

الفصل العاشر

الأنفاق

تعتبر الأنفاق فى عصرنا الحالى من الوسائل الضرورية التى تساعد على حل مشاكل المرور وتيسير وسائل النقل فى المدن الكبيرة والعواصم المزدحمة خاصة فى حالة وجود عوائق طبيعية كالجبال والممرات المائية ذات الاتساع الكبير، وتستخدم الأنفاق بكثرة فى أعمال التعدين ومشروعات توليد الكهرباء أمام السدود والخزانات، وكذلك عمليات الصرف المختلفة.

تصنيف الأنفاق:

تصنيف الأنفاق تبعاً لأغراض إنشائها إلى:

١ - أنفاق القنوات المائية Aqueducts Tunnels

٢ - أنفاق السكك الحديدية Railway Tunnels

٣ - أنفاق المرور تحت الأرضية Subway Tunnels

٤ - أنفاق النقل Vehicular Tunnels

٥ - أنفاق التحويل أثناء إنشاء السدود Drainage Tunnels

٦ - أنفاق الأهوسة Spillway Tunnels

٧ - أنفاق صرف المياه Sanitation Tunnels

٨ - أنفاق توليد القوى الكهربائية Power Tunnels

٩ - أنفاق صرف المجارى Sewer or Sanitation Tunnels

١٠ - أنفاق المناجم بغرض النقل والتهوية Mine Tunnels

هذا بالإضافة إلى العديد من الأنفاق الصناعية متعددة الأغراض التى تجمع بين أكثر من نوع من الأنفاق سالفة الذكر مثل تلك التى تشق بغرض إنشاء الطرق السريعة للنقل فى المناطق ذات التضاريس المعقدة للتغلب على المنحدرات الشديدة.

جيولوجية الأنفاق

يجب عند اختيار مواقع الأنفاق أن تشمل الدراسات الأولية للمشروع على الاختبارات الجيولوجية السطحية وتحت السطحية مثل، نوع التربة والطبقات الصخرية، والتتابع الطبقي، والخواص الطبيعية والميكانيكية للصخور عند موقع النفق، بالإضافة إلى الظروف الجيولوجية السائدة بالمنطقة مثل التراكيب الأولية والثانوية في الصخور ومنسوب المياه الأرضية ومدى تأثيرها على صخور الموقع.

(أ) الأنفاق في الصخور الرسوبية والمتحولة:

في الصخور الرسوبية تكون مستويات الضعف هي مستويات التتابع والفواصل العمودية على مستويات التتابع أكثر الأنواع خطراً على الأنفاق، بينما في حالة الصخور المتحولة مثل الشيست والنيس تكون مستويات الضعف هي مستويات التورق ويمكن تلخيص العوامل التي يجب أن تؤخذ في الاعتبار عند اختيار مواقع الأنفاق في الصخور الطبقيّة كما يلي:

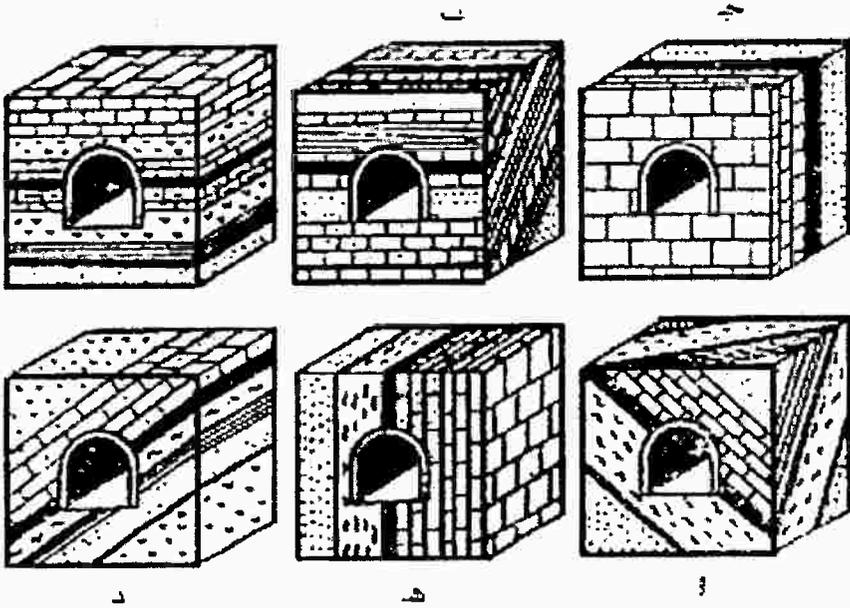
١ - دراسة تأثير مستويات الضعف والفواصل على حالة اتزان الصخور المحيطة بالنفق، وكذلك دراسة تأثير عمليات التفجير على حالة الصخور إذ إنها تؤدي عادة إلى زيادة الشقوق واتساع الفواصل.

٢ - دراسة تأثير الزمن على سلوك الصخور المحيطة بالنفق ويظهر تأثير هذا العامل في الفترة بين إزاحة الصخور بعد التفجير وإنشاء الدعائم المؤقتة أو الدائمة.

٣ - دراسة قدرة تحمل الصخور للإجهادات المختلفة وذلك لتصميم الدعائم المناسبة التي تحمي النفق من الانهيار. وفي حالة الصخور التي تحتوي على مستويات الضعف في الاتجاه الأفقي أو ذات الميل البسيط فإن الصخور نفسها لها تأثير الكمرات المعرضة لإجهادات الثني، بشرط أن تكون المسافة بين الفواصل أكبر من عرض النفق، كذلك يتوقف الضغط الواقع على الدعائم المستخدمة على مقدار ميل الطبقات واتجاه محور النفق.

ويوضح شكل (١٠٤) العلاقة بين ميل الطبقات الرسوبية واتجاه محور النفق حيث يكون الضغط على الدعائم في الشكل أ، ب، ج موزعاً توزيعاً رأسياً متجانساً بينما في الحالتين (د، هـ) يكون الضغط متمركزاً على الحوائط الجانبية، وفي الحالة (و) يكون الضغط أكبر ما يمكن عند قمة النفق.

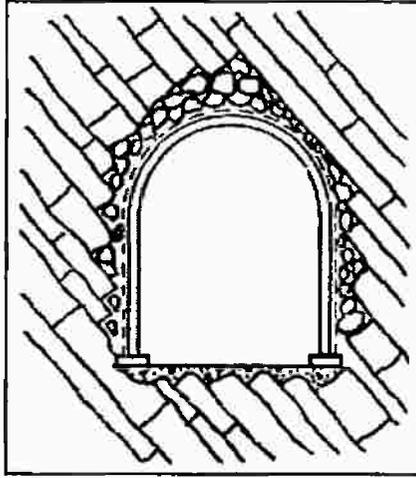
وقد وضعت عدة نظريات عن شكل العقد الطبيعي الناشئ فوق سقف النفق. ويطلق العقد الطبيعي على منطقة الصخور التي تنشأ فوق سطح النفق لتصل بالصخور إلى حالة الاتزان دون استخدام دعائم. وتفترض بعض النظريات أن شكل العقد يتبع تركيب قوس (Arch Structure) بينما تفترض نظريات أخرى أنه يكون على شكل نصف قبوى (Half Dome Structure) ومن المعروف هندسياً أن الهيكل نصف القبوى أكثر تحملاً من الهيكل قوسى الشكل المتساوى معه



شكل رقم (١٠٤): العلاقة بين ميل الطبقات ومحور النفق.

فى الاتساع وتكون القوى المؤثرة على الدعامات أمام واجهة التشغيل أقل من تلك المؤثرة على الدعامات الخلفية البعيدة عنها. غير أنه إذا تركت منطقة العقد فترة طويلة دون تدعيم بعد التفجير فإن القوى المؤثرة تؤدى إلى حركة الصخور حول منطقة النفق لتعدل من الهيكل نصف القبوى ليصبح على شكل قوس كلما تقدم النفق.

وفى بعض الأنفاق التي تنشأ فى الطبقات المائلة فإن سقف النفق يميل إلى التصدع بطريقة غير منتظمة وتتساقط كتل الصخور نتيجة فقد قوى الاحتكاك بين الكتل الصخرية فى اتجاه مستويات التطابق المائلة، وبذلك تنشأ أحمال لا مركزية على الدعامات تتطلب اتخاذ بعض الاحتياطات واستخدام طرق خاصة للتدعيم على شكل تكسيات كاملة كما هو مبين بالشكل (١٠٥).



شكل رقم (١٠٥): تدعيم الأنفاق في الطبقات كبيرة الميل.

(ب) الأنفاق في الصخور النارية:

تشبه ظروف إنشاء الأنفاق في الصخور النارية كالجرانيت تلك التي تنشأ في الصخور الرسوبية المتماصة. ويؤدي تداخل كتل الصخور النارية في بعضها إلى نوع من التدعيم الذاتي لسقف النفق.

(ج) الأنفاق في الصخور المهشمة:

عند تعرض الصخور المتماصة والكتلية لتأثير إجهادات كبيرة تتعدى قدرات تحمل الصخور فإنها تنهار وتتهشم إلى كتل أصغر لدرجة يصبح معها من الصعب تكوين عقد طبيعي عند إنشاء الأنفاق بها. غير أن زيادة سمك الغطاء الصخري غالباً ما يعمل على تقليل تأثير الضغط الناشئ عن وزن صخور الغطاء، وذلك لأن بعض الطبقات تعمل كعقد يعمل على نقل تأثير الضغط الناتج عن نقل الغطاء الصخري إلى الحوائط الجانبية للنفق. وهذا ما يعرف بالهيكل القوسى ويوضح شكل (١٠٦) الأسس الرياضية لهذا القوس الصخري وطريقة حساب مقدار الإجهادات التي تتعرض لها الدعائم المقاومة في النفق.

(د) الأنفاق في الصخور المجزأة على شكل بلوكات كبيرة:

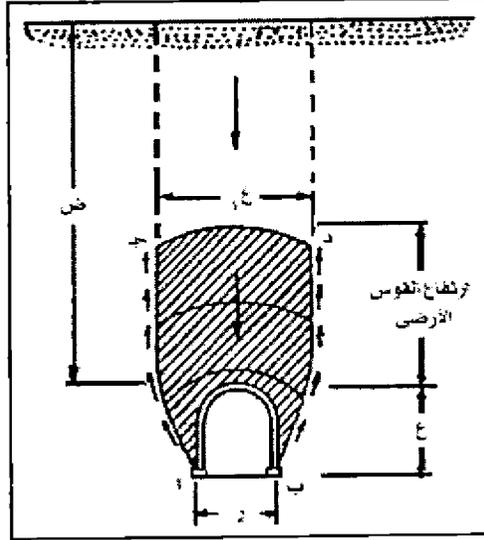
يقصد بهذا النوع من الصخور تلك التي تأثرت بالإجهادات وحدثت بها انهيارات على مستويات متباعدة وبذلك تكون حركة البلوكات منفصلة عن بعضها وتعامل معاملة الصخور الكتلية عند إنشاء الأنفاق بها.

(هـ) الأنفاق فى الأرض اللينة:

تقسم الصخور المكونة للأراضى اللينة إلى خمسة أقسام رئيسية هى:

١ - الأرض الثابتة أو المستقرة Firm Ground

٢ - الأرض القشرية Raveling Ground



شكل رقم (١٠٦): نظرية القوس الأرضى فى الصخور المهشمة.

٣ - الأرض الزاحفة Running Ground

٤ - الأرض الانسيابية Flowing Ground

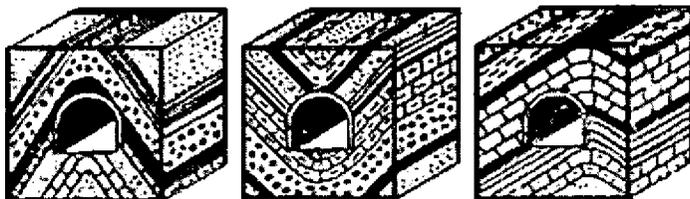
٥ - الأرض المنتفخة والمنضغطة Swelling and Squeezing Ground

والأراضى السابقة تحتاج جميعها إلى معالجة خاصة عند إنشاء الأنفاق بها حيث تتميز صخور هذه الأراضى بوجود المعادن الطينية مثل المونتوريلايت والطين الجيرى والطباشيرى والصفحي وجميعها تتوقف خواصها الطبيعية والميكانيكية على مقدار ما تتشربه من المياه. وعلى ذلك عند إنشاء الأنفاق فى مثل هذه الصخور يجب دراسة أنواع المعادن الطينية ومستوى المياه الأرضية وعلاقته بمنسوب النفق.

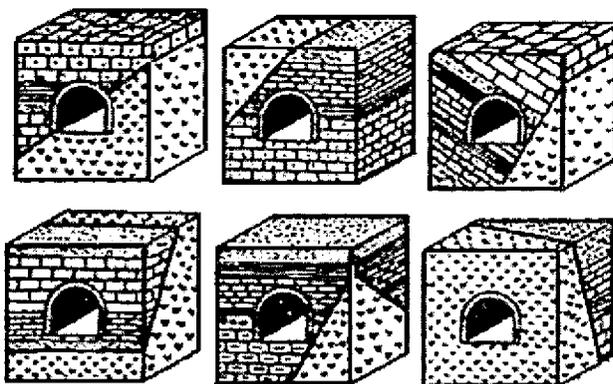
التركيب الجيولوجية واختبار موقع النفق:

عند إنشاء الأنفاق خلال الطبقات التى بها فوالق وطيأت يجب مراعاة تأثير هذه التراكيب الجيولوجية على سلامة الأنفاق، وفى حالة الطيأت يراعى الابتعاد عن قمة الطية حيث غالباً ما تكون أكثر نقط الطية تعرضاً للإجهادات المرتفعة كما هو مبين بالشكل (١٠٧)، بينما فى

حالة الفوالق يراعى أن يكون اختيار اتجاه النفق فى منطقة الفالق متعامداً على الفالق كلما أمكن ذلك كما هو مبين بالشكل (١٠٨).



شكل رقم (١٠٧): العلاقة بين محاور الأنفاق والطيات.



شكل رقم (١٠٨): العلاقة بين محاور الأنفاق ومستويات الفوالق

توزيع الإجهادات حول الأنفاق

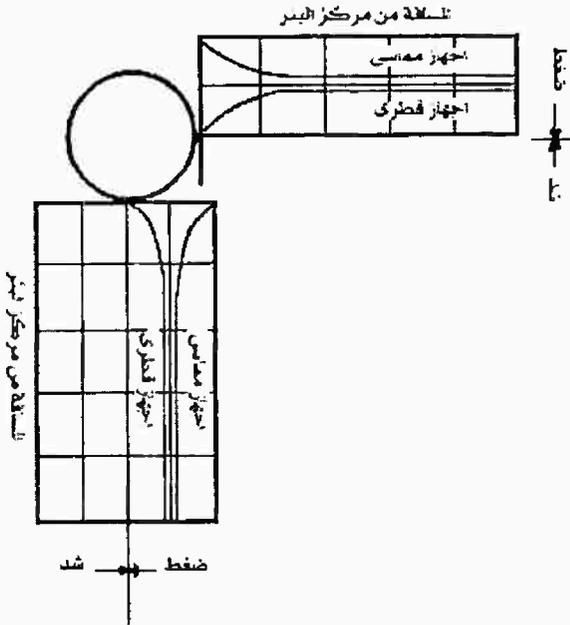
تقع صخور القشرة الأرضية تحت تأثير الإجهاد الناشئ عن ثقل الطبقات المكونة للغطاء الصخرى ونتيجة لذلك تتولد فى الصخور مجالات الانفعال والإزاحة والتي تختلف تبعاً للعمق الذى توجد عليه الكتلة الصخرية، وفى الأعماق القريبة من سطح الأرض تكون الإجهادات السائدة أحادية المحور (Uniaxial)، بينما فى الأعماق المتوسطة البعيدة عن السطح حيث تحيط الكتل الصخرية بعضها البعض من جميع الاتجاهات تكون الإجهادات السائدة ثنائية المحور (Biaxial) أما فى الأعماق الكبيرة من القشرة الأرضية فتكون الصخور واقعة تحت إجهادات ثلاثية المحور (Triaxial) تسمى بالضغط الهيدروستاتيكية متساوية القوة فى الاتجاهات الثلاثة، وفى هذه المنطقة تسلك الصخور سلوك الوسائل غليظة القوام، والكتل الصخرية عند هذه الأعماق المختلفة تكون تحت حالة إجهاد يعرف بالانزاجن الأستاتيكي وتعرف الحالة من الاتزان بالإجهادات الأولية.

وتنشأ حركة الصخور بمجرد أى تغيير فى حالة الاتزان الصخرى تحت قوى الإجهادات الأولية وقد يحدث نتيجة لهذه الحركة انهيار الصخور أو تشققها كأحد ظواهر انطلاق الطاقة الكامنة بها نظراً لوجودها تحت تأثير مجال الإجهاد الأرضى ويزيد كمية الطاقة الكامنة بزيادة العمق الذى توجد عليه الكتلة الصخرية وقد تصل فى بعض المناجم العميقة كمناجم الذهب فى كولار بالهند إلى حد انفجار الصخور بما يعرف بظاهرة الانفجار الصخرى.

توزيع الإجهادات حول الآبار الرأسية والأفقية:

لقد أمكن عن طريق استخدام نظريتى المرونة واللدونة تقنين الإجهادات المؤثرة فى بعض الفتحات (الأنفاق) ذات المقاطع المنتظمة مما أدى إلى حل كثير من مشاكل التصميم كذلك أمكن بالتجارب العملية لدراسة ميكانيكا الصخور تحديد قيم ثوابت الصخر مثل معاملات المرونة والجمودة ونسبة بواسون لما لهذه الثوابت من أهمية فى تحديد معاملات الأمان عند تصميم الأنفاق. وفيما يلى بعض الأمثلة للقوانين الخاصة بحساب مركبات الإجهاد حول فتحات الأنفاق:

(أ) الأنفاق الرأسية دائرية المقطع (شكل ١٠٩):



شكل رقم (١٠٩): توزيع الإجهادات حول الآبار الرأسية الدائرية.

$$\sigma_r = \left(\frac{r_0}{r} - 1 \right) \sigma_c = \left(\frac{r_0}{r} - 1 \right) \sigma_c$$

$$ج = \left(\frac{ن}{ن-1}\right) \cdot ع \cdot د = \left(\frac{نق^2}{ل^2} + 1\right) ر$$

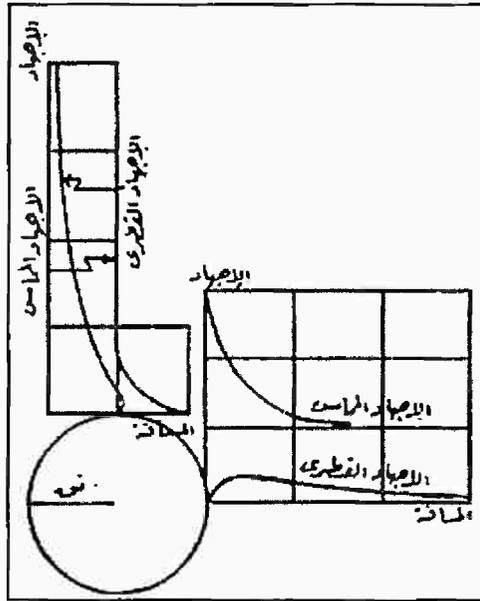
(ب) الأنفاق الأفقية دائرية المقطع (شكل ١١٠، ١١١):

$$ج = \left(\frac{ق_1 + ق_2}{2}\right) \left(\frac{نق^2}{ل^2} - 1\right) + \left(\frac{ق_2 - ق_1}{2}\right) \left(\frac{نق^3}{ل^3} - \frac{نق^4}{ل^4} - 1\right) \text{ جتا } 2 \text{ س}$$

$$ج = \left(\frac{ق_1 + ق_2}{2}\right) \left(\frac{نق^2}{ل^2} + 1\right) - \left(\frac{ق_2 - ق_1}{2}\right) \left(\frac{نق^3}{ل^3} + 1\right) \text{ جتا } 2 \text{ س}$$

(ج) الأنفاق الأفقية بيضاوية المقطع (شكل ١١٢):

$$ج = \frac{(ق_1 - ق_2) 2 أ ب - (أ - ب^2) + (ب - أ^2) \text{ جتا } 2 \text{ س}}{أ + ب - (أ - ب^2) \text{ جتا } 2 \text{ س}}$$



شكل رقم (١١٠)

توزيع الإجهادات حول نفق دائري المقطع للزاوية س = صفر

الزاوية س = ٩٠°

حيث :

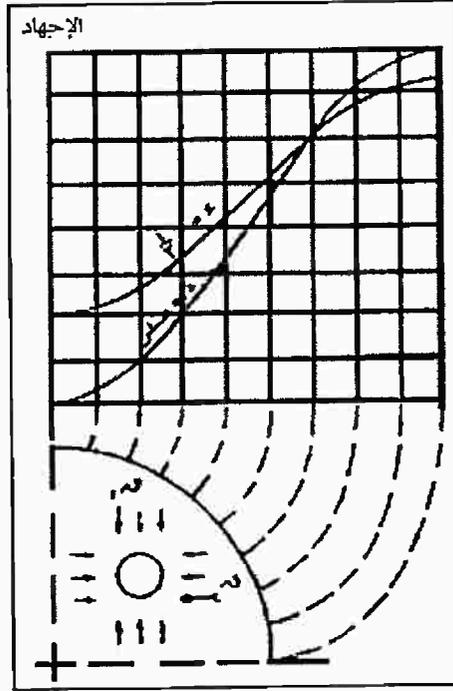
ج_ه = الإجهاد القطرى.

ج_م = الإجهاد المماسى.

ق_١ = مركبة القوة المؤثرة فى الاتجاه الرأسى.

ق_٢ = مركبة القوة المؤثرة فى الاتجاه الأفقى.

ن = نسبة بواسون.



شكل رقم (١١١): توزيع الإجهادات حول محيط نفق دائرى المقطع.

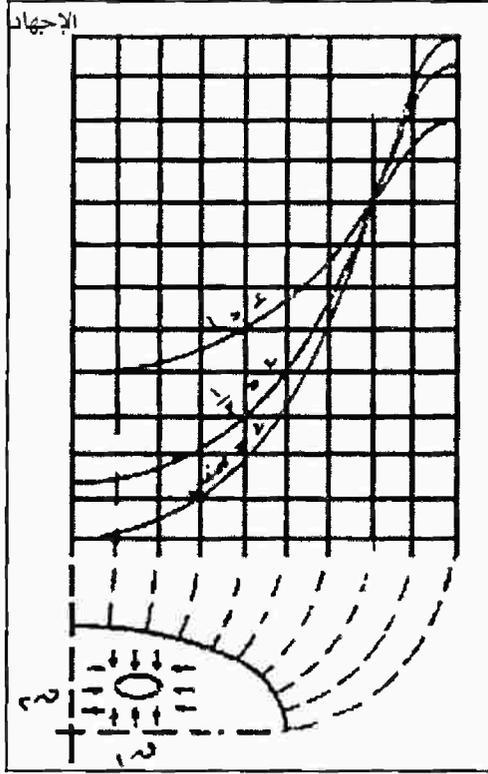
ع = العمق من السطح.

ر = متوسط الكثافة النسبية لصخور الغطاء الصخرى.

نق = نصف قطر الفتحة دائرية المقطع.

ل = المسافة من مركز الفتحة (النفق).

$$د = مقدار ثابت = \left(\frac{ن}{ن - ١} \right)$$



شكل رقم (١١٢): توزيع الإجهادات حول نفق أفقى بيضاوى لزوايا المقطع س = صفر، ٩٠°
 أ ، ب = نصف محورى الفتحة البيضاوية حيث ٢ أ هو المحور الأكبر، ٢ ب المحور الأصغر
 س = الزاوية القطرية مقاسة من المحور الرأسى

الدراسات الجيولوجية لاختيار مواقع الأنفاق

- تشمل الدراسات الجيولوجية والهندسية الخاصة باختيار موقع النفق بغرض جمع المعلومات عن صخور منطقة النفق والتربة والدراسات الآتية:
- ١ - تحديد أنواع التراكيب الجيولوجية بمنطقة النفق كذلك نوع الصخور التى يمر بها وخواصها الطبيعية والميكانيكية.
 - ٢ - عمل القطاعات الجيولوجية الطولية والعرضية للنفق والصخور المحيطة به.
 - ٣ - معرفة مدى تأثر المنشآت السطحية بعمليات النفق وخاصة ظاهرة التريبج.

- ٤ - مقارنة جيولوجية لمنطقة النفق بالمشابه من الأنفاق والقريبة من المنطقة كلما أمكن ذلك.
- ٥ - تحديد مصادر الحصول على مواد الإنشاء من مناطق قريبة.
- ٦ - عمل مسح شامل لمنسوب المياه الأرضية والسطحية ومدى تأثيرها على النفق والصخور المحيطة به.
- ٧ - معرفة مدى سهولة نقل المعدات من وإلى مناطق التشغيل.
- ٨ - دراسة مناطق الضعف الواجب تدعيمها ونوع التدعيم الملائم.

بعض الأمثلة للأنفاق:

من الأمثلة المشهورة للأنفاق في العالم نذكر منها ما يأتي:

- ١ - نفق نهر الميرزى بإنجلترا الذى يصل الطريق لمدينة ليفربول ويبلغ قطره حوالى ١٥ مترًا ويخترق النفق صخوراً رملية تحتوى على المياه الأرضية بالمنطقة بمعدل ١٢٠٠ متر مكعب/ساعة مما أدى إلى خفض منسوب المياه الأرضية حوالى ثمانية أمتار عن المنسوب قبل إنشاء النفق مما أثر على الآبار المجاورة فى منطقة قطرها ثلاثة كيلومترات. وتطلب تبطين النفق بالخرسانة لمنع تسرب المياه الأرضية إلى داخل النفق.
- ٢ - نفق سيدنى باستراليا ويبلغ قطره ثلاثة أمتار وطوله ما يقرب من ١٤ كيلومترًا ويخترق صخوراً رملية بها كثير من الفواصل والشقوق وقد عملت تكسية النفق بالخرسانة العادية (غير المسلحة) واستخدمت صخور الحجر الرملى فى خلطات الخرسانة مما أدى إلى تعرض النفق للضغط المائى نتيجة مرور الماء خلال الخرسانة وتطلب التغلب على هذه المشاكل عمل تكسية من الصلب على امتداد النفق وملء الفراغ حوله بالخرسانة.
- أما فى مصر فإن هناك عددًا من الأنفاق الهامة ومن ضمنها ما يأتى:
- ١ - نفق أسوان الذى يغذى التربينات الكهربية عند خزان أسوان وهى محفورة فى صخور الجرانيت.
- ٢ - الأنفاق الستة أمام السد العالى وهى محفورة فى صخور الجرانيت ويبلغ قطر كل منها ١٥ مترًا وطولها ٢٨٢ مترًا ومبينة بالخرسانة المسلحة.
- ٣ - نفق وادى الريان الذى يبلغ طوله حوالى ثمانية كيلومترات.
- ٤ - نفق المرور عند كوبرى قصر النيل وهو من النوع المكشوف كذلك نفق كوبرى الجيزة وهو محفور فى تربة طينية وله حوائط سادة من الخرسانة المسلحة لمنع الانزلاق.
- ٥ - أنفاق القاهرة الكبرى الخاصة بشبكة المترو.
- ٦ - نفق الشهيد أحمد حمدي ويمر أسفل قناة السويس ليربط سيناء بالوادي.

الفصل العاشر: الأنفاق

1. Moyer, D.G., Rock Mechanics in the Investigation and Construction of Underground Power Station, Australia: Geological Society of America, Eng. Geol. Histories, v. 3, p. 13-55, (1958).
2. Moller, L., Constructions in Stone; Stuttgart (1963).
3. Scrafim. J.L., Internal Stresses in Galleries; 7th, International Congress of Large Fams, Rome, (1961).
4. Stiny, J., The Geology of Tunnel Construction : Springer Verlag, Vienna, (1950).
5. Terzaghi. K, and F.E., Richart, Stress in Rock above Cavities: Geotechnique, v. 3, p. 57-90, (1952).
6. Yaeger, C., Present Trends in the Design of Pressure Tunnels and Shafts for Underground Hydroelectric Power Stations: Proceedings of Institute of Civil Engineers, v. 4, p. 119-200, (1955).