصوير المتقدم للمسح داخل الأرض بحساب كيفية سفر الموجات الصوتية خلال الأرض ووفرت هذه الأداة الجديدة صورة دقيقة لبيئة النفق وإظهار أنواع الصخور والتربة بالإضافة إلى الأشياء الجيولوجية الشاذّة مثل العيوب والشقوق.

11.1.2 أنــفـاق الـطرق:

1.11.1.2 مدخل:

أنفاق الطريق هي البدائل الممكنة للعبور أو من خلال اجتياز الحواجز المادية مثل الجبال والطرق القائمة والسكك الحديدية، أو المرافق أو لتلبية المتطلبات البيئية والإيكولوجية. وبالإضافة إلى ذلك، أنفاق الطريق هي وسائل ناجحة للحد من الأثر البيئي المحتمل مثل ازدحام حركة المرور، وحركة المشاة، وتلوث الهواء، وتلوث الضوضاء وذلك لحماية المناطق ذات القيمة الثقافية أو التاريخية الخاصة، مثل الحفاظ على المناطق والمباني أو الممتلكات

الخاصة أو لأسباب أخرى مثل الاستدامة لتجنب التأثير على العادة الطبيعية أو تقليل الاضطرابات إلى سطح الأرض .

التخطيط لنفق يتطلب مشاركة متعددة التخصصات والتقييمات، وينبغي أن تعتمد عموماً على نفس المعايير للطرق وخيارات سطح الجسر، مع بعض الاستثناءات. كما أن هنالك اعتبارات معينة، مثل الإضاءة والتهوية وسلامة الحياة، والتشغيل والصيانة وغيرها يجب أن تعالج على وجه التحديد للأنفاق وبالإضافة إلى تكلفة البناء ، وينبغي إجراء تحليل للتكاليف دورة الحياة مع مراعاة العمر المتوقع للنفق. وتجدر الإشارة إلى أن متوسط العمر المتوقع من الأنفاق فترة أطول كثيرا من تلك التي المتوقعه من المرافق الأخرى مثل الجسور أو الطرق.

يتم تصميمه بثلاثة أشكال رئيسية هي دائرية،او مستطيلة، او حدوة حصان أو منحني الأضلاع، فشكل النفق يعتمد إلى حد كبير على الطريقة التي استخدمت لبناء النفق وعلى الأوضاع على أرض الواقع.

2.11.1.2 متطلبات التصميم:

1. فئات من الطرق ومقاسات السيارة .

حجم ونوع المركبات التي سينظر فيها تعتمد على فئة من الطريق. بشكل عام، يجب عمل تكوين هندسي للنفق لاستيعاب جميع المركبات المحتملة التي تستخدم الطرق المؤدية إلى النفق بما في ذلك الإفراط في الارتفاع للمركبات مثل المركبات العسكرية إذا لزم الأمر، ومع ذلك ينبغي ألا يتجاوز ارتفاع النفق ارتفاع الجسور والمعابر. من ناحية أخرى بعض الطرق مثل المنتزهات تسمح بسيارات الركاب فقط . في مثل هذه الحالات، يجب تكوين هندسي من نفق استيعاب ارتفاع السيارة السفلي مع الأخذ في الاعتبار أن سيارات الطوارئ مثل سيارات الإطفاء ينبغي أن تكون قادرة على المرور عبر النفق، ما لم يتم توفير مركبات خاصة

منخفضة الارتفاع استجابة في حالات الطوارئ . فمن الضروري النظر في التكاليف لأن استيعاب عدد قليل جدا من المركبات بسبب التصميم قد لا يكون اقتصاديا .

2. قدرات المرور

وينبغي أن تكون أنفاق الطريق على الأقل لها قدرة المرور نفسها كما في الطرق السطحية. تشير الدراسات إلى أن في الأنفاق حيث يتم التحكم في حركة المرور، والإنتاجية هو أكثر من ذلك في الطريق سطح غير المنضبط مما يدل على أن الانخفاض في عدد من الممرات داخل النفق قد يكون له ما يبرره. ومع ذلك، فإن الحركة تبطئ إذا كان عرض الممر هو أقل من المعايير (ضيقة جدا) ، وأيضاً سقوف منخفضة جداً تعطي انطباعاً للسرعة وتميل إلى إبطاء حركة المرور. ولذلك فمن المهم توفير العرض المناسب وكذلك الارتفاع .

3. التحليلات البديلة .

4. دراسات الطريق .

5. البيئة وقضايا المجتمع .

وتعتبر أنفاق الطريق أكثر صديقة للبيئة من المنشآت السطحية الأخرى وذلك للاسباب التالية :

- سينخفض ازدحام حركة المرور من الشوارع المحلية.
- سوف تتحسن نوعية الهواء بسبب أنه يتم التحكم في الملوثات المتولدة من الحركة والتخلص منها بعيداً.
- سيتم خفض الضوضاء وسيتحسن استخدام سطح الارض من النواحي الجمالية والبصرية .
- عن طريق وضع حركة المرور تحت الأرض، سيتم تحسين قيمة العقارات والمجتمعات ستكون أقل تأثرا على المدى الطويل.

- سوف تعطي فرصاً لتطوير الأراضي على طول وعلى محاذاة النفق والتنمية الاقتصادية ستتحسن.

عند تخطيط النفق ينبغي بذل أحكام لمعالجة الجوانب التشغيلية وصيانة النفق و مراقبة حركة المرور، والتهوية، والإضاءة، وأنظمة سلامة الحياة، وصيانة المعدات، وتنظيف النفق، وما شابه ذلك كما تم ذكره .

6. الاستدامة

الأنفاق لديها عادة أطول متوسط للعمر المتوقع من متوسط عمر متوقع لمنشأة السطحية (125مقابل 75سنة).

الفصل الثاني :أنفاق الحفر والردم

1.2.2 منهجيه التشييد:

عموما في هذا النوع من الأنفاق يتم تشييد النفق داخل حفرة ومن ثم يغطى و يردم بعد الإنتهاء من عملية التشييد ، ويستخدم هذا النوع من الأنفاق عندما يكون النفق قريب من السطح والحفر من الطبقة السطحية ممكن وغير مكلف ، عادة ما تستخدم أنفاق الحفر والردم في الممرات السفلية ومداخل أنفاق التعديين و في المناطق المسطحة والمناطق التي يفضل فيها أن يكون النفق على عمق ضحل .

يستخدم هذا النوع من الأنفاق طريقتين في التشييد :

1. من القاع إلى القمة (bottom-up) .
2. من القمة إلى القاع (top-down).

للأعماق من 30 إلى 40 قدم (10الى 12 متر) يكون هذا النوع من الأنفاق هو الأكثر ملائمة وذلك لأنه إقتصادي وعملي أكثر من الأنواع الأخرى وعادة ما تصمم هذه الأنفاق على أنها (rigid frame box structure).

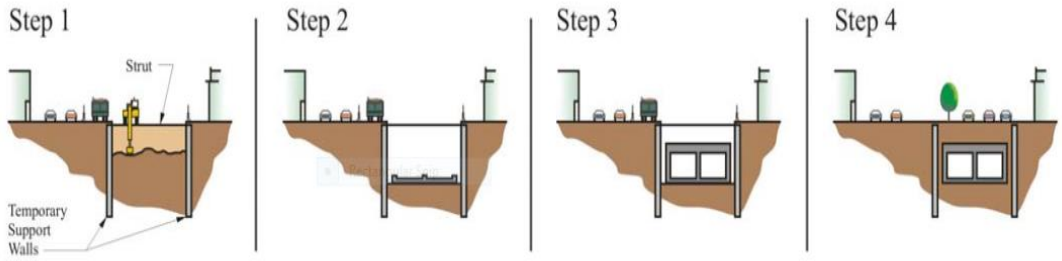
في المناطق الحضرية ونسبة لضيق المساحات يتم حفر هذا النوع من الأنفاق بإستخدام خط حفر منتظم مدعم بحوائط تدعيم الحفريات ، ولكن في المناطق المفتوحة وذات المساحات الواسعة يكون من الإقتصادي تطبيق نظام الحفر المفتوح ، ونسبة إلى أن الأنفاق عادة ما تشيد تحت شوارع المدينة فهذا يسبب تعارض مع حركة سير المرور والعديد من الأنشطة الأخرى لذلك يمكن عمل ممرات علويه فوق مناطق الحفر لتسهيل الحركة .

1.1.2.2 نظام التشييد من القاع إلى القمة (Bottom-up construction):

تتم هذه الطريقة بحفر خندق من سطح الأرض يشيد النفق داخله ومن ثم يعاد ردم الخندق ومن ثم يتم إعادة الطبقة السطحية ،ويمكن حفر الخندق عن طريق الحفر المفتوح من غير إستخدام دعامات ، أوعن طريق الحفر العمودي بإستخدام نظام دعم الحفريات . وكما ذكرنا فإنه في هذه الطريقة تكون عملية التشييد سابقة لعمليات الردم والتغطية وإعادة الطبقه السطحية

✓ خطوات التشييد :

- الخطوة 1 (a) : تثبيت نظام تدعيم الحفريات المؤقت .
- الخطوة 1 (b) : سحب المياه من داخل الخندق إذا كان ذلك مطلوبا.
- الخطوة 1 (c) : عمل الحفريات وتثبيت بقية عناصر نظام تدعيم الحفريات مثل الدعامات والسواند.
- الخطوة 2 : بداية عمليات التشييد عبر تشييد الأرضية أو قاعدة النفق.
- الخطوة 3 : إتمام عمليات التشييد بعمل الحوائط و بلاطة السقف و تركيب نظام العزل المائي.
- الخطوة 4 : إعادة ردم الحفريات وإعادة الطبقة السطحية إلى سابق عهدها.



الشكل (2–12) يوضح نظام التشييد من القاع إلى القمة (bottom-up) .

فوائد هذه الطريقة :

- طريقة تقليدية ومفهومة من قبل المقاولين.
- يمكن حماية المنشأة من الماء عن طريق توفير مضادات للمياه على السطح الخارجي للنفق.
- تسهل وصول معدات التشييد إلى داخل مناطق الحفريات وتوفر مكان لتخزين بقية المعدات والمواد.
- يمكن تركيب أنظمة التصريف في الجهة الخارجية للمنشأة وتوصيلها بقنوات المياه أو نقلها بعيدا عن المنشأة.

مساوئ هذه الطريقة :

- أرضية الطبقة السطحية لا يمكن أن تعود إلى حالتها النهائية حتى نهاية تشييد النفق .
- يتطلب دعامات مؤقتة.
- عمليات نقل المياه قد يكون لها تأثير معاكس على البنيات التحتية المحيطة بالنفق.

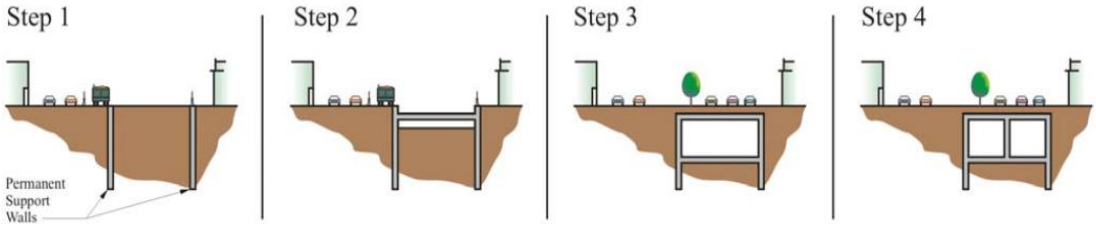
2.1.2.2 نظام التشييد من القمة إلى القاع (Top-down construction):

في هذه الطريقة يتم تشييد حوائط النفق أولا كدعامات للحفر وهي عادة ما تكون الحوائط النهائية للنفق ويتم عمل حوائط تشطيبات بعد الإنتهاء من عملية التشييد ، وهذه الحوائط غالبا ما تكون حوائط طينية مثل slurry walls او secant pile walls . يتم تشييد السقف وربطه مع دعامات الحفر ثم تعاد الطبقة السطحية قبل إكتمال التشييد وما تبقى من أعمال الحفريات يكون تحت حماية البلاطة العلوية ، حتى إكتمال الحفريات تكون الأرضية قد جهزت

وتم ربطها بالحوائط من أسفل ويتم تثبيت التشطيبات النهائية عند الإنتهاء من عمليات التشييد ، في الأنفاق ذات البحور الكبيرة يتم عمل حوائط مؤقتة أو دائمة في المنتصف لتقليل بحر السقف وبلاطة القاعدة .

خطوات التشييد :

- الخطوة 1 (a) : تثبيت نظام تدعيم الحفريات والذي يمثل الحوائط النهائية للنفق.
- الخطوة 1 (b) : سحب المياه في حدود مناطق الحفريات إذا كان ذلك مطلوبا.
- الخطوة 2 (a) : عمل الحفريات حتى مستوى بلاطة السقف.
- الخطوة 2 (b) : بداية عمليات التشييد عبر تشييد بلاطة السقف وتركيب نظام العزل المائي وربط بلاطة السقف مع حوائط تدعيم الحفريات.
- الخطوة 3 (a) : إعادة ردم الحفريات وإعادة الطبقة السطحية إلى سابق عهدها .
- الخطوة 3 (b) : إتمام عمليات الحفر داخل النفق وعمل السواند لنظام تدعيم الحفريات أثناء الحفر.
- الخطوة 3 (c) : تشييد بلاطة القاعدة وربطها بنظام تدعيم الحفريات.
- الخطوة 4 : عمل التشطيبات النهائية بما في ذلك الحوائط الثانوية داخل النفق.



الشكل (13–2) يوضح نظام التشييد من القمة إلى القاع (top-down)

فوائد هذه الطريقة :

- تسمح بإعادة الطبقة السطحية فوق النفق مبكرا.
- الدعامات المؤقتة تستخدم كحوائط دائمة للنفق.
- البلاطات الإنشائية تستخدم كنظام تقييد داخلي لدعامات الحفر وبذلك تقلل من عمليات الإسناد المطلوبة للحوائط.
- تتطلب عرض أقل لمساحة التشييد.
- تسهل من عملية تشييد السقف وذلك لأنها توفر طبقة إرتكاز سفلية عوضا عن إستخدام الفرم السفلية.
- أقل تكلفة لإستخدامها دعامات الحفر كحوائط نهائية للنفق ولأنها توفر في إستخدام السواند الداخلية.
- توفر زمن تشييد أقل وذلك عن طريق تخطي بعض نشاطات التشييد.

مساوئ هذه الطريقة :

- عدم القدرة على تثبيت نظام عزل المياه على السطح الخارجي للنفق.
- تستخدم وصلات أكثر تعقيدا بين البلاطات والحوائط .
- إحتمال حدوث تسريب للماء في الوصلات بين البلاطات والحوائط.
- الوصول إلى مناطق الحفريات محدود إما عن طريق البوابات أو عن طريق فتحات عبر السقف.
- توفر مساحة محدودة لحفر وتشييد البلاطة السفلية.

3.1.2.2 الإختيار بين طرق التشييد:

من الصعب تعميم إستخدام طريقة معينة للتشييد نظريا وذلك لأن كل نفق أو مشروع فريد من نوعه وله عديد من القيود والمتغيرات التي يجب تقديرها وأخذها في الإعتبار عند إختيار طريقة التشييد المناسبة ، لذلك تم وضع عدة شروط يمكن أن تجعل إحدى الطرق تبدو أكثر ملائمة من الأخرى ، لكن يجب دراسة هذه الشروط بدقة ومراعاة التقدير الدقيق لكل العوامل المؤثرة على المشروع للتمكن من إختيار الطريقة المناسبة .

- **شروط ملائمة طريقة التشييد من القاع إلى القمة (bottom-up) :**

1. لا توجد ضرورة لتقييد إنحراف الحوائط الجانبية .
2. لا حاجة لإعادة الطبقة السطحية إلى حالتها الطبيعية بسرعة.
3. لا يوجد تقييد لعمليات الحفر.

- **شروط ملائمة طريقة التشييد من القمة إلى القاع (top-down):**

1. إنحراف الحوائط الجانبية يجب أن يكون محدود وذلك للحماية .
2. إعاده الطبقه السطحيه للإستعمال الفوري يجب أن يحدث باسرع ما يمكن.
3. وجود قيود لعمليات الحفر.

2.2.2 نظام تدعيم الحفريات :

عند الحفر لبناء الأنفاق يجب أن تصمم الحفريات بحيث توفر بيئة عمل امنة ، وتسهل من إمكانية الوصول إلى نشاطات التشييد المختلفة وحماية المنشأة و البنيات التحتية القريبة من الحفريات ، ولتوفير ذلك يجب عمل دعامات للحفر تتطلب في تصميمها الأخذ في الإعتبار عدد من العوامل التي تؤثر على اداء نظام الدعم والتي لها تأثير على النفق ككل.

تصنف دعامات الحفريات إلى ثلاثه فئات رئيسية :

1.2.2.2 دعامات الحفر المائل (Open cut slope) :

يستخدم هذا النوع من الدعامات عند توفر مجال كاف لعمل حفر مفتوح وعمل إنحدار جانبي ليقابل خط الأرض الطبيعي الموجود (الشكل2-14)، ويتم تحديد ميلان الحفر كأي حفر عادي بالأخذ في الإعتبار زاوية الراحة للتربة المحيطة ومقدار ثباتها.

الشكل رقم (2-14) يوضح دعامات الحفر المائل.

2.2.2.2 الدعامات المؤقتة (temporary) :

تصمم هذه الدعامات لتدعيم الحفر العمودي أو الشبه عمودي في المناطق التي لا يتوفر فيها مجال كاف للحفر المفتوح ، لكنها لا تساهم في سعة التحميل الكلية للنفق ويتم إهمالها أوتفكيكها عند الإنتهاء من عملية التشييد وإعادة ردم النفق .

وهي تتضمن (soldier piles and lagging ,sheet pile walls ,slurry walls secant piles or tangent piles).

3.2.2.2 الدعامات الدائمة (permanent):

يصمم هذا النوع لتدعيم الحفر العمودي أو الشبه عمودي في المناطق التي لا يتوفر فيها مجال كافي للحفر المفتوح ، وتشكل هذه الدعامات جزء من منظومة النفق الإنشائية النهائية. وهي تتضمن عموما(slurry walls ,secant piles walls or tangent piles wall).

- ✓ دعامات الحفر المؤقتة (temporary support of excavation):

يمكن تصنيف دعامات الحفر عموما إلى مرنة وجاسئة،الدعامات المؤقتة المرنة تشمل(Sheet piling Soldier pile , lagging walls) والدعامات المؤقتة الجاسئة تشمل(slurry walls, scant piles , tangent piles).

ولتحديد نظام الدعم المناسب لابد من عمل مسح حقلي دقيق يبين حالة التربة السطحية والتحت سطحية .

1) Sheet piling wall:

تشمل سلسلة من الألواح المتشابكة التي تشكل نمط متموج في المقطع الرأسي للحائط ، يتم تثبيت هذه الألواح داخل الأرض لتتمدد جيدا أسفل الحفريات لضمان إستقرار المنشأه . وتعتبر هذه الألواح مرنة تماما ويمكن أن تدعم إرتفاع صغير من الأرض دون الحاجة لأي تثبيت ومع تقدم عملية الحفر يتم تثبيتها عند فواصل محددة ، يمكن تركيب هذه الألواح بسهولة وسرعة في حالات التربة المثالية ، أما في حالة وجود الصخور والحجارة والأنقاض وغيرها من العوائق قد يصعب إستخدام هذا النوع وذلك لأنها قد تؤدي إلى ضرر كبير في هذه الحوائط أو في حاله وجود خطوط خدمات تحتية مجاورة قد يؤدي تثبيت هذه الحوائط إلى حدوث ضرر كبير في هذه الخطوط وهي كما موضحة في الشكل (2-15).

الشكل(2-15) يوضح (sheet Pile) بتثبيت متعدد المستويات .

: Soldier pile wall (2

تشمل عناصر إنشائية فولاذية على شكل أعمدة تتراوح المسافه بينها 8-4 قدم ويتم تثبيتها مع الأرض في حفر معدة مسبقا وتمتد تماما أسفل الحفريات لضمان إستقرار المنشأة ، ويتم عمل عازل بين هذه العناصر للحفاظ على الأرض خلف الحائط وعادة ما يتم هذا العزل بإستخدام إما ألواح خشبية أو خرسانية ، وتعتبر هذه الحوائط مرنة وقادرة فقط على دعم إرتفاعات معتدلة من الأرض دون تثبيت ومع تقدم عملية الحفر يتم تثبيتها عند فواصل محددة ، وتتميز هذه الدعامات عن الSheet) piling wall) في أنها يمكن أن تثبت في مختلف حالات الأرض والمقطع المحدود لهذه الدعامات يسمح بعمل الحفر خلال الصخور والعوائق الأخرى التي تقابل عمليات الحفر ، إن التباعد بين عناصر الحائط يسمح بعملها حول خطوط الخدمات تحت الأرضية وبالتالي يمكن عمل هذه الحوائط دون الضرر بهذه الخطوط مما يجعل هذا النوع من الدعامات متعدد وواسع الإستخدام أكثر من النوع السابق وهي كما موضحة بالشكل (2-16).

الشكل (2-16) يوضح (Soldiar pile wall) مقيدة مع عوازل.

عند تدعيم الحفريات يمكن عمل ركائز تصل من الحائط الى الحائط الذي يقابله ، و دعامات مفصلية لتثبيت الحائط مع الأرض بالإضافة إلى روابط خلفية تثبت الحائط مع الصخور أو الأرض خلف الحائط ويعتمد إستقرار هذه الروابط على حالة التربة خلف الحائط ، تمتد الركائز والدعامات داخل مناطق العمل مما يتسبب في عرقلة أو إعاقة عمليات التشييد ، وبالرغم من أن الروابط الخلفية لا تتسبب في إعاقة عمليات التشييد إلا أنها قد تمتد خارج حدود المناطق المسموح بحفرها مما يتسبب في مشاكل أخرى. هنالك العديد من العوائق غير المتوقعة الأخرى مثل الصخور الكبيرة وخطوط الخدمات التحت الأرضية بالإضافة الى أساسات المباني المجاورة التي قد تتسبب في إعاقة عملية التشييد ولذلك يجب عمل دراسات دقيقة للموقع المراد تشييد النفق فيه قبل تحديد نوع الدعامات والركائز التي سوف يتم إستخدامها (يوضح الشكل(2-17)حوائط مثبتة بإستخدام روابط خلفية مما يوفر مساحة كافية داخل مناطق الحفريات لعمل نشاطات التشييد المختلفة) .

الشكل رقم (2−17) يوضح حوائط مثبتة بإستخدام روابط خلفية.

عند تصميم دعامات الحفر لابد من أخذ تسلسل عملية التركيب في عين الإعتبار والأخذ في الحسبان تغيرات الأحمال التي ستظهر أثناء عملية التركيب .

إستخدام الدعامات المؤقته يوفر فرصه عمل نظام حمايه مائيه على الوجه الخارجي للمنشأة ويتم تحقيق ذلك عند عمل الحوائط الداعمة بعيدا عن الوجه الخارجي للنفق مما يشكل مساحة تسمح بعمل نظام العزل المائي مباشرة على الوجه الخارجي للنفق ، ويمكن أن توضع الحوائط الساندة مباشرة مع الوجه الخارجي للنفق وهكذا يشكل الوجه الخارجي للحوائط الساندة شكل الهيكل الخارجي للنفق ويتم تثبيت نظام عزل المياه عليه وفي هذه الحالة تترك الحوائط الساندة المؤقتة مكانها ولا تتم إزالتها .

- ✓ دعامات الحفريات الدائمة :

حوائط التدعيم الدائمة هي عناصر إنشائية جاسئة وهي تشمل الأنظمة (secant pile walls ,slurry walls, tangent pile walls ,concrete(SPTC)walls ,termite). وكما هو الحال في الدعامات المؤقتة الفحص الدقيق للموقع والذي يكون مفهومه واضح للطبقة تحت السطحية ضروري لإختيار نظام التدعيم الملائم .

1. slurry walls :

تشييد عن طريق حفر خندق سمكه مناسب مع سمك حائط النفق وعاده ما يكون سمك هذه الحوائط بين 40-30 بوصة ، هذا الخندق سيمتد داخل التربة تحت أجزاء الطبقة السفلية للنفق لتوفير الإستقرارية ، ويتم حفر هذا الخندق من مستوى سطح الأرض حتى نهاية بلاطة سقف النفق ، عند تشييد هذه الحوائط يترك الخندق مفتوحا عبر ضخ مواد طينية (betonies slurry) داخل الخندق أثناء حفره ، يوضع حديد التسليح داخل الخندق المملوء بهذه المواد ثم تضخ الخرسانة الى داخل الخندق لتحل محل الطين (termite method) والحائط الذي يتكون سيتم دمجه مع المنشأة النهائية للنفق كما موضحة بالشكل(2-18). عند تشييد بلاطة السقف يتم ربطها مع الحوائط بحيث تمثل نظام تثبيت لهذه الحوائط ويعتمد ذلك على العمق الكلي للنفق حيث يمكن أن تمثل البلاطة نظام تثبيت أولي للحائط أو وسطي في حالة كان العمق كبير ومع تقدم الحفر يتم عمل أنظمة تثبيت إضافية ومن ثم تشييد بلاطة القاعدة ويتم ربطها مع الحوائط بنفس الطريقة .

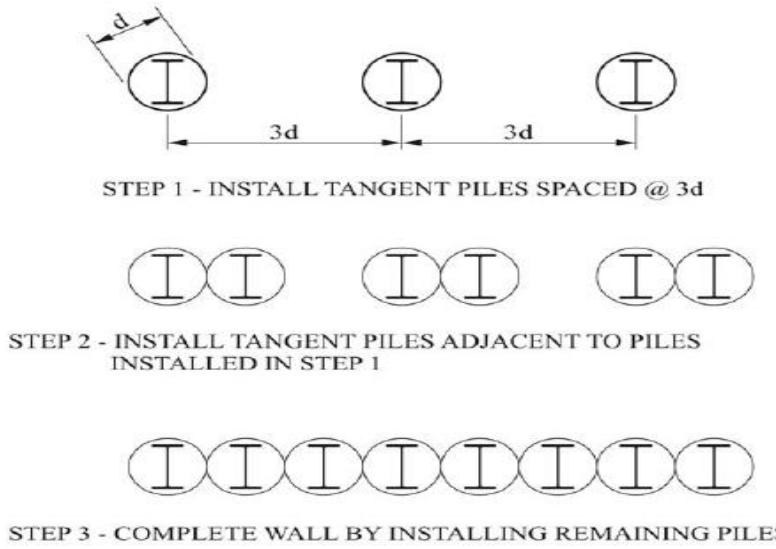
الشكل (2-18) يوضح حوائط الslurry walls

2. SPTC walls :

يتم تشييد هذه الحوائط بنفس طريقة ال (slurry walls) ولكن عند إستخدام هذا النوع من الحوائط يتم إضافة عارضة فولاذية لحديد التسليح المطلوب وذلك لتوفر قوة تحمل إضافية للحائط وبقية أعمال التشييد تتم بنفس التسلسل السابق .

3. Tangent pile (Drilled shaft):

تتضمن سلسلة من القضبان الخرسانية تتموضع قريبة من بعضها البعض بحيث تلامس القضبان بعضها البعض . عاده ما تتراوح أقطار هذه القضبان بين 24–48بوصه و تمتد تحت بلاطة القاعدة للنفق لضمان إستقرار المنشأة النفقية . تبدأ عملية التشييد عن طريق عمل حفر إسطوانية رفيعة ويتم الحفاظ على هذه الحفر مفتوحة عن طريق إستخدام إطار مؤقت ، يتم وضع عارضة فولاذية أو قضبان حديد التسليح داخل هذه الحفر ثم يتم ملؤها بالخرسانة ، وتتم إزالة الإطارات المؤقتة اثناء عملية ضخ الخرسانة ويتم إتباع هذه الخطوات بالتتابع لبقية الحفر لتكون مجتمعه الشكل النهائي للحائط ، عند تشييد بلاطتي السقف والقاعدة يتم ربطهما مع الحائط وتمثل كل منها نظام تثبيت له كما موضحة في الشكل (2–19).

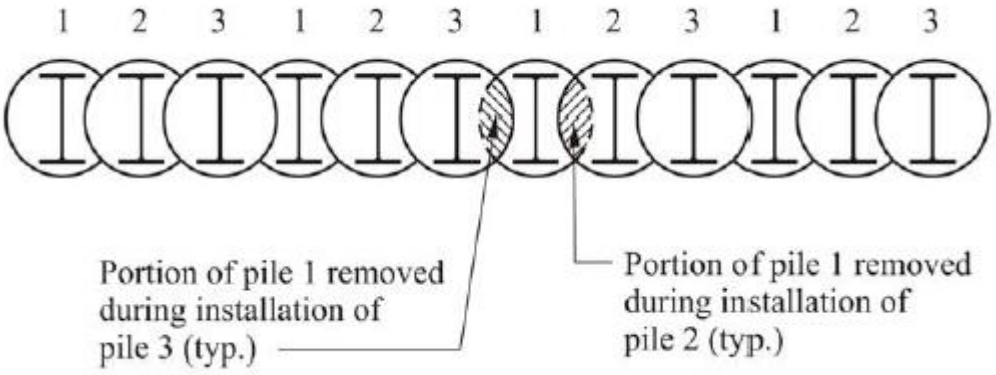


الشكل(2–19.a) يوضح خطوات تشييد(Plane view)

الشكل(2-19.b): دعامات حوائط Tangent pile

4. Secant pile walls :

تشبه النظام السابق عدا أن القضبان لا توضع بالقرب من بعضها ولكن تكون متداخلة في بعضها البعض و يحدث ذلك نسبة لأن المسافة بين القضبان تكون أقل من القطر الكلي لها ، وتتميز هذه الحوائط عن (Tangent pile) في أنها أكثر صلابة و أكثر فعالية في إبقاء المياه الجوفية بعيدا عن الحفريات . يتم تشييدها بإتباع نفس التسلسل المستخدم لل(Tangent pile) إلا أنه في هذه الحوائط يتطلب تشييد كل قضيب إزالة جزء من القضيب السابق له كما في الشكل (2-20)



الشكل(2-20) يوضح مقطع رأسي ل (Secant pile wall)

عموما الأنظمة الجاسئة لها سعة تحميل أكثر من المرنة ، سعة التحميل الإضافية تعني متطلبات تثبيت أقل وبما أن التثبيت أقل فذلك يعني تقليل من عوائق التشييد وأن أنشطه التشييد تصبح سهلة التنفيذ .

أنظمة الحوائط الجاسئة بالإضافة إلى أنها تعتبر ضمن المنشأة النفقية النهائية فهي أيضا تقلل من تكلفة المنشأة ككل . ولكن الحمايه المائيه للوصلات ودعامات الحفر الدائمة وبقيه العناصر الإنشائية تكون صعبة مما قد يؤدي إلى حدوث تسرب للمياه الجوفية إلى داخل النفق. كما يجب عند التصميم الأخذ في الإعتبار تغير حالات التحميل التي ستظهر أثناء الحفر وأثناء عمليات التركيب .

4.2.2.2 تحرك الأرض وأثرها على المنشاءات المجاورة :

من أهم المشاكل التي تواجهها أنفاق الحفر والردم عند التحليل والتصميم هي التقدير والتقليل من الأثار الناتجة من عمليات التشييد على المنشاءات المجاورة للنفق . عادة ما تكون أنفاق الحفر والردم أكثر إضرارا بما يجاورها من بقية طرق التشييد لذلك على المهندس أن يكون ملما بمفاهيم التحليل التي تساعد على تقدير الحركة في التربة الناتجة من عمليات الحفر وتأثير هذه العمليات على البنيات المجاورة .

ويمكن أن تحدث تحركات التربة نتيجه ل :

- إنحراف دعامات الحفريات : تنحرف الحوائط الى داخل الحفر قبل تركيب كل مرحلة من مراحل تثبيت الدعامات ، ويكون الإنحراف أكبر في نظام التدعيم المرن منه في نظام التدعيم الجاسئ ويكون هذا الإنحراف متزايدا تراكميا وغير قابل للإصلاح .
- إندماج التربه نتيجه لسحب الماء : في المناطق التي يكون بها مستوى المياه الجوفية عالي يكون عادة من الضروري سحب المياه داخل الحفر لضمان استقرار

المنشأة . لكن عمليات سحب المياه قد تؤدي إلى حدوث هبوط في الضغط الهيدروستاتيكي خارج الحفر و وفقا لطبقات التربه قد يؤدي هذا إلى إندماج التربة مما يؤدي إلى هبوطها .

للمباني والمرافق العامة المجاورة للحفر يجب معرفة مقاومتها لأي تحركات يتوقع حدوثها في التربة والتي تحدث نتيجة لإنزلاق الحوائط الساندة أثناء عمليات الحفر ، و يعتمد تقدير هذه المقاومة على نوع المنشاءات الموجودة ، بعدها وإتجاهها من مناطق الحفريات ، حالة التربة ونوع الأساس المستخدم في هذه المنشاءات وعدد من العوامل الأخرى .

التحليل في هذه الحاله يكون متعلق بالموقع وقد يكون معقدا جدا لذلك تستخدم الطريقة التجريبية لتعطي نتائج أدق للتأثير المتوقع حدوثه ، ويجب فحص ومتابعة المباني الموجودة في المنطقة التي تتأثر بعمليات الحفر ومراقبة تأثير هذه العمليات عليها مع تقدم تشييد النفق .

هناك عدة إجراءات يمكن عملها للتقليل من أثر هذه المشكلة منها :

- تصميم حوائط تدعيم الحفريات لتكون أكثر صلابة ومقاومة لتسرب المياه.
- إستخدام محسنات للتربة قبل البدء بعمليات الحفر .
- تدعيم المنشاءات الموجودة.
- توفير برامج مراقبة أثناء الحفر.
- توفير دعامات تثبيت أكثر صلابة و تقليل المسافات فيما بينها .
- وضع خطط للتقليل من أثر تحركات الأرض في حالة زيادة هذه التحركات عن الحد المسموح به.

5.2.2.2 إستقرار القواعد:

التربة الفقيرة تحت مناطق الحفريات تتطلب أن يتم زيادة العمق الذي تشييد عليه دعامات الحفريات لتوفير طبقة أكثر كفاءة و للتأكد من إستقرارية القاعدة . وهذا يعتمد على ما إذا كان ضغط الأرض على الحائط و وزن الحائط سيتم نقله الى التربة المحيطة عن طريق الإلتصاق (الإحتكاك الجانبي) والتحميل النهائي .

الطين الناعم تحت الحفريات يكون أكثر عرضة للخضوع مما يزيد من إحتمالية هبوط القاع أو ما هو اسوأ كإنتفاخ التربة المتاخمة للقاع ، كما أن إرتفاع منسوب المياه الجوفية خارج الحفريات قد يؤدي الى خلل في إستقرار قواعد المنشأة .

3.2.2 الأنظمة الإنشائية :

يتم عادة عمل دراسة للأنظمة الإنشائية للتمكن من تحديد الخيار الأمثل إنشائيا لتشييد أنفاق الحفر والردم ، وهذا يشمل تحديد مقترح لمقطع النفق ، نظام تدعيم الحفريات ، النظام الإنشائي للنفق ، طريقه التشييد (من القمة إلى القاع ، من القاع إلى القمة) ونظام الحماية من المياه . مع مراعاة أن كل من هذه العناصر مرتبطة ببعضها البعض .

عند دراسة النظام الإنشائي يجب الأخذ في الإعتبار كل الخيارات العملية المتاحة في المقترح الكلي وأثر كل عنصر على الآخر .

1.3.2.2 تحديد أحجام العناصر الإنشائية :

عادة ما تكون أنفاق الحفر والردم مستطيلة الشكل ، وأبعاد هذا المستطيل يجب أن تكون كافية و شاملة لكل المتطلبات ، والأبعاد الطلوبة لتحديد الحجم الكلي للنفق تشمل إرتفاع الحوائط الجانبية وطول بحر البلاطة.

عرض الحوائط الجانبية للنفق مضافا إليه العرض الصافي المطلوب يمثل في النهاية عرض الحفر الكلي المطلوب لتشييد النفق ، ويمكن تقليل العرض الكلي للحفر عن طريق تضمين حوائط تدعيم الحفريات كجزء من المنشأة النهائية رغم أن ذلك قد يؤثر سلبا على مقاومة المنشأة لتسرب المياه .

ومن الأسباب التي تؤدي إلي تقليل عرض الحفريات :

- عندما يراد تشييد النفق أسفل الطرق مسبقة التشييد في المناطق الحضرية .
- في حالة وجود مباني أساساتها قريبة من مسار النفق المراد إنشائه .
- في حالة توفر عوامل طبيعية غير مرئية مثل الصخور والعوائق الطبيعية .

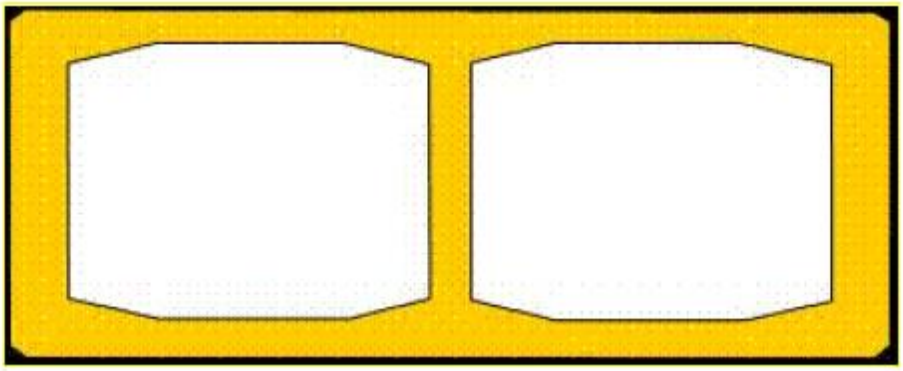
سمك البلاطة العلوية والسفلية بالإضافة إلي الإرتفاع الصافي المطلوب يحدد الإرتفاع الكلي للنفق المراد تشييده وعمق الحفريات المطلوبة وإرتفاع حوائط تدعيم الحفريات ، ويفضل تقليل العمق الكلي في أنفاق الحفر والردم من أجل تقليل التكلفة الكلية للنفق . توفر الأنفاق الضحلة أو القريبة من السطح ممرات أقرب للوصول إلى النفق وإنحدار الطريق إلى داخل النفق يكون ملائم و أكثر عملية للمركبات التي تعبر النفق .

2.3.2.2 الهيكل الإنشائي:

يختلف الهيكل الإنشائي للنفق بإختلاف نظام تدعييم الحفريات إذا كانت دعامات الحفريات مؤقتة (integral) أو دائمة (non-integral) أي أنها تمثل جزء من المنشأة النهائية أم لا . في حالة دعامات الحفريات المؤقتة يتم إعتبار مقطع النفق هيكل ذو مفاصل مثبتة fixed (jointed) ، أما عندما تكون دعامات الحفريات جزء من منشأة النفق النهائية سيكون من الصعب عمليا تنفيذ وصلات مثبتة بين دعامات الحفريات وبقيه المنشأة ولذلك في الغالب ما

تستخدم وصلات ذات تثبيت جزئي ولكن يصعب تحديد لأي درجة يكون هذا التثبيت ، ولكن يجب الأخذ في الإعتبار جزء من هذا التثبيت عند إجراء التحليل والتصميم.

في الأنفاق المستطيله الشكل يتم عمل شطفيات عند الاركان (incorporate haunch) وذلك لزيادة مقاومة المقطع للقص بالقرب من السواند مما يكون شكلها أقرب للقوس كما موضح في الشكل (2-21) ، شكل القوس الكامل قد يوفر حل للمشاكل التي قد تظهر في سقف النفق ولكنها قد تحدث مشاكل أخرى ، الأقواس المسطحة قد تكون قوى أفقية عند ال (spring line) والتي يجب أن تتم مقاومتها من قبل الحوائط ، أما الأقواس الشبه دائرية فإنها تقوم بإلغاء هذه القوى الأفقية ولكن إستخدام هذا النوع من الأقواس يتسبب في زيادة مقطع النفق وبالتالي زيادة التكاليف . عند إستخدام حوائط تدعيم الحفريات المؤقتة فإن المنشأة تشيد بالكامل داخل هذه الحوائط وغالبا ما تزود بطبقة حمايه من الماء تغلف مقطع النفق ، ومن جهة اخرى عند إستخدام أنظمة تدعيم الحفريات الدائمة وعندما تكون الحوائط الداعمة جزء من منظومة النفق النهائية فإن تغليف مقطع النفق بطبقة عازلة للماء يكون من الصعب تحقيقه ولذلك يتم عمل تغليف كامل للمفاصل ، ويجب التاكد من التناغم والتوافق بين بلاطة السقف وبلاطة القاعدة وحوائط تدعيم الحفريات من أجل التنقلات التي تحدث في العزوم وقوى القص بينها .



الشكل رقم (2-21) شطفيات الأركان في المقاطع المستطيلة

في بعض الأنفاق القديمة أستخدمت أنظمة إنشائية تتكون من هياكل من حديد تسليح عرضي تبعد هذه الهياكل عن بعضها البعض مسافه 5 قدم (1.5m)، وتمتد هذه الهياكل داخل الأرضيات والحوائط الخرسانية غير المسلحة والمصبوبة في الموقع ، أما عند بلاطة السقف تسند البلاطة على هذه الهياكل وذلك أيضا للخرسانة المصبوبة في الموقع ، هذه الطريقة في التشييد رغم أنها غير شائعة لكنها فعالة في حالة الأنفاق السطحية وخصوصا عند إستخدام بلاطة سقف ذات بحر كبير وذلك للأنفاق ذات مسارب السير المتعددة .

3.2.2.2 المواد :

أكثر مواد التشييد إستخداما في أنفاق الحفر والردم هي الخرسانة المصبوبة في الموقع لكن هناك مواد اخرى يتم إستخدامها مثل الخرسانة سابقة الصب ، الخرسانة سابقة الإجهاد وحديد التسليح الإنشائي .

- الخرسانة المصبوبة في الموقع Cast-in-place Concrete

وهي شائع الإستخدام في تشييد الأنفاق وذلك نسبة لسهولة إستخدامها عند تشييد الأعضاء الإنشائية الكبيرة وخاصة في مساحات العمل المحدودة ، وهي أيضا مناسبة عند إستخدام مقاطع معقدة بالرغم من أن عمل الفرم قد يكون صعبا . الفرم المستخدمة يمكن تقسيمها إلى قطع صغيرة سهلة النقل والتحريك تجمع مع بعضها لتشكل عناصر ضخمة . تعد الخرسانة عموما من المواد ذات المتانة العالية وهي تعمل جيدا في المنشاءات التحت الأرضية ، ولكن للخرسانة سعة تحميل قليلة نسبيا للقص ولكن يمكن معالجتها عن طريق زياده سمك بلاطة السقف وبلاطة القاعدة عند السواند .

عند ربط العناصر الإنشائية الخرسانية مع دعامات الحفريات الدائمة عند إستخدام وصلات بسيطة يمكن تكوين هذه الوصلات بسرعة عن طريق وضع البلاطة الخرسانية في مقاعد تم

عملها مسبقا أو جيوب داخل الحائط الخرساني ، أما في حالة إستخدام وصلات عزوم يجب تصميم الحائط ليكون قادر على تحمل العزوم المنقولة إليه ، وللتقليل من عدد الجيوب المطلوبة في الحائط يمكن عمل وصلة ميكانيكية أو لحام .

إختيار التفاصيل المناسبة للعضو الخرساني وتطبيق كل متطلبات ال AASHTO أساسي لخلق خرسانة إنشائية متينة ، ويجب مراعاة الحد الأدنى لحديد تسليح الإنكماش عند التصميم .

نجد أن إستخدام عدد كبير من قضبان حديد التسليح ذات الأقطار الصغيرة يكون أفضل من إستخدام عدد قليل من القضبان ذات الأقطار الكبيرة وذلك لأنها تساعد على توزيع التشققات التي تحدث في الخرسانة وتقليل حجمها .كما أن الفحص الكيميائي للمياه الجوفية مهم لتحديد الخلطة الخرسانية المناسبة لمقاومه أي تفاعل كيميائي قد يحدث بين المياه والخرسانة .

- الفولاذ اللاإنشائي :

يمكن إستخدام عارضات فولاذية في البلاطات للتقليل من السمك الكلي لبلاطة السقف ، مما يؤدي إلى تقليل العمق الكلي للنفق وبالتالي تقليل التكلفة الكلية ، الفولاذ الإنشائي أكثر سهولة في التوصيل مع حوائط تدعيم الحفريات الدائمة من البلاطات الخرسانية ، إزالة أجزاء بسيطة متفرقة من الحوائط توفر موضع يوضع عليه الفولاذ ليشكل وصلة بسيطة ، عند إستخدام هذه الوصلات البسيطة يجب مراعات تمدد وإنكماش العارضات الفولاذية نتيجه لتغير درجات الحرارة داخل النفق ، عند إستخدام وصلات مثبتة فإن الحركة الناتجة من التمددات الحرارية تكون ممنوعة كليا مما يؤدي إلى تكون قوى يجب حسابها في عمليات التصميم .

عادة ما تصنع العارضات الفولاذية وتنقل إلى مناطق التشييد في شكل قطعة واحدة ولكن إذا كان نظام تدعيم الحفريات مثبت بوصلات معقدة يكون من الصعب إستخدام هذه العارضات وتشييدها داخل الحفريات لذلك يتم إستخدام عارضات ذات أجزاء مناسبة وربطها مع بعضها

البعض . وتتطلب الوصلات أيضا رعاية ومراقبة جيدة وإذا تركت هذه الوصلات غير مغلفة بشكل جيد يؤدي ذلك إلى زيادة تكاليف الصيانة الكلية للنفق وفي العادة يكون من الصعب حماية هذه الوصلات ضد التسربات المائية .

في الغالب ما تكون البيئة المحيطة بالنفق رطبة بالإضافة إلى التسربات التي يتوقع حدوثها عند الوصلات تشكل هذه العوامل مجتمعة حالة خطرة تؤدي إلى صدأ وتآكل في الفولاذ الإنشائي المستخدم لذلك يجب أن يعد نظام الحماية من الصدأ كجزء رئيسي من نظام إنشاء الفولاذ .

الأنفاق القديمة المذكوره سابقا والتي تستخدم فيها هياكل فولاذية حول النفق يمكن إستخدامها حتى يومنا هذا ولكن تحت ظروف معينة ، وهذه الهياكل تشتمل أعمده فولاذية وعارضات ، في نظام تدعيم الحفريات الدائم يتم تضمين الأعمدة الفولاذية داخل هذه الحوائط و تقام هذه الأعمدة على قواعد مناسبة يتم صبها أسفل الحفريات ، ومن ثم تقام العارضات وتربط مع هذه الأعمدة ثم يصب الهيكل كامل بالخرسانة ، يمكن أن تكون العارضات داخل البلاطة الخرسانية أو تكون خارجها تسند عليها هذه البلاطة وفي هذه الحالة يكون من الضروري حماية هذه العارضات من العوامل الخارجية التي قد تتعرض لها .

- الخرسانة سابقة الإجهاد :

تستخدم الخرسانة سابقة الإجهاد في الأبحر الكبيرة وعندما يكون العمق الكلي للمقطع محدود .عند إستخدام عارضات سابقة الصب وسابقة الإجهاد في بلاطة السقف يجب ربط هذه العارضات مع حوائط مصبوبة في الموقع ، ومن الغير عملي أن تقسم هذه العارضات إلى عدد من الأطوال ثم ربطها مع بعضها البعض لذلك يجب تصنيع ونقل هذه العارضات إلى مناطق التشييد كقطعة واحدة ويجب توفير مساحة كافية داخل مناطق الحفريات لتشييد هذه العارضات،

ولذلك يجب الأخذ في الإعتبار شكل ونوع الحفريات المستخدمة لتحديد إمكانية إستخدام هذا النوع من الخرسانة . عند عمل وصلات بين العارضات سابقة الإجهاد ودعامات الحفريات الدائمة يتم عمل جيوب داخل هذه الدعامات لتستند عليها العارضات بحيث تمثل إسنادا بسيطا ويجب أن تسمح هذه الوصلات بالحركة الأفقية الناتجة من التمددات التي تحدث عند تغير درجات الحرارة داخل النفق ، ولكن عادة ما يكون من الصعب عمل حماية مائية لهذه الوصلات

عند عمل وصلات عزوم فإنها تتطلب تفصيلات معقدة عند إتصال العارضات مع الحوائط للتمكن من تطبيق متطلبات التسليح لوصلات العزوم ، وتتطلب هذه الوصلات أيضا أن تتوفر مقاومة في الحوائط للعزم المنقول إليها من العارضات لذلك يجب أن تتماشى تفصيلات هذه الحوائط مع النظام الإنشائي المستخدم في النفق ، أما عند إستخدام وصلات العزوم فإن هذه الوصلات لا تسمح بالحركة الناتجة من التمددات الحرارية مما ينتج عنه تكون قوى يجب أخذها في الإعتبار في عمليات التحليل والتصميم .

بالرغم من أنه من النادر إستخدام الخرسانة لاحقة الشد في أنفاق الحفر والردم ، ولكن في حالة تم إستخدامها فإنه من المهم مراعاة المراحل المختلفة للأحمال ، مثلا عند إستخدام قوى سبق إجهاد عالية في بلاطات النفق قبل إعادة ردم الحفريات يتسبب هذا في تكون إجهادات شد مؤقتة في الوجه المعاكس للبلاطة هذه الإجهادات تؤدي إلى تقليل السمك الكلي للبلاطة المستخدمة .في حين أن التقلص المرن الذي يحدث في البلاطة سيتسبب في حدوث مقاومة لسبق الإجهاد في الحوائط ويجب حساب هذه المقاومة في عملية التصميم ، والعزوم الإضافية التي تنتج يجب مقاومتها أيضا ويمكن في هذه الحالة فصل بلاطة السطح عن الحائط عن طريق وصلات حركة (مثل وصلات المطاط الصناعي neoprene) هذه الوصلات تعزل

التقلص في البلاطة عن الحوائط ولكنها تؤدي إلى خسارة الفوائد التي تنتج من وصلات العزوم، ويجب مراعاة حماية هذه الوصلات ضد التسربات المائية.

4.3.2.2 الطفو Buoyancy

يعد الطفو مصدر قلق رئيسي في الأنفاق الضحلة التي تكون كليا أو جزئيا تحت مستوى سطح المياه الجوفية ، ويجب مراعات قوى الطفو وحسابها في عمليات التحليل والتصميم . عند إختيار النظام الإنشائي المستخدم يجب الأخذ في الإعتبار قدرة النفق على مقاومة قوى الطفو بواسطة وزنه الذاتي فقط أو عن طريق توفير تدابير أخرى لمقاومة قوى الطفو السالبة . في حالة كان وزن النفق بالإضافة إلى وزن الردمية التي فوقه غير كافيين لمقاومة قوى الطفو تنتج قوى رأسية تزيح مقطع النفق إلى أعلى ولذلك يجب تضمين تدابير مقاومة هذه القوى أثناء عملية التصميم .

يمكن تحقيق مقاومة قوى الطفو بطرق عديدة ولكن بشكل أساسي تستخدم عدة طرق لزيادة فعالية وزن المنشأة وهي تشمل :

- وصل المنشأة مع نظام تدعيم الحفريات ونقل وزنها بالإحتكاك إلى الأرض .
- زيادة سمك العناصر الإنشائية فوق الحد المطلوب لمقاومة الأحمال مما ينتج عنه زيادة الحمل الميت الذي يقاوم قوى الطفو التي تتعرض لها المنشاة .
- زيادة العرض الكلي لبلاطة السقف أكثر من الحد المطلوب وبالتالي دخولها في التربة المحيطة مما يؤدي إلى تضمين وزن التربة فوق الجزء البارز من البلاطة مع وزن المنشأة .
- إستخدام خوازيق شد فولاذية أو خرسانية لمقاومة قوى الرفع الناتجة من الطفو.

- إستخدام مرتكزات تثبيت دائمة داخل التربة لربط النفق مع الأرض ، وعادة ما تستخدم هذه المرتكزات فقط لتحمل الشد الإسمي في الحالات الطبيعية . وتكون قمة أو رأس هذه الدعامات مثبت ضمن بلاطة القاعدة .

- إستخدام نظام تخفيض دائم للضغط تحت قاعدة المنشأة ، وهو نظام معقد جدا لإزالة قوى الطفو بتجميع المياه تحت البلاطة السفلية ثم تصريفها بعيدا عن المنشأة النفقية ، هذا النظام يتطلب عناية كبيرة وذلك للحفاظ على دورة الحياة الطبيعية وذلك لتأثير هذا النظام على مستوى المياه الجوفية في المنطقة .

بالأخذ في الإعتبار أن المنشئات تحت الأرضية هي من المنشاءات ذات العمر التصميمي الطويل كان لابد من الإهتمام بإضافة وسائل حماية ضد الصدأ للخوازيق والمرتكزات المستخدمة لتقليل قوى الطفو والإهتمام بطريقة إتصالها بالمنشأة النفقية .

5.3.2.2 وصلات التمدد والإنكماش

(Expansion and Contraction Joints)

العديد من أنفاق الحفر والردم تصمم من دون وصلات تمدد وإنكماش دائمة ، وبالرغم من أن وصلات التمدد قد لا تكون مطلوبة إلا بالقرب من البوابات إلا أن وصلات الإنكماش تكون مطلوبة خلال النفق . في حالة حدوث تغيركبير في جساءة الوصلات قد يتسبب هذا التغيير في حدوث هبوط كبير وإذا كانت العزوم وقوى القص الناتجة أكبر مما قد يتحمله مقطع النفق يمكن إستخدام هذا النوع من الوصلات لكي تتعامل مع هذه المشكلة . تستخدم هذه الوصلات مثلما ذكرنا سابقا في البوابات وأيضا في المناطق التي يتم فيها تركيب أنظمة التهوية أو في أي من الأجزاء الجاسئة للمنشاة وذلك لأنها تسمح بحدوث أي هبوط متوقع في هذه المناطق

بالإضافة إلى التمددات الحرارية . ويفضل أن توضع وصلات الإنكماش تقريبا على بعد 30ft (9m) من بعضها البعض على طول المنشاة .

أحمال الزلازل قد تتسبب في عزوم إنحناء كبيرة في أنفاق الحفر والردم ، وفي هذه الحالة يمكن إستخدام هذا النوع من الوصلات للتخفيف من العزوم وقوى القص التي يمكن أن تحدث في المنشاءات الجاسئة المستمرة خصوصا مع زيادة السمك (وبالتالي زيادة الجساءة) الكلي للمنشاة . وتكون هذه الوصلات مطلوبة أيضا في المناطق التي تحدث فيها حركة ناتجة من أحمال الزلازل تؤدي إلى تغيير كبير في أبعاد مقطع النفق ويحدث هذا عادة عند البوابات ، وقد تكون هذه الحركة موازية أو عمودية على مقطع النفق .

الوصلات هي أكثر المناطق تعرضا للتسربات المائية مما يتسبب في زياده تكاليف الصيانة في هذه المناطق على المدى الطويل لعمر النفق ،ولذلك يجب تقليل عدد هذه الوصلات بقدر الإمكان ومراعات توفير عناية خاصة بتفصيلات هذه الوصلات للتقليل من مقدار التسرب الذي يتوقع حدوثه . أنواع الوصلات ومدى جودتها تمثل جزءا أساسيا من المتطلبات التي يجب مراعاتها في النظام الإنشائي ويجب أخذها في الإعتبار عند إختيار نوع النظام المناسب للمنشاة.

6.3.2.2 الحماية المائية (Waterproofing)

مستوى المياه الجوفية العالي أو وجود رشح للمياه من الطبقة العلوية يجعل حماية النفق من المياه ضروري جدا . الحماية المائية مهمة جدا لإبقاء النفق جاف والتقليل من الصيانة المستقبلية وهي تزيد أيضا من ديمومة النفق . الأنفاق التي يكون بها تسريب تكون غير مرغوبة وذات مظهر غير محبب وهي تمثل مصدر قلق للمستخدمين وفي المناطق ذات المناخ البارد قد تؤدي هذه التسربات إلى تكون ثلوج أو كتل ثلجية مما يمثل خطر كبير على المستخدمين

لذلك لابد من إختيار نظام الحماية المائية المستخدم بناء على متطلبات الأداء ومدى تماشي هذا النظام مع النظام الإنشائي المتبع في المنشأة .

4.2.2 السيطرة على المياه الجوفية:

توفير نظام سحب المياه يكون ضروري عندما يكون مستوى المياه الجوفية أعلى من مستوى قاعدة النفق ، ويعتمد نظام تصريف المياه المستخدم بشكل أساسي على مدى نفاذية طبقات التربة التي تقع تحت سطح المياه الجوفية .تخفيض مستوى المياه الجوفية حول منطقة الحفريات يؤدي الى حدوث هبوط في المنشاءات المجاوره و يؤثر على نمو النباتات في المنطقة و أيضا قد يتسبب في جفاف الآبار الموجودة وفي حالة وجود مياه ملوثة تؤدي عمليات سحب المياه إلى حركتها وإنتشارها في مناطق أخرى لذلك يجب أخذ الإحتياطات والتدابير الوقائية عند سحب المياه حول مناطق الحفريات ، أما داخل الحفريات فيمكن تحقيق ذلك عن طريق إستخدام حوائط غير منفذة للماء لتدعيم الحفريات تمتد تحت مستوى قاعدة النفق ، ومن الحوائط غير النافذة المستخدمة في تدعيم الحفريات حوائط ألواح الفولاذ المتداخلة (Steel interlocking sheeting walls) والحوائط الطينية الخرسانية (Concrete slurry walls) ، ويمكن أن توضع هذه الحوائط على عمق كبير لتصل إلى الطبقات التي تكون نفاذيتها للماء قليلة بحيث يقلل ذلك من تدفق المياه الجوفية أثناء عملية التشييد ويحد من تقليل مستوى المياه الجوفية في المنطقة . في مناطق الحفريات عادة ما تتم عمليات سحب المياه داخل الحفريات قبل البدء بتشييد النفق لكن في بعض الحالات يمكن أن يتم التشييد في الحالة الرطبة ثم تتم عمليات التجفيف بعد ذلك ، بعد عملية الحفر يتم ضخ أي تسربات للمياه قد حدثت أثناء التشييد بواسطة مضخات إلى أوعية خارج النفق .

1.4.2.2 طرق سحب المياه وتطبيقها:

يمكن التحكم بالمياه الجوفية أثناء عملية التشييد إما عن طريق إستخدام حوائط غير نافذة لإسناد الحفريات أو أبار لتتجمع فيها المياه أو بإستخدام الطرق الكيميائية أو عن طريق ضخ المياه خارج الحفريات ، ويجب عند إختيار الطريقة المتبعة أن تتماشى مع نظام الحفريات المستخدم . التعامل غير السليم مع المياه الجوفية يؤدي إلى حدوث هبوط مما يحدث ضرر كبير في البنيات التحتية والمنشاءات المجاورة .

في حالة مساحات الحفريات المحدودة يكون من الإقتصادي تجميع المياه ونقلها بإستخدام قنوات تصريف إلى آبار تجميع خارج مناطق الحفريات ، يجب مراعاة توفير حماية لنظام التصريف لمنع أي من الأجسام الغريبة بإعاقة النظام .

أما في المناطق التي تتوفر فيها مساحات كبيرة للحفريات والتربة المحيطة تربة نافذة للماء ، يمكن إستخدام نقاط التجميع أو الآبار العميقة لتخفيض مستوى المياه الجوفية ويتحقق ذلك في التربة الرملية والتربة الخشنة أما في التربة الطينية والطمية فإن هذه الطريقة تكون غير فعالة نسبة لدرجة النفاذية المنخفضة لهذه الأنواع من التربة .

2.4.2.2 إستقرار القاعدة:

في التربة جيدة التدرج كالتربة الطينية والطينية الطمية يمكن أن يحدث ضغط متفاوت خلال دعامات الحفريات مما ينتج عنه حدوث تدفق مائي داخل النفق ، يتسبب هذا التدفق في كثير من المشاكل مثل حدوث هبوط خارج مناطق الحفريات وحدوث فقد في المواد وفي التربة المحيطة مما يجعل هذه التربة غير صالحة ليشيد عليها النفق ، وفي الحالات القصوى قد يتسبب في عدم إستقرار قاعدة الحفريات مما يتسبب في حدوث إنتفاخ يؤدي إلى فشل دعامات الحفريات . يمكن تفادي هذه الحالة عن طريق تثبيت دعامات الحفريات على عمق أكبر داخل

التربة أو عن طريق زيادة ثبات التربة المحيطة عن طريق إستخدام الطرق الكيميائية أوعن طريق عمل الحفريات في التربة الرطبة قبل تجفيف المياه وتشييد بلاطة القاعدة بسمك كافي لتقاوم الإنتفاخ الذي يتوقع حدوثه في التربة .

3.4.2.2 الآثار المحتملة لعمليات سحب المياه:

قد تسبب عمليات سحب المياه للحفريات في خفض مستوى المياه الجوفية في المنطقة مما ينتج عنه حدوث هبوط في التربة المحيطة ، يمكن التقليل من أثر هذا الإنخفاض عن طريق إستخدام (slurry walls, tangent secant piles ,steel sheet piling) . في المنشاءات ذات الدعامات الخشبية يتسبب انخفاض مستوى المياه الجوفية في تعرض هذه الدعامات للهواء مما يؤدي إلى تلفها وفي المنشاءات المجاورة لمناطق الحفريات يتوقع حدوث هبوط فيها نتيجة لهذا الإنخفاض لذلك يجب إستخدام دعامات تحتية (underpinning) لأساسات هذه المنشأة للتقليل من أثر هذا الهبوط .

4.4.2.2 تفريغ المياه الجوفية والمشاكل البيئية:

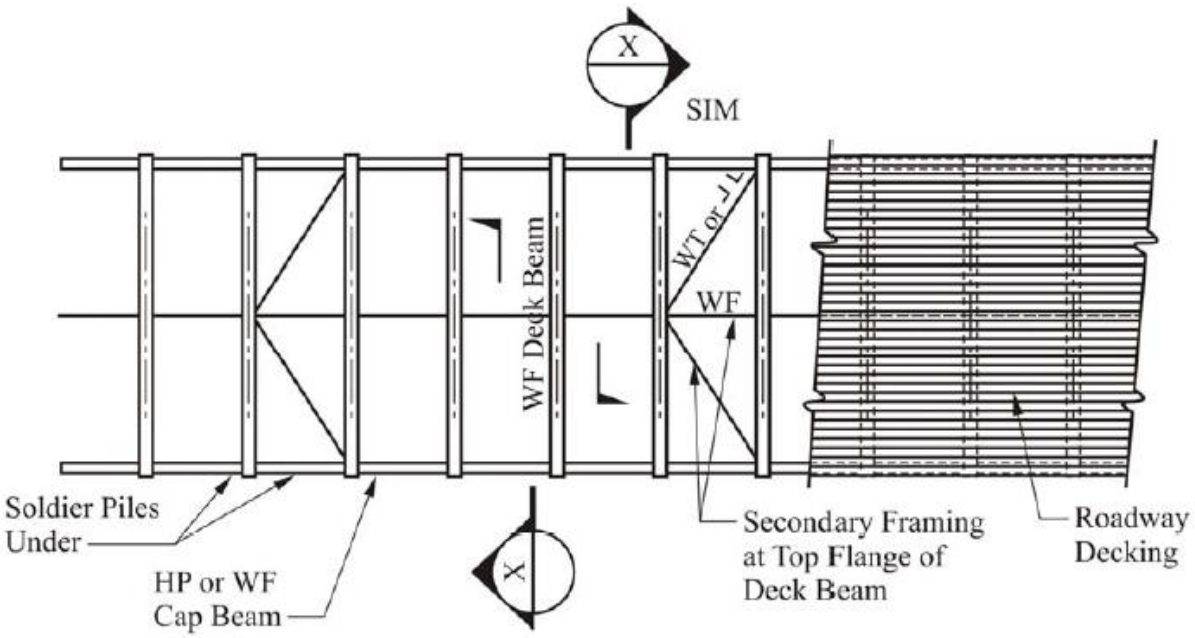
في معظم الحالات تحتاج المياه إلى فحص ومعالجة قبل أن يتم تفريغها ، حيث يجب أن تمر هذه المياه بأحواض الترسيب و أجهزة فصل الزيوت والمعالجات الكيميائية قبل أن يتم تصريفها ، المواد التي تتم فيها عمليات الحفر يجب ان تخضع أيضا للإختبارات قبل تحديد طرق التصريف المستخدمة والتي تكون محكومة بالقوانين المحلية في المنطقة .

5.2.2 الحماية والمحافظة على الحركة المرورية:

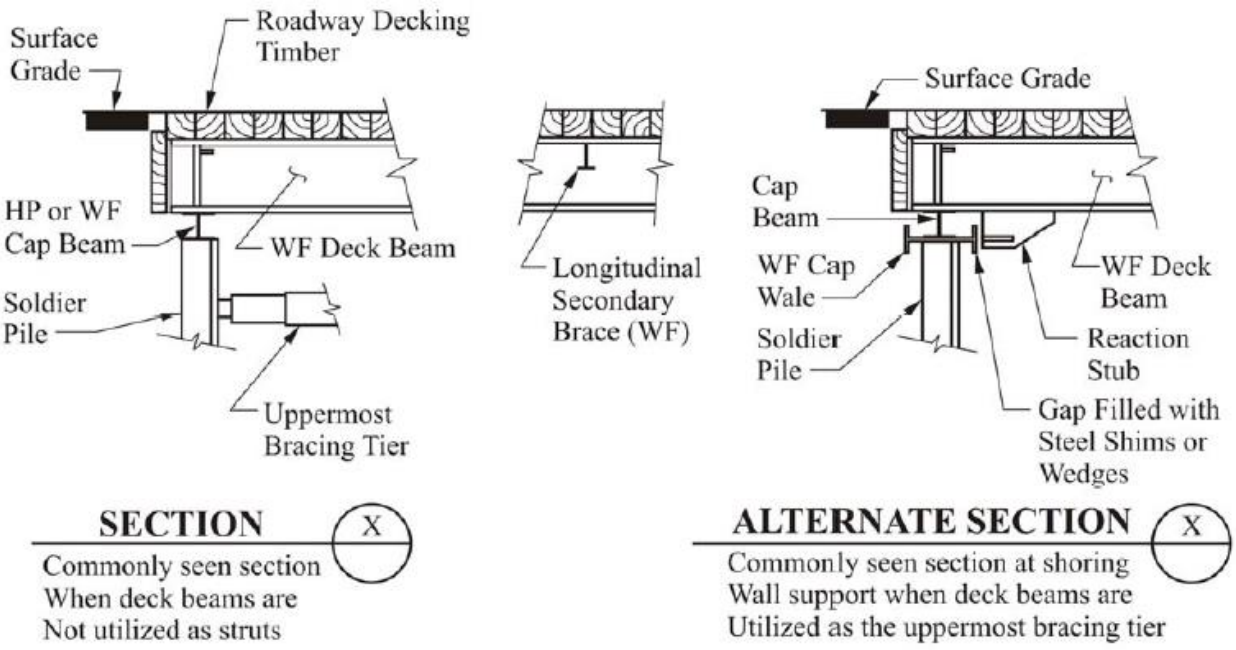
عندما تتقاطع حفريات النفق مع طريق مروري متواجد مسبقا أو تم عمل هذه الحفريات تحته يجب عمل أرضية مؤقتة فوق هذه الحفريات لتحافظ على الحركة المرورية في المنطقة ، يجب تصميم حوائط تدعيم الحفريات بحيث تتحمل الحمل الحي للمركبات الواقع على هذه الأرضية

المؤقتة ، ويعتمد العمق الكلي للحوائط على مدى ضرورة نقل الأحمال الناتجة من هذه الأرضيات إلى طبقات أكثر عمقا داخل التربة ، وقد يعتمد هذا على ما إذا كان الحمل الحي بالإضافة إلى وزن الأرضية يمكن أن ينتقل إلى التربة المحيطة عن طريق الإحتكاك الجانبي . الحوائط الساندة للحفريات ذات السمك الكبير (مثل slurry walls ,drilled-in-place soldier piles ,tangent piles) تكون ذات فعالية أكبر من الحوائط ذات السمك الرفيع (مثل sheet piles ,driven soldier piles) في نقل الحمل الحي إلى طبقات التربة .

تتكون الأرضيات المؤقتة عادة من أرضية بالإضافة لهيكل ليحمل الأرضية ، هذا النظام يمكن أن يتكون من ألواح فولاذية أو خشبية وتستخدم أيضا ألواح الخرسانة سابقه الصب ، عند إستخدام الألواح الفولاذية يمكن وضع هذه الألواح بحيث تمثل نظام تثبيت علوي لحوائط تدعيم الحفريات . يجب أن يصمم هيكل الأرضيات المؤقتة لأحمال مركبات ال(HL-93) حسب متطلبات المدونة الأمريكية (AASHTO) أو لأحمال معدات التشييد التي يتوقع مرورها فوق هذه الأرضيات أيهما أكبر .



DECK FRAMING PLAN



الشكل رقم (2−22) يوضح الأرضيات المؤقتة (Typical Street decking)

6.2.2 تدعيم ونقل المرافق العامة:

1.6.2.2 أنواع المرافق العامة:

تشييد أنفاق الحفر والردم خاصة في المناطق الحضرية عادة ما تواجهه عدد من خطوط المرافق العامة مثل خطوط إمداد المياه والصرف الصحي وخطوط الإتصالات والكهرباء وغيرها، في الغالب لا تكون هذه المرافق موضوعة في الأمكان المفترض تواجدها فيها على وجه التحديد لذلك فإنه من الضروري تحديد موقع هذه المرافق في مناطق الحفريات وأخذ الإحتياطلت اللازمة عند الحفر بالقرب من هذه المرافق ، في بعض الحالات التي تكون الحفريات فيها قريبة جدا من هذه المرافق يتطلب أن يكون الحفر يدوي وذلك حتى لا تتأثر هذه المرافق والتي قد تكون حساسة مثل خطوط الألياف الضوئية أو تشكل خطرا كبيرا مثل خطرط نقل الغاز ذات الضغط العالي وأنابيب البترول ، وهناك أيضا بعض المرافق التي تمثل خطر بالإضافة إلى أن عملية نقلها مكلفة جدا مثل خطوط الكهرباء ذات الجهد العالي ، أما خطوط

الصرف الصحي فينتج عنها مشاكل أخرى ، في حالة كان الجريان في هذه الخطوط يعتمد على الجاذبية فإن أي إنحراف أو تغيير في مسار هذه الخطوط قد يؤدي إلى إعاقة التدفق في هذه الخطوط وعادة ما تكون خطوط الصرف الصحي خاصة القديمة منها حساسة جدا إذا كانت مبينة من الطوب أو الحديد .

2.6.2.2 منهجية التعامل مع المرافق خلال التشييد :

ليس من الشائع تغيير مسار خطوط الخدمات أو نقلها خارج حدود مناطق التشييد وذلك نسبة لإرتفاع تكلفة عمليات النقل أو التحريك أو في حالة تقاطع خطوط الخدمات هذه مع بعضها ولذلك يتم في مثل هذه الحالات تدعيم هذه المرافق في مواقعها .

قبل البدء بعمليات التشييد التحت أرضية يجب عمل مسح لكل المرافق الواقعة في المنطقة والتي يتوقع أن تتأثر بعمليات التشييد وعمل تقارير مفصلة عنها وبيان أي منها يمكن نقله ، كما يجب بيان أي نوع من وسائل النقل يجب أن يستعمل لكل مرفق ويجب أن يدرج كل هذا في المخطط الزمني للتشييد حتى لا تؤدي الى تأخير عمليات التشييد الأخرى .

الدعامات المستخدمة للمرافق إما دائمة أو مؤقتة إعتمادا على حساسية المرفق المطلوب تدعيمه ، كما أنه من المهم توفير رقابة على هذه المرافق لعمل إجراءات علاجية قبل حدوث أي ضرر . الدعامات الرأسية يجب أن تصمم كمنشاءات جسرية والدعامات الجانبية تصمم كحوائط ساندة .