

# Tünellerde çelik lifli püskürtme beton kaplama tasarımı, mekanik büyüklükler ve kalite kontrol ilkeleri

## 1. GİRİŞ

Son yıllarda yeraltı açıklıklarının iksasında ana taşıyıcı veya yardımcı taşıyıcı olarak diğer iksa yöntemlerine göre uygun nitelikleri ile daha fazla tercih edilen püskürtme betonun özellikle büyük tünel projelerindeki kullanımını artırmıştır. Bunun başlıca nedenleri şu şekilde sıralanabilir (Arioğlu ve Yüksel, 1985, 1986):

- Kazı işleminden hemen sonra uygulanabilir, çöken ve deforme olan arazi tabakasına erken bir taşıyıcılık özelliği kazandırır.

- Hızla kaya cidarına püskürtülen taze beton karışımı kırık ve çatlaklara kolayca nüfuz ederek kaya tabakasının yerinde kayma dayanımını artırır.

- Kazı cidarındaki çentik etkisi, başka bir deyişle gerilme konsantrasyonları püskürtme beton uygulamasında elde edilen düzgün yüzey vasıtası ile minimize edilir.

- Kazı cidarı ile püskürtme beton arasında sağlanan aderans, kaya yükünü civar kayaç kitlesine aktararak taşınmasına yardımcı olur.

- Karışımın taşınma ve yerleştirme işlemi bir arada ve yüksek hızla gerçekleştirilir.

- Yerleştirme işlemi püskürtme yolu ile sağlandığından kalıp malzemesi-

**Prof. Dr. Müh. Ergin Arioğlu**

İTÜ Maden Mühendisliği Bölümü

**Y. Müh. Başar Arioğlu**

Yapı Merkezi Holding A.Ş.

**Dr. Müh. Canan Girgin**

Yapı Merkezi Holding A.Ş.

ne gerek duyulmaz, bu da önemli ölçüde işçilik, malzeme ve zaman tasarrufu sağlar.

- Kazı sırasında değişen şartlara uygun, örneğin arazinin ayrışma zonnuna gelinmesi veya su gelininin artması gibi durumlarda değişen şartlara uygun çözümler sağlar.

- Karışım içine koyulan çelik, polimer vb. lifler ilave bir çekme donatısına gerek duyulmaksızın betonun çekme dayanımını artırır. Ayrıca bu lifler ile güçlendirilmiş püskürtme beton kaplama kalınlığı düz veya hasırlı beton kaplamasına kıyasla, daha ince olabildiği gibi (Arioğlu ve Girgin, 1998), (Arioğlu E, Arioğlu, B, Girgin, C, 1999), (Arioğlu, E, Arioğlu, B, Girgin, C, 1999) kaya patlaması gibi ani ve tahripkar kırılma moduna karşı enerji yutma kapasitesi ile de daha büyük bir süneklik sağlar.

- Yukarıda bahsedilen bütün üstünlüklerine karşılık tasarım ve karışım bileşenlerine ait hesapların uygun bir şekilde gerçekleştirilmemesi, püskürt-

me işlemi sırasında operatörün tecrübe eksikliğinden kaynaklanacak hatalar ve kalite kontroldaki eksiklikler püskürtme betondan beklenen başarı ve ekonomiyi önemli ölçüde zayıflatır. Bu bakımdan püskürtme betonun proje başarısını doğrudan etkileyen mekanik büyüklükler'e (basınç, yapışma, eğilme, çekme, tokluk vb.) etki eden parametreler, projenin başlangıç aşamasında son derece iyi bir şekilde ortaya konulmalıdır.

Bu çalışmada öncelikle püskürtme beton uygulama teknolojileri, kuru-yaş yöntem konunun bütünselliğinin sağlanması bakımından belirli bir ayrıntı içinde ele alınmıştır. Ayrıca, püskürtme beton tasarımını denetleyen belli başlı büyüklüklerden 7, 28 günlük basınç ve eğilme dayanımlarındaki değişim karakteristikleri teorik ve uygulamadaki karot değerlendirmesi örnekleri ile birlikte incelenmiştir. Çelik lifli, hasır donatılı ve liffsiz püskürtme beton tabaka kalınlıkları karşılaştırılmış, kaya patlamalarına maruz tünellerde çelik lifli kaplama tasarımı akım şeması örneklenmiş, bazı tünellerde çelik lifli püskürtme beton karışım oranları irdelenmiş ve püskürtme betonun şantiyede kalite kontrolü ile ilgili bazı ölçütler verilmiştir.

## 2. PÜSKÜRTME BETON GENEL ÖZELLİKLERİ

### 2.1 Püskürtme Beton Uygulamasında Kullanılan Yöntemler

Tünel mühendisliğinde günümüzde kullanılmakta olan başlıca iki püskürtme yöntemi mevcuttur : **Kuru yöntem** (Avusturya yöntemi) ve **Yaş yöntem** (Norveç yöntemi).

Kuru ve yaş yöntemin özellikleri Çizelge 1'de karşılaştırmalı olarak incelenmektedir.

Çizelge 1 Kuru ve yaş yöntemin genel karşılaştırması

Özellikler	Kuru yöntem	Yaş yöntem
<b>Ekipman</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Daha düşük yatırım maliyeti-esnek donanım</li> <li>• Küçük kapasiteli çalışma genellikle üretim hızı &lt;math&gt;5\text{m}^3/\text{saat}&lt;/math&gt;</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yatırım maliyeti daha yüksek</li> <li>• Büyük kapasiteli, üretim hızı, maks. <math>20\text{m}^3/\text{saat}</math></li> </ul>
<b>Karıştırma</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Şantiyede küçük karıştırma tesisi</li> <li>• Ön karışım ve kuru bileşenler kullanılabilir</li> <li>• Islak kum, dayanımı olumsuz etkiler</li> <li>• Uzak mesafeye iletim imkanı</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Mikserde uygun karışım elde etme imkanı</li> <li>• Hazır beton kullanma imkanı</li> <li>• Islak kum kullanılabilir</li> <li>• İletim süresi ve mesafesi sınırlı</li> </ul>
<b>Su içeriği</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük su/çimento oranı mümkün</li> <li>• <b>Değişken, operatör tarafından kontrol edilir</b></li> <li>• Su karışıma homojen dağılmayabilir</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Düşük su/çimento oranı ile çalışamaz</li> <li>• <b>Sabit, operatörden bağımsız</b></li> <li>• Homojen su dağılımı sağlanır</li> </ul>
<b>İlave bileşen</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toz ve sıvı hızlandırıcı kullanılır</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Sıvı hızlandırıcı kullanılır</li> </ul>
<b>Geri sıyrıyan malzeme (%) (G)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Yüksek miktarda, G = % 20-60</b></li> <li>• <b>Kayıp malzeme yığınları oluşur, işgücü kaybı yaratır</b></li> <li>• Kaba agrega kaybı fazla</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Düşük miktarda, G = % 5-15</b></li> <li>• Yığın oluşmaz</li> <li>• Çok az kaba agrega kaybı oluşur</li> </ul>
<b>Kalite</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Su/çimento oranı daha düşük-daha yüksek dayanım, ancak, değişken kalite söz konusu</li> <li>• Operatör tecrübesi çok önemli</li> <li>• Pompalama problemi yok</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• <b>Su/çimento oranı daha yüksek-daha düşük dayanım ama daha homojen kalite elde edilebilir</b></li> <li>• Operatör tecrübesi önemli değil</li> <li>• Pompalanabilir karışım olmalı ve pompalama uzaklığı sınırlı</li> </ul>
<b>Uygulama Kolaylığı Bakımından</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Önemli bir toz problemi mevcut</li> <li>• <b>% 5-15 oranında ön-nemlendirme ile toz azaltılabilir</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Toz problemi pek yoktur</li> <li>• Daha iyi görünüm</li> </ul>

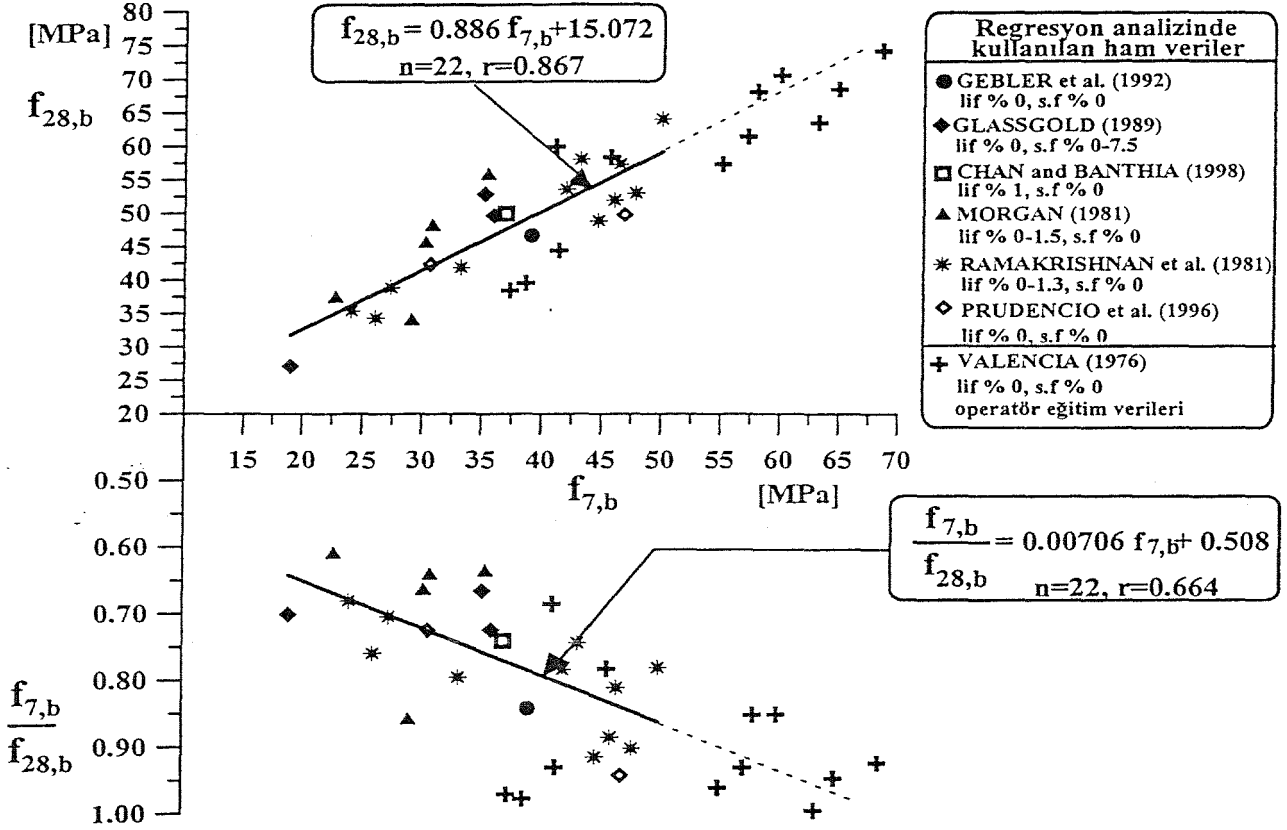
### 2.2 Püskürtme Betonda Mekanik Büyüklükler

• Şantiyede veya laboratuvarında kuru yönteme göre üretilmiş test panellerinden karot almak sureti ile yapılan eğilme ve basınç deneylerine ait ham verilerden elde edilen regresyon ifadeleri aşağıda verilmiştir. Karot düzeltme faktörleri için Neville(1995) bağıntısından yararlanılmış ve bütün karot ham verileri **15 cm lik küp** ( $\lambda=1$ ) eşdeğerleri cinsinden regresyona sokulmuştur.

• 7 günlük basınç dayanımının  $f_{7,b}$  deneylerle belirlenmesi durumunda 7 günlük eğilme  $f_{7,e}$ , 28 günlük basınç  $f_{28,b}$  ve eğilme  $f_{28,e}$  dayanımlarına, regresyon ifadelerinde verilen korelasyon katsayılarının doğruluk düzeyinde geçmek mümkün olmaktadır.

• Şekil 1'de çok sayıda işlenmemiş datadan elde edilen 7 ve 28 günlük numunelerde basınç dayanımı ilişkisi verilmiştir-hızlandırıcı kullanılmamıştır (Girgin, Yüksel, Arıoğlu, 1998). Değişik oranlarda çelik lif ve silika fümünün de kullanıldığı toplam **n=22** adet datanın regresyon

ilişkisinde  $r=0.867$  lik bir korelasyon ile yer alması dikkat çekicidir. Ayrıca operatör eğitimi amacı ile kaydedilen ve regresyon ilişkisi dışında bırakılan Valencia (1976) deki 12 adet datanın da bu ilişkiyi bozmadığı görülmektedir. Ayrıca, 7 günlük basınç dayanımı 20-30 MPa arasında değişen normal betonda 0.7-0.77 (Arıoğlu vd.,1994) olan  $f_{7,b} / f_{28,b}$  oranının hızlandırıcı kullanılmamış lifli ve lifsiz püskürtme betonda da benzer sonuç verdiği görülmektedir.



Şekil 1 Çeşitli yazarlara ait işlenmemiş verilerden elde edilen 7 ve 28 günlük basınç dayanımı değişimine ait regresyon bağıntıları (hızlandırıcı yok).

• Konuya uygulama açısından bir açılım getirmek bakımından, Yapı Merkezi M.İnönü tüneline kalite kontrol amacı ile narinlik oranı  $1 \leq \lambda = \frac{h}{d} \leq 1.58$  arasında değişen oranlarda alınan karot numunelerin 15 cm lik küp eşdeğerleri cinsinden 7 günlük  $f_{7,b}$  ve 28 günlük  $f_{28,b}$  basınç dayanımları arasındaki regresyon ilişkisi

$$f_{28,b} = 1.365 f_{7,b} + 7.35 \quad [\text{kgf/cm}^2] \quad n=82, r=0.902, f_{7,b} / f_{28,b} = 0.723$$

$$150 \text{ kgf/cm}^2 < f_{7,b} < 260 \text{ kgf/cm}^2$$

$$225 \text{ kgf/cm}^2 < f_{28,b} < 400 \text{ kgf/cm}^2$$

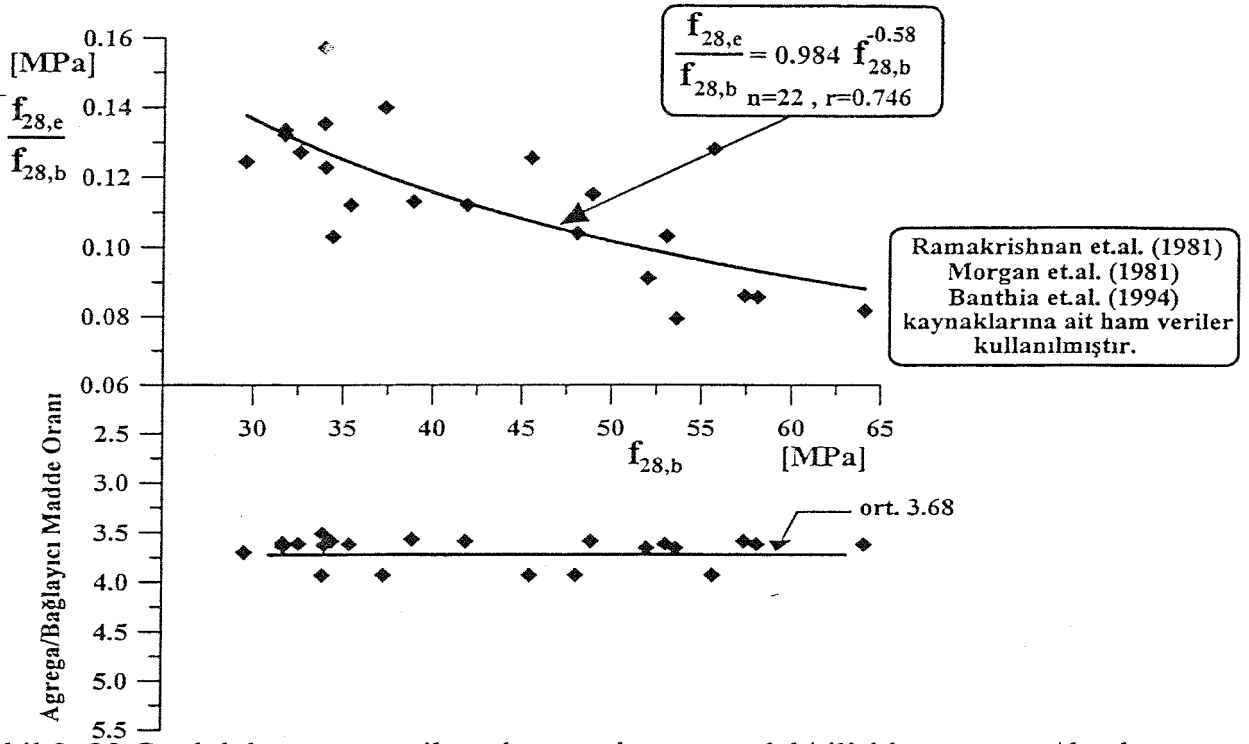
ifadesi ile tanımlanmıştır (Arıoğlu vd.,1993). Bu bağıntı Şekil 1 de verilen regresyon ilişkisi ile üst üste düşmektedir.  $f_{7,b} / f_{28,b} = 0.723$  (ortalama değer) olması nedeni ile de bu oran normal beton için yukarıda tanımlanmış aralığın içinde yer almaktadır. Ayrıca alınan karotların  $\lambda=2$  silindir eşdeğeri basınç dayanımları  $f_{28,\lambda=2}$  ile 15 cm lik küplerin 28 günlük dayanımları  $f_{28,b}$  arasında da bir regresyon ilişkisi elde edilmiştir.

$$f_{28,b} = -15.57 + 1.448 f_{28,\lambda=2} - 0.00042 f_{28,\lambda=2}^2 \quad [\text{kgf/cm}^2]$$

• 28 günlük basınç dayanımından yararlanarak 28 günlük eğilme dayanımına geçmek mümkündür.  $n=22$  adet deneyin ham verilerinden yararlanarak elde edilen regresyon ifadesine dayanarak korelasyon katsayısı  $r=0.746$  olan  $f_{28,b} - \frac{f_{28,e}}{f_{28,b}}$  eğrisi Şekil 2’de verilmiştir

(Girgin, Yüksel, Arıoğlu, 1998). Dikkat edilecek önemli bir nokta basınç ve eğilme dayanımının,

uygulamada 3.5-4 aralığına seçilen (ort.3.68) agrega/bağlayıcı madde oranından bağımsız olduğudur. Bu durum 28 günlük numunelerde de görülmektedir. Bu veriler de değişik oranlarda çelik lif ve silika fümre içermektedir.



ekil 2 28 Günlük basınç ve eğilme dayanımları arasındaki ilişki ve agrega / bağlayıcı madde oranının basınç dayanımına etkisi.

### 2.3 Çelik Lifli Püskürtme Beton Kaplamasının Lifsiz ve Tek Hasırlı Püskürtme Beton Kaplamasına Karşı Kaplama Kalınlığı Bazında Üstünlüğü

• Dramix marka çeşitli çelik lif tipleri için Vandewalle (1997, s-80) kaynağındaki işlenmemiş veriler kullanılarak,

$$R_e = A m_1^2 + B m_1 + C \quad (\text{Arıoğlu, Girgin, 1998})$$

regresyon bağıntısı elde edilmiştir (Çizelge-2).

$R_e$  = Tokluk faktörü

$m_1$  = Yerinde lif dozajı

A, B, C = Regresyon katsayıları

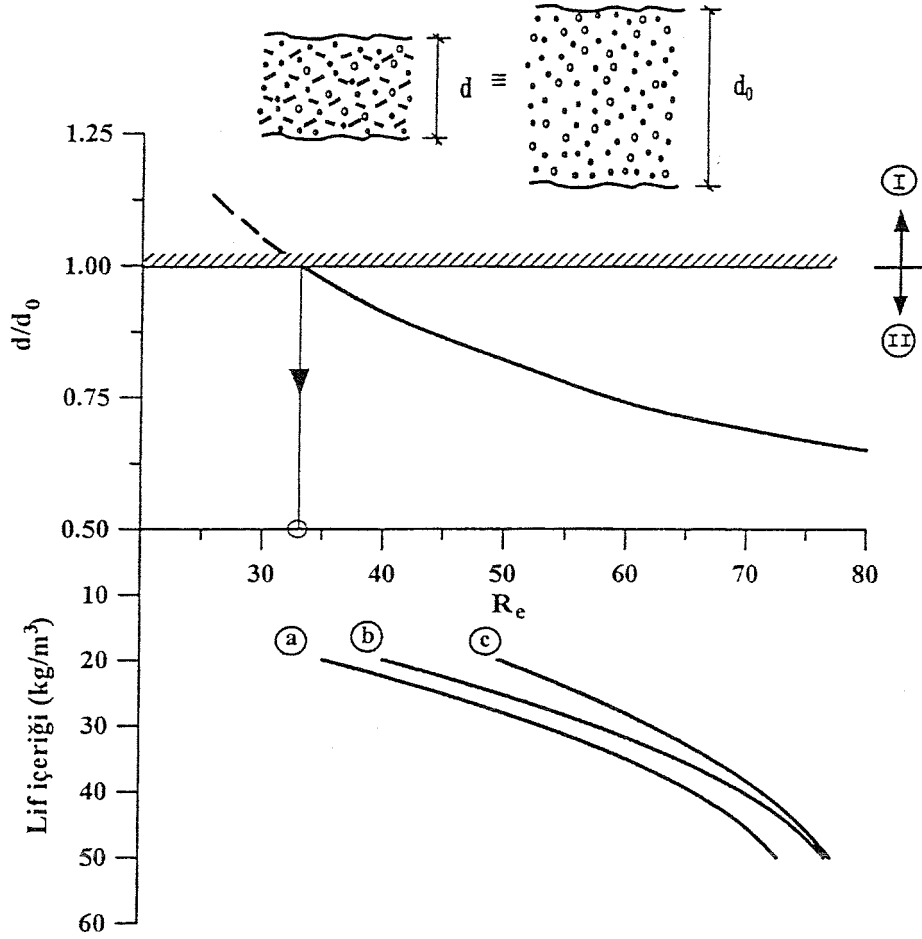
r = Korelasyon katsayısı

Çizelge 2 Dramix marka çelik liflere ait  $R_e=f(m_1)$  ifadeleri

Lif türü	A	B	C	r
RC 65/30	-0.0262	3.0548	-10.5	0.996
RC 65/35	-0.0167	2.0881	14.571	0.999
ZP 305	-0.0271	3.15	-17	0.998

### • Çelik Lifli ve Lifsiz Püskürtme Beton Kaplama Kalınlık Karşılaştırması

Çelik lifli ve lifsiz püskürtme beton kaplama kalınlıklarının oranı "d/d<sub>0</sub>" olmak üzere Çizelge 2' deki  $R_e = f(m_1)$  değişimleri Şekil 3'de gösterilmiştir (Püskürtme beton tabakasının düzleme dik doğrultudaki boyutu a=1000 mm alınmıştır). a indisi ZP 305, b indisi RC 65/30, c indisi RC 65/35 tipi çelik lif davranışını ifade etmektedir. I bölgesi lifsiz püskürtme beton kaplamanın ekonomik yarar sağladığı, II bölgesi ise lifli püskürtme beton kaplamanın ekonomik olduğu alanı göstermektedir (Arıoğlu, Girgin, 1998).



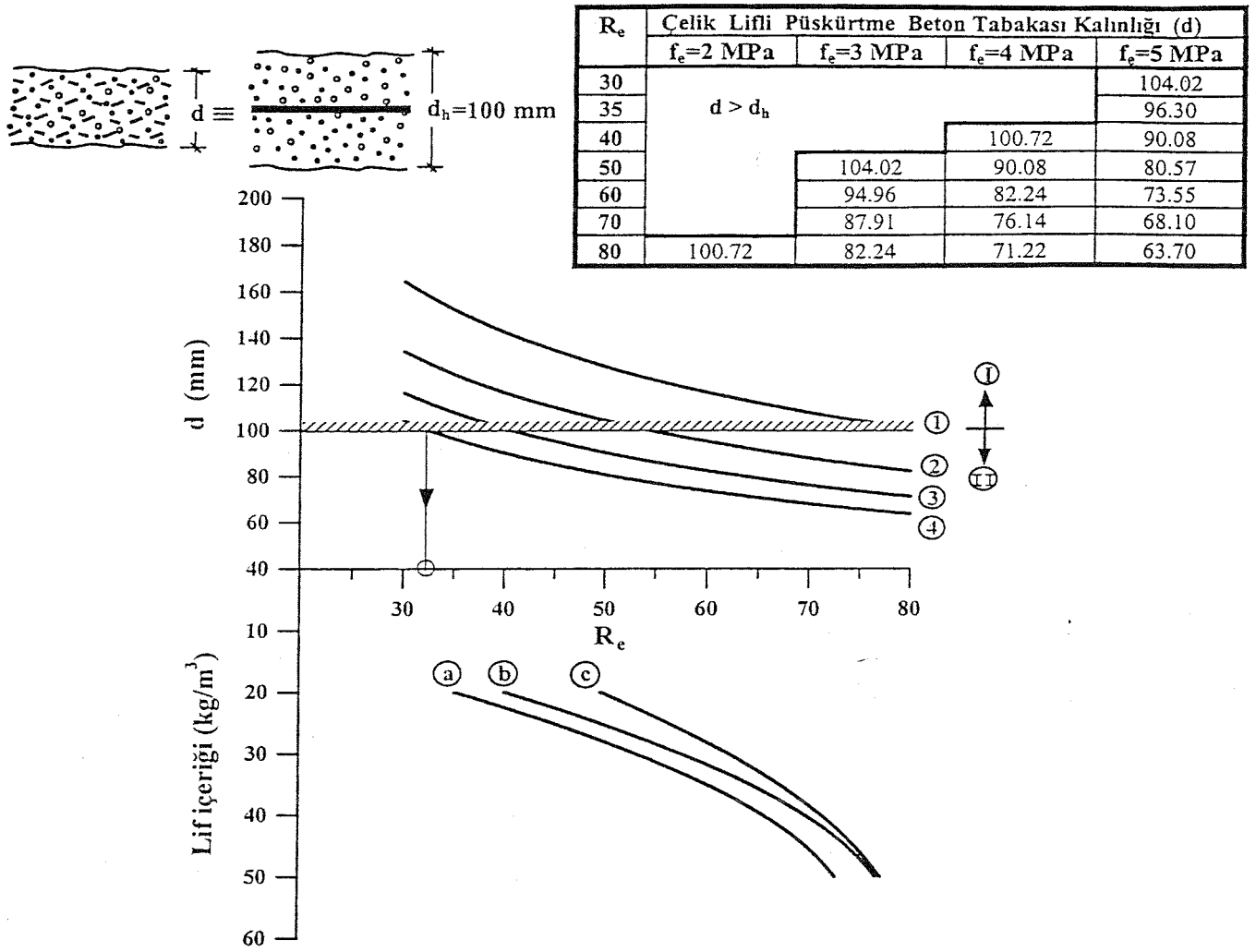
Şekil 3 Çelik lifli ve lifsiz püskürtme beton kaplama kalınlıklarının oranı ile tokluk faktörü “ $R_e$ ” ve çelik lif dozajı “ $m_l$ ” nın değişimi

Buradan şu pratik sonuçlar üretilebilmektedir :

- Tokluk faktörü “ $R_e$ ” yi denetleyen ana faktörler, lif içeriği “ $m_l$ ” ile lif uzunluğu / çapı “ $l_l / d_l$ ” oranıdır.
- Lifli-püskürtme beton kaplamasının “kalınlık” yönünden yarar sağlayan kritik bir tokluk değeri “ $R_e$ ” ve buna bağlı kritik bir lif içeriği “ $m_l$ ” mevcuttur. Buna göre,  $R_e \geq 35$  ve ZP305 çelik-lif için, kritik lif içeriği  $m_l = 20 \text{ kg/m}^3$  ( $\frac{20}{7800} \times 100 = 0.256\%$  hacimsel lif içeriği) olmaktadır. Artan “ $R_e$ ” değerlerinde kaplamanın kalınlığı “ $d$ ” önemli ölçüde azalmaktadır.

#### • Çelik Lifli ve Tek Hasırlı Püskürtme Beton Kaplama Kalınlık Karşılaştırması

Çelik lifli beton kaplaması ve tek hasır içeren püskürtme beton kaplamasının “kalınlık” açısından karşılaştırması Şekil 4 de görülmektedir (1 indisi ile  $f_e = 2 \text{ MPa}$ ,  $f_{b,k} = 11.2 \text{ MPa}$ , 2 indisi ile  $f_e = 3 \text{ MPa}$ ,  $f_{b,k} = 20.5 \text{ MPa}$ , 3 indisi ile  $f_e = 4 \text{ MPa}$ ,  $f_{b,k} = 31.6 \text{ MPa}$ , 4 indisi ile  $f_e = 5 \text{ MPa}$ ,  $f_{b,k} = 44.2 \text{ MPa}$  eğrileri gösterilmiştir). a,b,c indisleri Şekil 3 de belirtilen özelliklerin aynısıdır. I bölgesi çelik hasırlı püskürtme beton kaplamanın ekonomik yarar sağladığı, II bölgesi ise lifli püskürtme beton kaplamanın ekonomik olduğu alanı ifade etmektedir. Şekil 4 den açıkça görülmektedir ki çelik lifli püskürtme beton hassas bir biçimde tokluk faktörü “ $R_e$ ” ile kullanılan püskürtme betonun eğilme dayanımı “ $f_e$ ”nin bir fonksiyonudur. Artan  $R_e$  ve  $f_e$  değerlerinde lifli püskürtme beton kaplama kalınlığı belirgin ölçüde azalmaktadır (Arıoğlu, Girgin, 1998).



Şekil 4 Çelik lifli püskürtme beton kaplama kalınlığının tokluk faktörü “R<sub>e</sub>” ve çelik lif dozajı “m<sub>f</sub>” ye bağlı değişimleri.

#### 2.4 Kaya Patlamasına Maruz Masif-Gevrek Kaya Kütlelerinde Açılmış Tünellerde Stabilite Sayısı Belirlenmesi ve Kaplama Tasarımı

Yeraltı tünelleri ve maden ocaklarında stabilite indisi “S” terimi çeşitli araştırmacılar tarafından incelenmiştir (Zaslavskiy, 1972 ; Sikora,Kidybínski; Nakano, 1979; Aldorf, Exner,1986; Aydan et.al, 1993; Arnoğlu, 1995; Palmström, 1996; Arnoğlu, E.,Arnoğlu, B, Girgin, C, 1999)

• Stabilite sayısı S, kaya kütesinin yerinde basınç dayanımı  $\sigma_{y,b}$  ve tünel yüzeyindeki teğetsel gerilmeye  $\sigma_t$  bağlı olarak ifade edilir.

$$S = \frac{\sigma_{y,b}}{\sigma_t} = \frac{F_b \cdot \sigma_{lab,b}}{\sigma_t}$$

$\sigma_t$  için,

Tavanda  $\rightarrow \sigma_{t,t} = (A K - 1) \sigma_z$  (MPa)

Yan cephede  $\rightarrow \sigma_{t,d} = (B - K) \sigma_z$  (MPa)

A ve B tünel şekline bağlı sabit değerlerdir,

• Kemer kesit için A=3.2 , B= 2.3

• Atnalı kesit için A= 3.1 , B= 2.7

• Dairesel kesit için A= 3.0 , B= 3.0

• Kare kesit için A= 1.9 , B= 1.9

• Yerinde basınç dayanımı  $\sigma_{y,b}$ , boyut faktörü  $F_b$  ve laboratuvar basınç dayanımı  $\sigma_{lab,b}$  ' bağlı olarak (Arnoğlu,Girgin,1998) (Arnoğlu,E,Arnoğlu,B,Girgin,1999),

$$\sigma_{y,b} = F_b \cdot \sigma_{lab,b} = \left(\frac{d_{lab}}{d_y}\right)^{0.2} \cdot \sigma_{lab,b} = \left(\frac{d_{lab}}{D_e}\right) \cdot \sigma_{lab,b} = \left(\frac{0.05}{D_e}\right)^{0.2} \cdot \sigma_{lab,b} = 0.758 \underbrace{D_e^{-0.2}}_{0.65} \cdot \sigma_{lab,b} \cong 0.5 \sigma_{lab,b}$$

- $K = \frac{\sigma_y}{\sigma_z}$  oranı Sheorey (1994) bağıntısından,

$$K = 0.25 + 7 E_h \left( 0.001 + \frac{1}{H} \right)$$

Prekambrian ve Paleozoik dönem masif-gevrek kaya kütlelerinde açılan tünellerde pratik olarak,  
 $K = 5.13 H^{-0.16}$

bağıntısı kullanılabilir ( $E_h = 100$  GPa).

- $\sigma_z \cong 0.027 H$

- Stabilite indisi S (Arioğlu, E., Arioğlu, B., Girgin, C., 1999) (Arioğlu, E., Arioğlu, B., Girgin, C., 1999)

$$\text{Tavan için } S = \frac{F_b \cdot \sigma_{lab,b}}{(A \cdot K - 1) \sigma_z} = 18.5 \frac{\sigma_{lab,b}}{(A \cdot K - 1) \times H}$$

$$\text{Yan cidar için } S = \frac{F_b \cdot \sigma_{lab,b}}{(B - K) \sigma_z} = 18.5 \frac{\sigma_{lab,b}}{(B - K) \times H}$$

$\sigma_{t,t}$  ve  $\sigma_{t,d}$  den hangisi daha büyükse ona ait stabilite indisi kullanılır.

Palmström (1996) kaynağına göre,

Stabilite sayısı "S"	Gözlenen Olası Kırılma Modları
> 2.5	Herhangi bir stabilite sorunu söz konusu değil
2.5-1	Yüksek gerilme mevcut-hafif gevşeme var
1-0.5	Hafif kaya patlama veya yan cidarlarda plaka halinde belirgin kırılmalar
< 0.5	Ciddi-ağır kaya patlaması söz konusu

Bu bölümde ve Çizelge 3'de verilen bağıntılarda kullanılan notasyonların anlamları aşağıda topluca verilmiştir.

$\sigma_{lab,b}$  = Laboratuvar basınç dayanımı (MPa)

$d_{lab}$  = Laboratuvar numunesinin çapı ( $d_{lab} = 0.05$  m)

$d_y$  = Blok çapı (m)

$D_e$  = Eşdeğer tünel kazı çapı (m),  $D_e = 6-16$  m için ort.  $D_e^{-0.2} = 0.65$  alınabilir.

CF = Süreklilik faktörü, masif kaya kütlelerinde  $CF \leq 5$

H = Tünel derinliği (m)

$\sigma_z$  = Düşey derinlik basıncı (MPa)

$\sigma_y$  = Yatay derinlik basıncı (MPa)

$$P_t = \text{İksa sistemine etkileyen kaya basıncı}, P_t = \frac{2 Q^{-0.333} J_n^{0.5}}{30 J_r} \quad (\text{Grimstad, Barton, 1994})$$

$$Q = \text{Kalite faktörü}, Q = \frac{RQD J_r J_w}{J_n J_a SRF} \quad (\text{Barton, Lien ve Lunde, 1974})$$

SRF = Gerilme azaltım faktörü ( $SRF = 50-200 \rightarrow$  Hafif kaya patlaması, cidarda plakalanma)  
 ( $SRF = 200-400 \rightarrow$  Ağır kaya patlaması)

RQD = Kaya kalite derecesi, %

$J_n$  = Çatlak sistemi ile ilintili sayı, masif-gevrek kayada:  $J_n = 0.5-6$

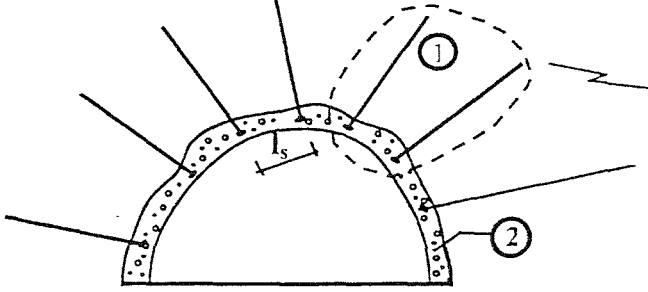
$J_r$  = Çatlak pürüzlülük sayısı, masif-gevrek kayada:  $J_r = 1.5$  (Pürüzlü)

$J_a$  = Çatlak ayrışma sayısı , masif-gevrek kayada :  $J_a = 1$  (Ayrışma yok)

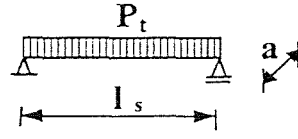
$J_w$  = Çatlak su azaltım sayısı , masif-gevrek kayada :  $J_w = 1$  (Kuru-su geliri yok)

## 2.4.1 Çelik lifli püskürtme beton kaplama tasarımı (Arioğlu, E, Arioğlu, B, Girgin, C, 1999)

Masif-gevrek kayalarda açılacak bir tünel için tipik bir çelik lifli püskürtme beton kaplama tasarımı Çizelge 3 de örneklenmiştir. Şematik tünel kesit görünümü, kaplamaya gelen yükler, kaya saplamaları ve aralıkları aşağıda gösterilmiştir.



Statik model



① Kaya saplamaları

② Çelik lifli püskürtme beton kaplama

- Kaya saplamaları ile basit mesnetlenmiş bir kaplamada oluşan maks. eğilme momenti  $M_{maks.}$  :

$$M_{maks.} = 0.125 P_t \cdot a \cdot l_s^2 \quad , \quad (Nmm/mm)$$

$$\sigma_{maks.} = M_{maks.}/W = 0.75 \frac{P_t \cdot l_s^2}{t^2} \leq f_e \quad (MPa)$$

- Çatlak sonrası ort.dayanım veya eşdeğer eğilme dayanımı  $f_e$ ,

$$f_e = \frac{R_e}{100} f_0 \quad , \quad f_0 = 0.4 f_{28,b}^{0.666} \quad (MPa) \quad , \quad (Vandewalle, 1997)$$

- Kaplama kalınlığı  $t \geq 13.7 l_s \left( \frac{P_t}{R_e \cdot f_{28,b}^{0.666}} \right)^{0.5}$

olarak ifade edilir.

- Saplama aralığı  $l_s$  ,

$$l_s = \frac{1}{(-0.227 \ln Q + 0.839)^{0.5}} \quad (Chouquet, Charette, 1988) \quad , \quad (l_s \times l_s \text{ için})$$

bağıntısı ile tanımlanır.

Çizelge 3 de analitik olarak bulunan kaplama kalınlığı Grimstad, Barton (1994) kaynağında rapor edilen  $Q$ - $t$ - $ESR$  değişim nomogramı (Şekil 5)'na göre tahkik edilirse ,

- $Q$  faktörü  $Q = 0.32$  olarak elde edilmiştir.

Tünelin göreceği fonksiyon ile ilintili sayısal faktör  $ESR$  ,

$ESR = 1.0$  (Uzun süreli kullanılacak tünellerde) alınırsa,

Tünel açıklığı  $L = 5$  m

Açıklık /  $ESR = 5.0/1.0 = 5$

alınırsa sözkonusu nomogramdan,

o Kaya sınıflandırması : E sınıfı

o Çelik lifli püskürtme beton kaplama kalınlığı :  $t \sim 10$  cm

o Saplama aralığı  $l_s = 1.4$  m

olarak tahmin edilir. Analitik yoldan bulunan  $t = 15.5$  cm ve  $l_s = 1$  m değerlerinin bu değerlere göre daha emniyetli tarafta kaldığı görülmektedir.

- Uygulamada, kaplama tasarım mühendisi kaya kütlelerinin gerçek jeomekanik büyüklüklerini (yerinde  $RQD$  değerleri, düzeltilmiş  $Q$  değerleri, konverjans hızı) dikkate alarak teorik tasarım büyüklüklerini yeniden gözden geçirmek sureti ile daha ekonomik ve emniyetli kaplama tasarım düzenlemesine gitmelidir.



## Çizelge 3 Kaya Patlamalarına Maruz Çelik Lifli Püskürtme Beton Kaplamalarının Tasarım Örneklemesi

## Giriş verileri :

- Kaya cinsi : Gneiss, masif, çatlaksız
- Kaya tabakasının lab.basınç dayanımı  $\sigma_{lab,b} = 130$  MPa
- Kaya kalite derecesi RQD = % 80
- Tünel tipi : Atnalı ( A= 3.1 , B= 2.7 )
- Tünel derinliği H = 850 m
- 28 günlük püskürtme beton basınç dayanımı  $f_{28,b} = 40$  MPa (küp)
- Çelik lif : Tipi RC 65/35 , yerinde lif dozajı  $40 \text{ kg/m}^3$

$$K = \frac{\sigma_y}{\sigma_z} = 5.13 H^{-0.16} = 5.13 (850)^{-0.16} = 1.74 \text{ m}$$

$$\text{Masif kayaçlar için kayacın yerinde dayanımı } \sigma_{y,b} \cong 0.5 \sigma_{lab,b} = 0.5 \times 130 = 65 \text{ MPa}$$

$$\text{Stabilite sayısı } S = \frac{\sigma_{y,b}}{\sigma_t} \quad (\text{tavanda } \sigma_{t,t} = (A K - 1) \sigma_z, \text{ yan cephede } \sigma_{t,d} = (B - K) \sigma_z)$$

$$\sigma_{t,t} > \sigma_{t,d} \rightarrow S = \frac{F_b \sigma_{lab,b}}{(A K - 1) \sigma_z} \cong 18.5 \frac{\sigma_{lab,b}}{(A K - 1) H} \quad (F_b \cong 0.5, \sigma_z \cong 0.027 H)$$

$$S = 18.5 \frac{130}{(3.1 \times 1.74 - 1) \times 850} = 0.64 < 1 \rightarrow \text{Hafif kaya patlaması ve kaya dökülmesi}$$

$$\text{Gerilme azaltım faktörü SRF} = 125 \text{ olarak tahmin edilir.}$$

$$\text{İksa kaya basıncı } P_t = \frac{2 Q^{-0.333} J_n^{0.5}}{30 J_r} = 0.0217 (SRF)^{0.333} = 0.0217 (125)^{0.333} = 0.108 \text{ MPa}$$

$$\text{Kalite indisi } Q = \frac{RQD J_r J_w}{J_n J_a SRF} = \frac{80}{3} \times \frac{1.5}{1} \times \frac{1}{125} = 0.32, \quad (J_n = 3, J_r = 1.5, J_a = 1, J_w = 1)$$

$$\text{Lifsiz püskürtme beton tabakası eğilme dayanımı } f_0 = 0.4 f_{28,b}^{0.66} = 0.4 \times (40)^{0.66} = 4.66 \text{ MPa}$$

$$\text{Tokluk faktörü } (R_e) \text{ lif tipine ve yerindeki lif dozajına göre tanımlanır.}$$

$$\text{Dramix } \textcircled{R} \text{ föyüne göre RC 65/35 ve yerinde lif dozajı } 40 \text{ kg/m}^3 \text{ için } \rightarrow R_e = 72$$

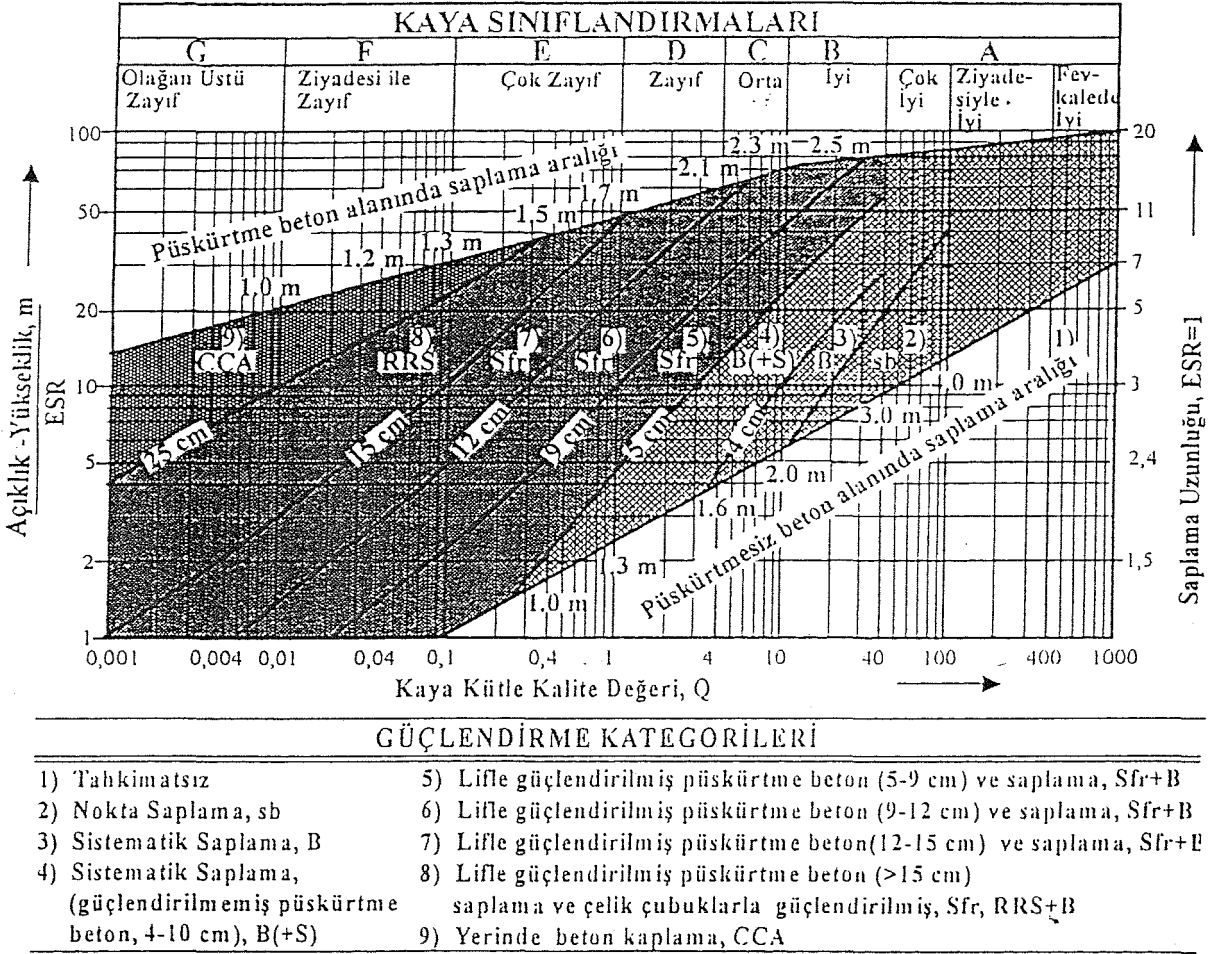
$$\text{Çatlak sonrası ortalama dayanım (eşdeğer eğilme dayanımı) :}$$

$$f_e = \frac{R_e}{100} f_0 = \frac{72}{100} \times 4.66 = 3.35 \text{ MPa}$$

$$\text{Saplama aralığı } l_s \times l_s \text{ için, } l_s = \frac{1}{(-0.227 \ln Q + 0.839)^{0.5}} = \frac{1}{(-0.227 \times \ln 0.32 + 0.839)^{0.5}} \cong 1.0 \text{ m}$$

$$\text{Püskürtme beton tabaka kalınlığı } t,$$

$$t \geq 13.7 l_s \left( \frac{P_t}{R_e \cdot f_{28,b}^{0.666}} \right)^{0.5} = 13.7 \times 1000 \left( \frac{0.108}{72 \times 40^{0.666}} \right)^{0.5} = 155 \text{ mm}$$



Şekil 5 Q- Açıklık/ESR diyagramına göre kaya sınıflandırması ve yeraltı mühendislik yapılarında iksa sistemlerinin seçimi (Grimstad, Barton, 1994)

## 2.5 Çelik Lifli Püskürtme Beton Karışım Tasarımı Örnekleme

Bazı tünel projelerindeki çelik lifli püskürtme beton tasarım büyüklüklerine ait (3<sup>rd</sup> Int. Symp. on Sprayed Concrete, 1999) kaynağındaki ham veriler bu çalışmada ayrıntılı olarak değerlendirilmiş, hesaplanan karakteristik büyüklükler ham verilerle birlikte toplu halde Çizelge 4'de verilmiştir. Buradan çıkartılacak belli başlı sonuçlar şöyle özetlenebilir :

- Çimento miktarı kaliteli agregaya kullanılmak koşulu ile 400-480 kg/m<sup>3</sup> düzeyinde tutulmaktadır.
- Kullanılan silika füme miktarı genellikle çimentonun ağırlıkça ~ % 10'u düzeyindedir.
- Su / (çimento+silika füme) oranı genellikle 0.38-0.49 düzeyinde seçilmektedir.
- Toplam agregaya / (çimento+silika füme) oranı agregaya kalitesi iyi ise 3.3-4.1 mertebesindedir.
- İri agregaya /toplam agregaya oranı genellikle 0.30-0.45 seçilmektedir.
- Maks. agregaya boyutu 8-12.7 mm olarak seçilmektedir.
- Çelik lif yüzdesinin 0.65-0.8 mertebesinde seçilmesi genellikle yeterli olmaktadır.
- Priz hızlandırıcı erken dayanım gereksinimine göre % 1.8-5 arasında değişen oranlarda seçilmektedir.

## 2.6 Tünelde Çelik Lifli Püskürtme Beton Uygulaması Kalite Kontrol Esasları

Norwegian Concrete Association,1993'e göre kontrol- sorumluluk-tasdik paylaşımı Çizelge 5 'de verilmiştir (Arıoğlu, Yüksel, 1999). Çizelge 6'da ise AFTES,1994'e göre püskürtme betonda kalite kontrolünde yapılan testler, süre ve sıklıkları verilmiştir (Arıoğlu, Yüksel, 1999).

Çizelge 4 Çeşitli Tünel Projelerindeki Tasarım Büyüklüklerine Ait Ham Verilerin Toplu Halde Değerlendirilmesi

Tasarım büyüklükleri	Lang tan tüneli	Hsin Nan tüneli	Mingtan yeraltı nükleer santrali	Güney Afrika altın galerisi	Costa Rica tüneli	Khimti erişim tüneli	Bielfeld tüneli
Geçilen formasyon	Gevşek kum taşı, çamur taşı	Çoğunlukla kaya yer yer alüvyon	Kum taşı, silt, killi şist	Kuarsit			
Kaplama kalınlığı	25-30 cm	8-16 cm	15-20 cm		> 30 cm		
$f_b$ [MPa]	$f_{b,7s}=47.9$	$f_{b,28s}=29.4$	$f_{b,7k}=34.9$		$(f_{b,28})_{min.}=40$		
$f_c$ [MPa]	$f_{c,7s}=7.5$	$f_{c,28s}=6.56$	$f_{c,7k}=6.5$				
$f_c / f_b$	0.15	0.22	0.19				
Yöntem	Yaş	Yaş	Yaş	Yaş	Yaş	Kuru	Yaş
Çimento ( $M_c$ )	440*	400	450	480	540	500	380
Su ( $M_{su}$ )	207	216	198	207	280	210	208
Silika füme ( $M_{sf}$ ), sf %	40 , % 9	40 , % 10	45 , % 10	48 , % 10	60 , % 11	50 , % 10	20 , % 5
$\alpha = M_{su} / (M_c + M_{sf})$	0.43	0.49	0.4	0.39	0.47	0.38	0.52
Kaba agrega ( $M_{ka}$ ), $d_{maks.}$	566 , 12.7 mm	757 , 12.7 mm	497 , 12.7 mm	1525 , 8 mm	1467 , 8 mm	386 , 8 mm	-
İnce agrega ( $M_{ia}$ )	1031	935	1159		agrega kalitesi iyi değil	1158- agrega ve kum kalitesi iyi değil	909 (0-2 mm) 745 (2-8 mm)
$\beta = \Sigma M_a / (M_c + M_{sf})$	3.33	3.84	3.34	2.89	2.44	2.81	4.13
$M_{ka} / \Sigma M_a$	0.35	0.45				0.25	
Çelik lif ( $M_l$ ), $V_l$ %	55 , % 0.7 (kancalı 30/0.5)	60 , % 0.77 (kancalı 30/0.5)	60 , % 0.77 (kancalı 30/0.5)	40 , % 0.51	60 , % 0.77	50 kg , % 0.64 (kancalı)	70 , % 0.9
Priz hızlan. ( $M_h$ ), h %	8.8-sıvı, % 1.83	15.4-toz, % 3.5	22.5-sıvı, % 4.5	< 24 , % 5	135 , % 22.5	15-25 , % 2.7-4.5	19 , % 4.7
Akışkanl. ( $M_{ak}$ ), ak %	6.6 , % 1.37	1.76 , % 0.4	9 , % 1.8	5.5 , % 1.0	9 , % 1.5	10 , % 1.8	4.6 , % 1.1
Çökme	8 cm	15±2 cm	6-8 cm				

\* Bütün ağırlıklar  $kg/m^3$  birimindedir

$V_l$  = Hacimce çelik lif yüzdesi

sf % = Çimentonun ağırlıkça yüzdesi olarak silika füme

h % = Priz hızlandırıcı → (Çimento+sf)nin ağırlıkça yüzdesi , ak % = Akışkanlaştırıcı → (Çimento+sf) nin ağırlıkça yüzdesi

Çizelge 5 Kontrol- sorumluluk-tasdik çizelgesi (Norwegian Concrete Association,1993)

Kontrol tipi	Kontrol edilen	Yapılacak Onaylama	Sorumlu	Kontrol Sıklığı	Tasdik	Belgeleme
Betonun üretim kontrolü	Agrega	• Nem,dane boyutu,vb.	Betonu temin eden firma	Her değişim	Mikser operatörü	Fabrika üretim raporu
	Taze beton	• Karışım bileşenleri ve oranlarının uygunluğu		Her karışım		
	Taze beton	• Çökme değeri		Her karışım		
	Taze beton	• Sıcaklık		Her karışım		
Püskürtmeden önce malzeme kontrolü	Taze beton	• Sıcaklık	Müteahhit Firma (operatör)	100 m <sup>3</sup> de bir*	Ustabaşı, Operatör	Uygulama raporu
	Taze beton	• Çökme değeri			Ustabaşı, Operatör	Uygulama raporu
	Taze beton	• 7 ve 28 günlük basınç dayanımı ve yoğunluk			Proje müdürü (müteahhit firma)	Laboratuvar raporu Fabrika üretim raporu
Uygulama Kontrolü	Priz hızlandırıcı	• Tüketim (m <sup>3</sup> )	Müteahhit Firma (operatör)	Her değişim	Proje müdürü (müteahhit firma)	Uygulama raporu
	Katkılar	• Tipi ve miktarı				
	Kür malz.	• Tüketim (m <sup>2</sup> )				
	Uygulanmış beton tabakası	• Kütle oranı				
Püskürtmeden sonraki kontrol	Yüzeiden karotla alınmış numune	• Basınç dayanımı, 28 gün**	Müteahhit Firma	250 m <sup>3</sup> de bir	Proje müdürü (müteahhit firma)	Laboratuvar raporu
	Yüzeiden alınmış numune	• Lif içeriği***				Laboratuvar raporu
	Püskürtme beton	• Aderans (vurma ile)				Üretim kontrolü
	Püskürtme beton	• Kalınlık				Üretim kontrolü
Miktar kontrolü	Püskürtme beton	• Geri sıçrama	Müteahhit Firma	İşverenin isteğine bağlı	Proje müdürü (müteahhit firma)	Üretim kontrolü

\* Numunelerin yarısı mikserde üretilebilir.

\*\*Püskürtme işlemi başladıktan sonra üç bağımsız deney icra edilir.

\*\*\* Duvardan karotla numune almak yerine taze betondan bir parça kopararak de bu test yapılabilir.

Çizelge 6 Püskürtme Betonda Kalite Kontrol İçin Uygulanan Testler AFTES,1994

Uygulanan Testler	Uygulama süresi ve sayısı	Test sıklığı	
Beton bileşimi	1	$Q^* < 100 \text{ m}^3/\text{hafta}$ ise her $100 \text{ m}^3$ de bir	$Q > 100 \text{ m}^3/\text{hafta}$ ise haftada bir kez
Lif miktarı	1	$Q < 20 \text{ m}^3/\text{gün}$ ise her $20 \text{ m}^3$ de bir	$Q > 20 \text{ m}^3/\text{gün}$ ise her gün
Basınç	3-7 gün 3-28 gün	Her $50 \text{ m}^3$ de bir	
Direkt çekme	3-28 gün	Her $1000 \text{ m}^3$ de bir	
Yoğunluk	Bütün karotlarda		
Zımbalama-Eğilme	1-28 gün	$Q < 100 \text{ m}^3/\text{hafta}$ ise her $100 \text{ m}^3$ de bir	$Q > 100 \text{ m}^3/\text{hafta}$ ise haftada bir kez
Aderans	3-28 gün	Her $1000 \text{ m}^2$ de bir + her çatlaklı bölge-noktada+ min.her $5 \text{ m}^2$ de bir çubukla vurularak kontrol edilir	
Homojenlik ve süreklilik	Bütün karotlarda		
• Gözle inceleme • Sertlik ölçer • Ses dalgaları ile inceleme	Bu iki test, yukarıdaki testlerin sonuçları bir sorun olduğunu gösterdiğinde uygulanır		

\*Q – Üretilen püskürtme beton miktarı

### SONUÇLAR

Bu çalışmada incelenen konulardan çıkartılan başlıca sonuçlar aşağıda özetlenmiştir:

- Kuru yöntem ile üretilen püskürtme betonda hızlandırıcı kullanılmamış 7 ve 28 günlük basınç dayanımları arasında anlamlı bir korelasyon elde edilmiştir. Bu ilişki değişik oranlarda silika fume, çelik lif kullanımı için de sağlanmaktadır, bağıntı operatör eğitim dataları için de aynen geçerlidir. 7-7/28 oran basınç dayanımları arasında doğrusal bir regresyon ilişkisi mevcuttur (Şekil 1). Yapı Merkezi M.İnönü tünelineki 7-28 günlük basınç dayanımı ilişkisi de bu bağıntıyı desteklemektedir.
- Liflerle güçlendirilmiş kaplama boyutlandırmasında önemli bir büyüklük olan 28 günlük eğilme / basınç dayanımı oranının 28 günlük basınç dayanımı cinsinden değişimi çıkartılmıştır, artan 28 günlük basınç dayanımı ile söz konusu oran düşmektedir. Bu bağıntı değişen oranlarda çelik lif ve silika fumenin kullanıldığı dataları da içermesi bakımında anlamlıdır, 28 günlük basınç dayanımının bilinmesi durumunda eğilme büyüklüğünün mertebesi kestirilebilir (Şekil 2). Ayrıca karışım tasarımında dikkate alınan diğer bir büyüklük olan Agregat/Bağlayıcı madde oranının 28 günlük basınç dayanımından bağımsız olduğu gözlenmektedir.
- Çelik lifli püskürtme beton kaplaması, kırılma sonrası enerji yutma kapasitesinin yüksek olması nedeni ile özellikle ani ve tahripkar deformasyon modunun önem kazandığı (örneğin, kaya patlama olayı) liffsiz-hasırlı püskürtme beton kaplamalarına kıyasla belirgin bir üstünlük sağlar. Aynı eğilme momenti etkisinde çelik lifli beton kaplaması, artan lif içeriği ile birlikte artan tokluk faktörüne bağlı olarak liffsiz-hasırlı püskürtme beton kaplamalarına kıyasla "kalınlık" bakımından ekonomi sağlamaktadır (Şekil 3, 4).
- Kaya patlamalarına maruz tünellerde çelik lifli püskürtme betonun tasarım metodolojisi bir sayısal örnek ile belirtilmiştir (Çizelge 3).

### TEŞEKKÜR

Yazarlar çalışmanın yapılmasında gösterdiği ilgi ve akademik destek için Yapı Merkezi Holding A.Ş Yönetim Kurulu Başkanı Sn.Dr. Ersin ARIOĞLU'na teşekkür ederler. Burada ileri sürülen görüş ve değerlendirmeler doğrudan doğruya yazarlara aittir, ilgili kuruluşları bağlamaz.

## KAYNAKLAR

- Aftes-Working group No6-Sprayed Concrete (1994) Recommendations on Fibre-Reinforced Sprayed Concrete Technology and Practice, No126, pp.318-325.
- Aldorf, J., Exner, K. Mine Openings: Stability and Support, Elsevier, Amsterdam, 1986.
- Arıoğlu, Ergin, Yüksel, A. (1985) Püskürtme Beton Karışım Tasarımı. Kaya Mekaniği Bülteni, Sayı 1, Türkiye Ulusal Kaya Mekaniği Derneği, s. 29-38.
- Arıoğlu, Ergin, Yüksel, A. (1986) Mix Design of Shotcrete For Underground Structural Support, Journal of Mines, Metals & Fuels, January-February, pp.84-87.
- Arıoğlu, Ergin, Odbay, O., Alper, H., (1993) Mevhibe İnönü Tünel Şantiyesinde Püskürtme Beton Dayanımlarının Değerlendirilmesi, Yapı Merkezi AR-GE Arşivi.
- Arıoğlu, Ergin, Alper, H., Odbay, O. (1994) Beton Dayanımının Erken Kestirimi. Beton Prefabrikasyon, sayı 30, s. 15-18.
- Arıoğlu, Ergin, Girgin C. (1998) Çelik Lifli Püskürtme Beton Kaplama Tasarımı-Kaya Patlama Olayına Maruz Tünelde Kullanım 4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyum, Zonguldak.
- Arıoğlu, Ergin, Yüksel A., (1999) Tünel ve Yeraltı Mühendislik Yapılarında Çözümlü Püskürtme Beton Problemleri, TMMOB Maden Mühendisleri Odası İstanbul Şubesi Yayını, İstanbul, 178s.
- Arıoğlu, Ergin, Arıoğlu, B., Girgin C., (1999) Stability Evaluation and Design of Tunnel Openings in Brittle-Massive Rock Masses. 3rd Int. Symp. on Sprayed Concrete, 26-29 September, Norway, pp.28-38.
- Arıoğlu, Ergin, Arıoğlu, B., Girgin C. (1999) Masif-Kırılgan Kaya Kütlelerinde Açılan Tünelde Stabilitate Sorunları, 10. Yılında erguvanlı'yı Anma Kollokyumu, İTÜ Maden Fak.
- Aydan, Ö., Akagi, T., Kawamoto, T (1993) The Squeezing Potential of Rocks Around Tunnels; Theory and Prediction, Rock Mech. Rock Engrn. 26.
- Barton, N., Lien, R., Lunde, J. (1974) Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Rock Support, Rock Mechanics, 6 pp. 189-236.
- Chan, Banthia (1998) Recycled Aggregate Utilization in Shotcrete.
- Choquet, P., Charette, F. (1988) Applicability of Rock Mass Classifications in the Design of Rock Support in Mines. Proc. 15th Int. Can. Symp. Rock Mech., Toronto, pp. 39-48.
- Gebler, S., Litvin, A., McLean, W., Schultz, R. (1992) Durability of Dry Mix Shotcrete Containing Rapid-Set Accelerators, ACI Materials Journal, Vol. 89, No. 3.
- Girgin C., Yüksel, A. Arıoğlu E. (1998) Tünelde Püskürtme Betonun Mekanik Büyüklükleri-Kalite Kontrol İlkeleri. 4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, Zonguldak.
- Grimstad, E. Barton, N. (1994) Updating the Q-system for NMT. Proc. 11th Int. Symp. on Sprayed Concrete, Norway Norwegian Concrete Association, Fagernes, Norway.
- Glassgold, L. (1989) Shotcrete Durability: An Evaluation, Concrete International, August, pp. 78-85.
- Morgan D.R., (1981) Steel Fibre Shotcrete. A Laboratory Study, Application and Use of Shotcrete, ACI Compilation No6, pp. 50-54.
- Nakano, R (1979) Geotechnical Properties of Mudstone of Neogene Tertiary in Japan International Symposium Soil Mechanics Proceedings, Oaxaca.
- Neville A.M. (1995) Properties of Concrete, Longman Gr. Ltd.
- Norwegian Concrete Association-Committee Sprayed Concrete (1993) Sprayed Concrete for Rock Support- Technical Specification and Guidelines, No 7, Oslo, Norway.
- Palmström, A. (1995) Characterizing Rock Burst and Squeezing by Rock Mass Index, Design and Construction of Underground Structures, New Delhi, February, pp. 1-10.
- Palmström, A. (1996) Characterizing Rock Masses by the RMI for Use in Practical Rock Engineering, Part 2: Some Practical Applications of the Rock Mass Index (RMI) Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 11, No.3, pp. 287-303.
- Prudencio, Jr., Armelin, H., Helene, P. (1996) Interaction Between Accelerating Admixtures and Portland Cement for Shotcrete. Journal of American Concrete Institute, Vol 93, No 6, pp. 619-629.
- Ramakrishnan, V., Coyle, V., Dahl, L., Schrader E. (1981) A Comparative Evaluation of Fiber Shotcretes. A Laboratory Study, Application and Use of Shotcrete, ACI Compilation No6. pp.39-49.
- Sikora W, Kidbybinski, A Rock Stability Evaluation For Proper Choice of Roadway Supports, Central Mining Institute, Katowice, Poland.
- Sheorey, P.R (1994), A Theory for In Situ Stresses in Isotropic and Transversely Isotropic Rock, Int. J. Rock Mech. Min. Sci & Geomech. Abstr. 31 (1).
- Third Int. Symp. on Sprayed Concrete (1999) Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support, Norway.
- Valencia F.E (1976) Evaluation of Shotcrete Application Under Field Conditions. ACI Publications SP-54, pp.115-149.
- Vandewalle, M. (1997) DRA-MIX Tunneling the World, N.V. Beekaert S.A.
- Zaslavskiy, Y.Z (1972) Some Aspects of Support of Deep Permanent Workings, 5th, Int. Strata Control Conference, 12, London.■