



İSTANBUL MEDENİYET ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK YÖNETİMİ ANABİLİM DALI
MÜHENDİSLİK YÖNETİMİ BİLİM DALI

METRO PROJELERİNDEKİ TÜNELLERDE İKİNCİ KAPLAMA BETONU OLARAK DONATILI PÜSKÜRTME BETON KULLANIMININ PROJE MALİYETİNE VE SÜRESİNE ETKİLERİNİN ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İdris ARAZ

Tez Danışmanı:
Dr. Öğr. Üyesi Mücahit NAMLI

Ocak-2019

ONAY

İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrencisi olan İdris ARAZ'ın hazırladığı ve jüri önünde savunduğu “Metro projelerindeki tünellerde ikinci kaplama betonu olarak donatılı püskürtme beton kullanımının proje maliyetine ve süresine etkisinin analizi” başlıklı tez başarılı kabul edilmiştir.

JÜRI ÜYELERİ

İMZA

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Mücahit NAMLI
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

.....

Üyeler:

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Selim GÜÇLÜ
İstanbul Medeniyet Üniversitesi

.....

Dr. Öğr. Üyesi Hakkı Oral ÖZHAN
İstanbul Altınbaş Üniversitesi

.....

Tez Savunma Tarihi: 2 Ocak 2019

ETİK İLKELERE UYGUNLUK BEYANI

İstanbul Medeniyet Üniversitesi Fen Bilimler Enstitüsü bünyesinde hazırladığım bu Yüksek Lisans tezinin bizzat tarafımdan yapılan bir çalışma olduğunu ve bu tezde;

- 1- Çeşitli yazarların çalışmalarından faydalandığımda bu çalışmaların ilgili bölümlerini doğru ve net biçimde göstererek yazarlara açık biçimde atıfta bulunduğumu;
- 2- Yazdığım metinlerin tamamı ya da sadece bir kısmı, daha önce herhangi bir yerde yayımlanmışsa bunu da açıkça ifade ederek gösterdiğimi;
- 3- Alıntılanan başkalarına ait tüm verileri (Çizelge, grafik, şekil vb. de dâhil olmak üzere) atıflarla belirttiğimi;
- 4- Başka yazarların kendi kelimeleriyle alıntıladığım metinlerini kaynak göstererek atıfta bulunduğum gibi, yine başka yazarlara ait olup fakat kendi sözcüklerimle ifade ettiğim hususları da istisnasız olarak kaynak göstererek belirttiğimi,

beyan ve bu etik ilkeleri ihlal etmiş olmam halinde bütün sonuçlarına katlanacağımı kabul ederim.

İdris ARAZ

ÖNSÖZ

2017 yılında yüksek lisans eğitimine başladığım bu maratonun sonuna gelmiş bulunmaktayım. İstanbul Medeniyet Üniversitesi çatısı altında geçirdiğim zaman içerisinde, teknik ve meslek ahlakı konularında üstün bilgilerini benden esirgemeyen bütün hocalarıma ve bilhassa saygıdeğer hocam ve tez danışmanım Dr. Öğr. Üyesi Mücahit NAMLI'ya tez aşamasında teknik detaylar konusundaki bilgi paylaşımından dolayı teşekkürü bir borç bilirim. Eğitim hayatım boyunca birçok konuda büyük desteklerini gördüğüm sevgili anne ve babama, çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen arkadaşlarıma verdikleri destek ve gösterdikleri özveri için teşekkür ederim.

Ocak 2019

İdris ARAZ

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa</u>
ONAY	ii
ETİK İLKELERE UYGUNLUK BEYANI	iii
ÖNSÖZ	iv
İÇİNDEKİLER	v
KISALTMALAR	vii
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	x
ÖZET	xiii
ABSTRACT	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1. Çalışmanın Konusu	2
1.2. Çalışmanın Önemi	2
1.3. Çalışmanın Amacı	3
1.4. Çalışmanın Kapsamı	4
2. TÜNELLERİN TARİHÇESİ VE YAPIM TEKNİKLERİ	5
2.1. Dünyada Tünelin Tarihsel Seyri	5
2.2. Türkiye’de Tünel İmalatlarının Tarihteki Seyri	12
2.3. Tünellerin Açılma Yöntemleri ve İksa Sistemleri	13
2.3.1. Delme ve Patlatma Metodu	13
2.3.1.1. Tam Kesit (Full-Face) Yöntemi	14
2.3.1.2. Kalot - Stross Yöntemi	14
2.3.1.3. Çok Galerli Yöntemi	15
2.3.2. Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM)	16
2.3.2.1. NATM’in Tarihsel Süreç İçerisindeki Gelişimi	16
2.3.2.2. NATM Yöntemi İle Kazı-Destek Yapılarak Tünel Açılması	19
2.3.2.3. NATM Yöntemi ile Açılan Tünel Kesitleri	21
2.3.3. Tünel Açma Makinesi (TBM) Metodu	23
2.3.3.1. TBM’in Tarihsel Gelişimi	24
2.3.3.2. TBM’in Performansı	26
2.3.4. Zemin Basıncı Dengeleme Metodu (EPBM)	27
2.3.4.1. EPBM’in Tarihsel Gelişimi	27
2.3.4.2. EPBM ile Tünel Açma ve Kazı Destekleme Sistemi	28
2.3.5. Aç-Kapa Metodu	30
3. PÜSKÜRTME BETON	31
3.1. Püskürtme Beton (Shotcrete)’un Tanımı ve Tarihçesi	31
3.2. Püskürtme Betonun İşlevsel Özellikleri	33
3.2.1. Püskürtme Beton Kaplamanın İşlevleri	34
3.3. Püskürtme Beton Uygulama Metodları	35
3.3.1. Kuru Sistem Püskürtme Betonu	35

3.3.2.	Yaş Sistem Püskürtme Betonu	36
3.3.3.	Kuru ve Yaş Püskürtme Beton Karışımlarının Mukayesesi.....	37
3.4.	Püskürtme Betonda Priz Hızlandırıcı Kullanımı.....	38
3.5.	Püskürtme Beton Karışımında Puzolanik Katkı Kullanımı	39
3.6.	Püskürtme Betonlarda Lif Kullanımı	40
3.6.1.	Çelik Lifli Püskürtme Beton	41
3.6.2.	Sentetik Lifli Püskürtme Beton	45
3.6.3.	Çelik Lifli Betonda Karışım Tasarımı.....	46
3.6.4.	Çelik Lifli Püskürtme Betonda Geri Sıçrama (Rebound)	46
3.6.5.	Püskürtme Betonda Karot Alma İşlemleri	48
3.6.6.	Çelik Lifli Betonun Tokluk İndeksi ile Değerlendirilmesi	49
4.	TÜNELLERDE KAPLAMA İMALATLARI	52
4.1.	Tünellerde İkinci Kaplama Yapım Metodolojileri.....	52
4.1.1.	Klasik Dökme Beton İle Nihai (İkinci) Kaplama.....	52
4.1.2.	Püskürtme Beton İle İkinci Kaplama	54
4.2.	Metro Tünellerinde İkinci Kaplamanın Süre Ve Maliyet Mukayesesi	55
4.2.1.	Klasik Dökme Beton İle İkinci Kaplama Yapılmasının Süre ve Maliyeti	55
4.2.1.1	Çakmak İstasyonu Tünel Kaplamalarının Süre ve Maliyeti	56
4.2.2.	Püskürtme Beton İle İkinci Kaplama Yapılmasının Süre Ve Maliyeti	65
4.2.3.	Tünellerdeki İkinci Kaplama Yöntemleri Üzerinden Süre ve Maliyet Analizi Yapılması.....	72
5.	SONUÇ VE ÖNERİLER.....	76
6.	KAYNAKLAR.....	78
EKLER.....	80	
Ek-1.	Yumuşak Zemin Tünel Açma Makineleri İle İlgili Detaylı Bilgiler	80
1.	Arazi Dengeleme Makineleri (EPB)	80
2.	Çamur Şildi (Slurry Machine).....	82
Ek-2.	Kaya Sınıfları ve Özellikleri.....	84
Ek-3.	Şemsiye borusu (umbrella arch) uygulaması	91
Ek-4.	Tünel Kaplama Süreleri.....	93
Ek-5	Tünellerde Kaplama İmalatları	94
Ek-6	Tünellerde Su Yalıtımı	97
ÖZGEÇMİŞ.....	98	

KISALTMALAR

NATM	: New Australian Tunnel Method -Yeni Avustralya Tünel Metodu
UA	: Umbrella Arch - Şemsiye Kemer
TBM	: Tunnel Boring Machine -Tünel Açma Makinesi
RQD	: Rock Quality Designation - Kaya Kalite Derecesi
RMR	: Rock Mass Rating - Kaya Kütle Oranı
GSI	: Geological Strength Index - Jeolojik Dayanım İndeksi
EPBM	: Earth Pressure Balance Method - Zemin Basıncı Dengeleme Yöntemi
EFNARC	: European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems-Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Birliği
ASTM	: American Society for Testing of Materials-Amerikan Malzeme Test Birliği
ACI	: American Concrete Institute-Amerikan Beton Enstitüsü
ÇTDB	: Çelik Tel Donatılı Beton
ÜÜÇMP	: Üsküdar Ümraniye Çekmeköy Metro Projesi
ÜÜÇ	: Üsküdar Ümraniye Çekmeköy

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1. Dünya çapında inşa edilen önemli demiryolu ve metro tünelleri	11
Çizelge 2. İstanbul Metrosunda uygulanan kazı iksa sistemleri	22
Çizelge 3. Kuru ve yaş püskürtme sistemlerinin karşılaştırılması	37
Çizelge 4. Priz hızlandırıcı katkıların genel özellikleri.....	39
Çizelge 5. Değişik lif tiplerine ait mekanik büyüklükler	40
Çizelge 6. Püskürtme beton üzerine yapılmış bazı deneysel çalışmalarda kullanılan karışım tasarımları.....	47
Çizelge 7. ACI 506.2-95 standardına göre karot kalite sınıflandırması	49
Çizelge 8. I ₅ , I ₁₀ , I ₂₀ İndeksleri için ölçütler.....	51
Çizelge 9. Püskürtme beton ile nihai kaplamanın yapıldığı bazı tüneller.....	54
Çizelge 10. NATM yönteminin imalat kalemlerinin süresel dağılımı	58
Çizelge 11. NATM maliyet kalemleri.....	59
Çizelge 12. Şemsiye Kemer (UA) yönteminin imalat kalemlerinin süresel dağılımı.	60
Çizelge 13. Şemsiye Kemer (UA) yönteminde imalat kalemleri bakımından maliyet Çizelgesi.	61
Çizelge 14. Çakmak istasyonuna ait tünellerde dökme beton yöntemi ile yapılan ikinci kaplama süreleri	63
Çizelge 15. Çakmak istasyonuna ait tünellerde dökme beton yöntemi ile yapılan ikinci kaplama maliyetleri.....	63
Çizelge 16. Çakmak istasyonu tünellerinin çelik lifli dökme beton kaplama ile yapılması durumunda ikinci kaplama süresi	64
Çizelge 17. Çakmak istasyonu tünellerinin çelik lifli dökme beton kaplama yapılması durumunda ikinci kaplama maliyeti	64
Çizelge 18. Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Etiyopya Hızlı Tren Projesinde 40 m’lik tünelde çelik hasırlı destek ilerleme süresi	65

Çizelge 19. Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Etiyopya Hızlı Tren Projesinde 50 m’lik tünelde çelik telli püskürtme beton ile destek ilerleme süresi	66
Çizelge 20. İstanbul Metrosu 4.Levent-Ayazağa-Hacıosman Metro Projesi Anahat (A tipi) tünelde üst yarı kısmının hasır ve çelik lifle	68
Çizelge 21. Çakmak istasyonuna ait tünellerin montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton uygulandığı takdirde ikinci kaplama süresi	70
Çizelge 22. Çakmak istasyonuna ait tünellerin montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton uygulandığı takdirde ikinci kaplama Maliyeti	70
Çizelge 23. Çakmak istasyonuna ait tünellerin kaplamaları çelik lifli püskürtme beton yöntemi ile yapıldığı takdirde ikinci kaplama süreleri.....	71
Çizelge 24. Çakmak istasyonuna ait tünellerin kaplamaları çelik lifli püskürtme beton ile yapıldığı takdirde ikinci kaplama maliyetleri	71
Çizelge 25. Nihai(İkinci Kaplama) Süre ve Maliyetleri	72
Çizelge 26. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesi Planlanan İmalat Süresi (ay bazında).....	75

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Mısırlıların ve Romalıların su nakletmek için açtığı tüneller	5
Şekil 2.2 Bukliye metodu kullanılarak açılan Thames Tüneli	6
Şekil 2.3 Fréjus Demiryolu Tüneli.....	7
Şekil 2.4 Dünyanın en uzun demiryolu tüneli-Gotthard Tüneli.....	8
Şekil 2.5 Simplon Tüneli	8
Şekil 2.6 New York Metrosu	9
Şekil 2.7 Manş Tüneli	10
Şekil 2.8 Manş anahat tüneli	10
Şekil 2.9 Manş Tüneli makas alanı	11
Şekil 2.10 Beyoğlu metro hattı (Galata–Pera)	12
Şekil 2.11 Bolu Tüneli	13
Şekil 2.12 Deliklere patlayıcı dolumu ve tam kesit patlatma şeması.....	14
Şekil 2.13 Kalot-Stross tünel açma yöntemi	15
Şekil 2.14 Çok galeri yöntemi.....	15
Şekil 2.15 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi	16
Şekil 2.16 Fort Canning karayolu tünelinden bir görünüm	18
Şekil 2.17 Tynols Corner tünelinde şemsiye borusu uygulaması	19
Şekil 2.18 NATM’ da kullanılan bazı ekipmanlar	20
Şekil 2.19 ÜÜÇ Metro Projesi-Çarşı istasyonu P1 tüneli kazı-desteği.....	20
Şekil 2.20 İstanbul Metrosunda uygulanan farklı tünel tip kesitleri	21
Şekil 2.21 A1, A2, A3 ve A5 tipi kazı-destek sistemlerinin şematik gösterimi	23
Şekil 2.22 Karışık zemin kazısına uygun tam cepheli tünel açma makinası	23
Şekil 2.23 Hoosac tüneli	24
Şekil 2.24 İlk yerli TBM	25
Şekil 2.25 Bakımı yapılmakta olan bir TBM	26
Şekil 2.26 Pekin Metrosunda kullanılan EPB makinası	27

Şekil 2.27 EPBM'in boyuna kesit görünümü	28
Şekil 2.28 EPBM kısımları	28
Şekil 2.29 EPBM ile tünel kaplaması (Prag Metro su).....	29
Şekil 2.30 Aç-Kapa metodu kullanılarak inşa edilen istasyon	30
Şekil 3.1 a) Tünel tahkimatı	31
b) Kazı sonrası destek	31
Şekil 3.2 1907 yılında geliştirilen püskürtme beton aleti	32
Şekil 3.3 Tabanca sistemi kullanılarak püskürtme betonun yüzeye uygulanması.....	32
Şekil 3.4 Püskürtme beton uygulaması.....	34
Şekil 3.5 Yaş püskürtme beton uygulaması.....	36
Şekil 3.6 Çelik lif tipleri	41
Şekil 3.7 Tipik çelik lif tipleri ve boyutları	42
Şekil 3.8 Çelik hasırlı ile çelik lifli püskürtme betonun karşılaştırılması.....	43
Şekil 3.9 Püskürtme betonda kullanılan liflerin çatlak gelişimini önlemesi ve ilave taşıyıcılık işlevi	44
Şekil 3.10 Liflerin beton davranışına etkileri, direkt çekme ve eğilme altında kiriş ve plaklarda yumuşama ve sertleşme davranışı.....	45
Şekil 3.11 Panellere betonun püskürtülmesi ve numune alma aşamaları	48
Şekil 3.12 ASTM C 1018'e göre deney düzeneği	49
Şekil 3.13 Tokluk hesaplamalarında kullanılan yük-yerdeğiştirme eğrisi.....	50
Şekil 4.1 CT Tipi Tünelin nihai kaplamasının dökme beton ile yapılması	53
Şekil 4.2 Tünel kemerinin yürür kalıp ile nihai kaplama montajının yapılması	53
Şekil 4.3 Nihai kaplamanın püskürtme beton ile yapıldığı Londra Whitechapel platform tüneli (Crossrail).....	54
Şekil 4.4 Dökme beton yöntemi ile yapılan ikinci kaplama aşamaları.....	55
Şekil 4.5 Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro güzergâh hat planı.....	56
Şekil 4.6 İnceleme alanının jeolojik kesit alanı	57
Şekil 4.7 Çakmak istasyonunun 3D gösterimi.....	57
Şekil 4.8 NATM yönteminde imalat kalemlerinin sürelerinin yüzdelik dağılımı.	58
Şekil 4.9 NATM yönteminin maliyet kalemlerinin yüzdelik dağılımı.	59
Şekil 4.10 Şemsiye Kemer (UA) yönteminde imalat kalemlerinin sürelerinin yüzdelik dağılımı.	60

Şekil 4.11 Şemsiye Kemer (UA) yönteminin maliyet kalemlerinin yüzde dağılımı	61
Şekil 4.12 P1, P2, B1.2, B3.1 ve A tipi tünel en kesitleri	62
Şekil 4.13 Tünel desteğinin çelikli hasır püskürtme beton ve çelik lifli püskürtme betonla sağlanması durumunda süresel ve maliyet kıyaslamaları	67
Şekil 4.14 Montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton uygulaması ile nihai kaplama yapılması (normet.com)	69
Şekil 4.15 Çelik lifli püskürtme beton uygulaması ile nihai kaplama yapılması.....	71
Şekil 4.16 Yapım Yöntemlerine göre Nihai Kaplamanın Süresel Olarak Kıyaslanması.....	73
Şekil 4.17 Yapım Yöntemlerine göre Nihai Kaplamanın Maliyet Olarak Kıyaslanması.....	74

ÖZET

Tünel yapım yöntemleri dünyada ve ülkemizde tarih boyunca aşamalı olarak değişip gelişme göstermiş ve bu yöntemlerden en fizibil ve en ekonomik olanı tercih edilmeye çalışılmıştır. Ülkemizde hali hazırda metro tünel projelerinin yapım sürecinde kazı sonrası destek amacıyla püskürtme beton (shotcrete) ve hasır çelik ile geçici kaplama yapıldıktan sonra kalıcı ikinci kaplama olarak çelik donatı ve dökme beton kullanılmaktadır.

Bu tez çalışmasında, mühendislik yönetimi bağlamında, donatılı püskürtme beton kullanımının metro projelerine etkisi araştırılacaktır. Bu tez çalışması kapsamında ulaşım alanındaki mega yurtdışı projelerden Etiyopya Hızlı Tren projesi ve mega yurtiçi projelerden Üsküdar - Ümraniye - Çekmeköy Metro Projesi incelenmiştir. Bu projelerdeki tünel kaplama sürelerinin ve maliyetlerinin proje yönetimindeki önemi ve projenin tamamlanmasına etkisi araştırılmıştır. Tünellerde nihai (ikinci) kaplama olarak dökme beton ile donatılı püskürtme beton kullanımının proje süresi ve maliyeti açısından kıyaslaması yapılmıştır.

Sonuç olarak klasik dökme beton uygulamasına alternatif bir diğer nihai kaplama yönteminin bitmiş raylı sistem projeleri üzerinden maliyet ve süre analizi yapılarak planlanan metro projelerinin uygulamalarında proje yönetimi açısından etkisi analiz edilmiştir. Analiz sonucunda ise donatılı püskürtme beton ile tünelin nihai kaplaması yapıldığında klasik dökme beton ile yapılan tünel nihai kaplamaya göre süre ve maliyet açısından daha avantajlı olduğu ortaya çıkarılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Püskürtme beton, Tünel, Metro, Proje

ABSTRACT

Tunnel construction methods have gradually developed and developed throughout the history of the world and our country, and the most feasible and economical ones have been tried to be preferred. In our country, steel reinforcement and cast concrete are used as permanent second coating after spray coating and mesh steel with temporary coating for supporting after excavation in the construction process of subway tunnel projects.

In this thesis study, the effect of using reinforced shotcrete on metro projects in the context of engineering management will be investigated. Within the scope of this thesis, mega metro projects such as Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Project and Ethiopia high-speed railway project will be examined. The impact of the duration and cost of tunnels in these projects on the metro project management and the impact on completion of the project will be investigated. The second coating in the tunnels will be a comparison of the use of cast concrete and shotcrete terms of project duration and cost. It would be advisable to apply the most favorable method in the subway projects as a result of benchmarking and analysis.

As a result, the effect of project management will be analyzed in the applications of similar metro projects, which are planned by carrying out time and cost analysis of a second alternative coating technique alternative to classical cast concrete application. As a result of the analysis, when the final coating of the tunnel with reinforced shotcrete was made, it was found that more advantageous than the tunnel made with conventional cast concrete in terms of time and cost compared to the final coating.

Keywords: Shotcrete, Tunnel, Metro, Project

1. GİRİŞ

Trafik yoğunluğunun özellikle nüfusun her geçen gün arttığı büyükşehirlerde problem haline dönüşmesi, çözüm olarak toplu taşımacılık alanında tüm dünyada kullanımı giderek artan ve trafik yükünü önemli ölçüde hafifleten ve ulaşım sorunlarının çözümünde kaydadeğer bir ivme kazandıran metro gibi yer altı ulaşımının yaygınlaştırılması ile mümkün kılınmaktadır. İstanbul 2010 Ulaşım Master Planında Türkiye'nin nüfus yoğunluğunun en fazla olduğu megakent İstanbul ile ilgili şu bilgiler yer almaktadır: Ekonomik kalkınmanın etkisiyle İstanbul nüfusu giderek artarken kentleşme alanı da hızla büyümektedir. 1985 yılında 6 milyon'a yaklaşan kent nüfusu çeyrek yüzyılda 13 milyonu bulmuştur. İstanbul'a kayıtlı taşıt sayısı da aynı süre zarfında 6 kat artarak 1,7 milyonu geçmiştir. Mega şehirde yoğun kentleşme, nüfus artışı ve ekonomik büyüme ile birlikte bireysel araç kullanımı ivme kazanmış, trafik yoğunluğu sorunu ciddi boyutlara varmış, kazalar ve egzoz emisyonu problemleri gibi ciddi olumsuz etkiler ortaya çıkmıştır.

Günlük yolculukların çok fazla olduğu İstanbul'da, bu yolculukların büyük bir kısmı karayolu ile yapılmakta ve şehir trafiğini oluşturan araçların büyük bir kısmını özel araçlar oluşturmaktadır. Bu soruna karşı halihazırda mevcut olan raylı sistemler her geçen gün artan trafik talebini karşılayamamaktadır. İstanbul Büyükşehir Belediyesinin yatırım bütçesinin önemli bir kısmını raylı sistem, deniz taşımacılığı, karayolları ve otoparkları kapsayan ulaşım sektörüne ayırmaktadır. Kentleşmenin hızlı bir şekilde gelişme göstermesi trafik hacmini arttırırken raylı sistemler başta olmak üzere ulaşım altyapısının geliştirilmesi uzun bir süreci kapsamaktadır. Bundan dolayı ulaşımında etkin politikaları ve yatırım planlamalarını kapsayıcı, uzun vadede metropoliten arazi kullanım planı ile uyumlu olacak entegre bir ana plan çalışmasına ihtiyaç duyulmuştur.

Raporda İstanbul için 2023 yılı arazi kullanım ve nüfus yapısına bağlı olarak, ekonomik açıdan düşük maliyetli ve kentin planlı gelişimine katkı veren; ekolojik açıdan çevreye verdiği zararı minimuma indiren; toplumsal açıdan sosyal eşitlik ilkesine bağlı, kentin tarihi ve kültürel dokusu ile uyumlu, erişilebilirlik, güvenlik, konfor, güvenilirlik gibi önemli sayılacak nitelikleri içeren, sürdürülebilir bir ulaştırma ağının kurulması ile megakentte yaşayanların ulaşım ihtiyaçlarının karşılanması üzerinde durulmuştur.

Yer altı ulaşımının özellikle şehir merkezlerinde en önemli parçasını oluşturan Metro projelerinin uygulanmasında ise önemli olan projenin yapım süresince kaliteden ve emniyetten ödün vermeden en kısa sürede ve düşük maliyetle bitirilip, hizmete geçmesidir. Dolayısıyla projede gerek anahat tünellerde gerekse de istasyonlarda yapım yöntemlerinin, tekniklerinin iyi irdelenip, belirlenmesi önem arz etmektedir. Özellikle tüneller çok defa sığ derinlikte ve zayıf zeminlerde açıldıkları için, kazı çalışmaları sırasında yüzey oturmalarından dolayı üstyapılara ve altyapılara bir takım zararlar verilebilmektedir. Bu zararlar teorik iş programını olumsuz etkileyip işin süresini arttırmaktadır. Projenin zamanının uzaması ve deformasyonların artması maliyetlerde artışa yol açmaktadır. Böyle bir durumda ise bu tür projeleri gerçekleştiren işverenin/idarenin dikkat etmesi gereken ise hem işin öngörülen proje süresinde bitirilmesi, hem yer altı ve yerüstündeki yapılara en az zarar vererek bitirilmesi hem de tüm bunların en az maliyetle yapılabilmesini sağlayacak planlı,programlı ciddi bir disiplinlerarası ekip çalışmasının yapılmasıdır.

Bir inşaat projesini yönetmede başarılı olmak, projenin kendine özgü zorluklarına ve özelliklerine aşina olmayı gerektirir. Yeraltı metro inşaatı, diğer projeler gibi, kendine özgü koşullara ve karmaşıklığa sahiptir. Bu karmaşıklıklar iki ana gruba ayrılmıştır. Metro vb. raylı sistem projelerinin içsel benzersiz özelliklerinin, birden fazla paydaşın arasında, gerekli entegrasyonun, değişikliklerin ve deneyimlerin karşılıklı ilişkisinin düzenlemesi, bu çabaların yönetimi ve planlanmasının belirli karmaşıklıkların kaynağı olabileceğini düşünüyoruz. Bununla birlikte, metro projelerinin diğer inşaat projeleriyle karşılaştırıldığında belirgin bir farkı, birleşik iç ve dış karmaşıklıklardan gelmektedir. Dış karmaşıklıklar, metro inşaat projelerinin gerçekleştirileceği şantiyenin konumundan kaynaklanır. Bu istisnai özellik, bu tür projelerde planlama ve yönetim karmaşıklıklarını diğer yapılara göre daha arttırmakta ve şiddetlendirmektedir.

1.1. Çalışmanın Konusu

Bu tezin konusu Metro vb. yeraltı ulaşım projelerindeki tünellerde ikinci kaplama betonu olarak donatılı Püskürtme beton (shotcrete) kullanımının klasik dökme beton kullanımına kıyasla projeye etkisinin mühendislik yönetimi açısından analiz edilmesidir.

1.2. Çalışmanın Önemi

Nüfusun yoğun olduğu haliyle günlük yolculukların da çok olduğu metropollerde, bu yolculukların önemli bir kısmı karayolu ile yapılmakta ve şehir içi trafiğini oluşturan araçların çok büyük bir kısmını özel motorlu araçlar teşkil etmektedir. Bununla birlikte mevcut raylı sistemler giderek artan trafik talebine yeterince karşılık verememektedir.

Bu sebeple İstanbul Büyükşehir Belediyesi tarafından; megakent İstanbul için 2023 yılı arazi kullanım ve nüfus yapısı gözönünde bulundurularak, kaliteden ödün vermeden,ekonomik açıdan düşük maliyetli ve kentin planlı gelişimine katkı veren; ekolojik açıdan çevreye verdiği zararı en aza indiren; toplumsal açıdan sosyal eşitlik ilkesine bağlı, kentin tarihi ve kültürel dokusu ile uyumlu, erişilebilirlik, güvenlik, konfor, güvenilirlik gibi önemli sayılacak nitelikleri içeren, sürdürülebilir bir ulaştırma ağının kurulması ile megakentte yaşayanların ulaşım ihtiyaçlarının karşılanması amacıyla 1100 km metro ağı yapılması planlanmaktadır.

1.3. Çalışmanın Amacı

Yer altı projelerinin klasik yöntemlerle sınırlı kalınmaması alternatif uygulamaların araştırılması ve neticelerinin proje üzerindeki süre ve maliyet analizi yapılması yapılacak metro projeleri için önem arz etmektedir. Zira alternatif yöntemlerin araştırılarak analiz edilmemesi metro projelerinin yapım sürelerinin kontrol altına alınamayacak ölçüde uzamasına bundan ötürü de metro projelerinin tamamlanarak hedeflenen zamanda hizmete geçmemesine, işletmeye alınamamasına sebep olmaktadır. Bu bağlamda, alternatif bir tünel kaplama yöntemi olarak donatılı püskürtme beton (shotcrete) kullanılması tünel yapım sürelerini kısaltma imkânı sunabilir. Bu sayede büyükşehirlerdeki trafik problemini rahatlatacak metro projelerinin daha kısa sürede hizmete geçmesi sağlanacak ve yapım süresinin uzamasından dolayı geç elde edilmeye başlanılan işletme geliri gibi önemli gelir kayıpları da bu şekilde işletmeye daha erken alınan metro hatlarıyla azaltılmış olacaktır.

Uygulanan klasik tünel kaplama yönteminin yerine alternatif bir tünel kaplama yöntemi kullanılmasının metro tünel inşaatlarının ve benzeri yeraltı projelerinin yapım süreleri ve maliyetleri hesap edilerek tüm projenin tamamlanacağı süreye etkisi araştırılacaktır. Bu çalışma ile alternatif tünel kaplama yönteminin gerçekleşmiş bir metro projesi üzerinden maliyet ve süre analizi yapılması suretiyle planlanan metro ve yeraltı projelerinde mali ve süresel açıdan bir avantaj sağlanıp sağlanamayacağının tespit edilmesi amaçlanmıştır.

Bu tez kapsamında, Üsküdar - Ümraniye- Çekmeköy Metrosu (ÜÜÇ) Projesi, Etiyopya hızlı tren projesi gibi mega raylı sistem projeleri incelenecektir. Bu projelerdeki tünel kaplama süresinin ve maliyetinin metro proje yönetimindeki önemi ve projenin tamamlanmasına etkisi araştırılacaktır. Metro projelerinde tünellerde ikinci kaplama olarak dökme beton yönteminin uygulamaları ile donatılı püskürtme beton (shotcrete) yönteminin uygulamaları göz önünde bulundurulacaktır. Tünellerde ikinci kaplama

olarak dökme beton ile donatılı püskürtme beton (shotcrete) kullanımının proje süresi ve maliyeti açısından kıyaslaması yapılmıştır.

1.4. Çalışmanın Kapsamı

Bu tez kapsamında, Üsküdar – Ümraniye - Çekmeköy Metro (ÜÜÇ) Projesi ve Etiyopya Hızlı Tren Projesi gibi mega projeler incelenecektir. Bu projelerdeki tünel kaplama süresinin ve maliyetinin metro proje yönetimindeki önemi ve projenin tamamlanmasına etkisi araştırılacaktır. Metro projelerinde tünellerde ikinci kaplama olarak dökme beton yönteminin uygulamaları ile donatılı püskürtme beton (shotcrete) yönteminin uygulamaları göz önünde bulundurulacaktır. Tünellerde İkinci Kaplama olarak dökme beton ile lifli püskürtme beton (shotcrete) kullanımının proje süresi ve maliyeti açısından kıyaslaması yapılmıştır.

Maliyet kalemleri olarak nitelikli işçi çalıştırma maliyetleri, işçi eğitim süreleri, işçi eğitim maliyetleri, kullanılacak katkı kimyasallarının maliyetleri, kullanılacak demir ve fiber takviyelerin maliyetleri ve bu yeni yöntem için kullanılacak püskürtme beton robotlarının ilk alım ve işletim maliyetleri hesaba katılacaktır.

Bu maliyet miktarlarının elde edilmesi için sahadan veri toplanacağı gibi sahadan toplanması mümkün olmayan ama proje esnasında hesaplanmış diğer veriler de bu araştırmada kullanılmıştır.

2. TÜNELLERİN TARİHÇESİ VE YAPIM TEKNİKLERİ

2.1. Dünyada Tünelin Tarihsel Seyri

Tarihte çeşitli amaçlarla ve farklı yöntemlerle tüneller açılmıştır. Günümüzden 3000 yıl kadar önceye gidildiğinde kıymetli metallerin araştırılması amacıyla Aztekler ve Babilliler dünyanın en eski tünellerini, Mezopotamya, Mısır ve Hindistan'da inşa etmişlerdir. 19. yüzyıla değin sert kayadaki tüneller arında ateş yakılarak kaya ısıtıldıktan sonra oluşan sıcak yüzeye su ve sirke püskürtülmesi suretiyle kazılmaktaydı. Bu ilkel yöntemle elde edilen ilerleme miktarı takribi haftada 1 metreydi.

Dünyada ilk tünelin M.Ö. 4000 yılında Babil şehri yakınlarında, Fırat nehrinin altında açıldığı söylenmektedir. Bu tünel 3.5 x 4.5 metre ebatlarında ve 1 km. uzunlukta inşa edilmiştir. İlerleyen dönemlerde ise galeri veya tünel açmanın bir savaş tekniği olarak da kullanıldığı görülmektedir. Geçilmesi zor surların aşılabilmesi için altlarında kazma ve kürek vasıtasıyla tüneller açıldığı bilinmektedir. Şekil 2.1'de Mısırlıların ve Romalıların su nakletmek için açtığı tüneller görülmektedir (delmepatlatma.org/tunel-tarihcesi).



Şekil 2.1 Mısırlıların ve Romalıların su nakletmek için açtığı tüneller

Barut, icat edilip birçok alanda kullanılmasına ve geliştirilmesine rağmen tünel açmada kullanılmamıştır.

Tünelcilik tarihinde en önemli sayılan gelişme Thames nehri altında inşaa edilen tüneldir. 1823 – 1843 yılları arasında inşaatı 20 yıl süren tünelin dikkat çeken özelliği ise Fransız mühendis Brunel'in patentini aldığı Bukliye (kalkan) metodunu ilk kez bu tünelde uygulamasıdır. İnşaa edilen tünel 4.20 m ve 4.80 m ebatlarında ikiz tünel olup hala kullanımına devam edilmektedir. Şekil 2.2'de bukliye metodu kullanılarak açılan Thames Tüneli görülmektedir (delmepatlatma.org).



Şekil 2.2 Bukliye metodu kullanılarak açılan Thames Tüneli

1830 yılında Lord Cohrane'da sulu zeminlerde kuyu ve galeri açmada kullanılabilecek, basınçlı havadan istifade ederek uygulanabilecek yöntemine ait patentini almıştır.

Büyük tünellerin artışının gözlenmesi demiryollarının gelişimine paralel olarak gerçekleşmiştir. İlk demiryolu tüneli Fransa'da St. Etienne – Terre Noire hattında 1826 yılında gerçekleştirilmiştir.

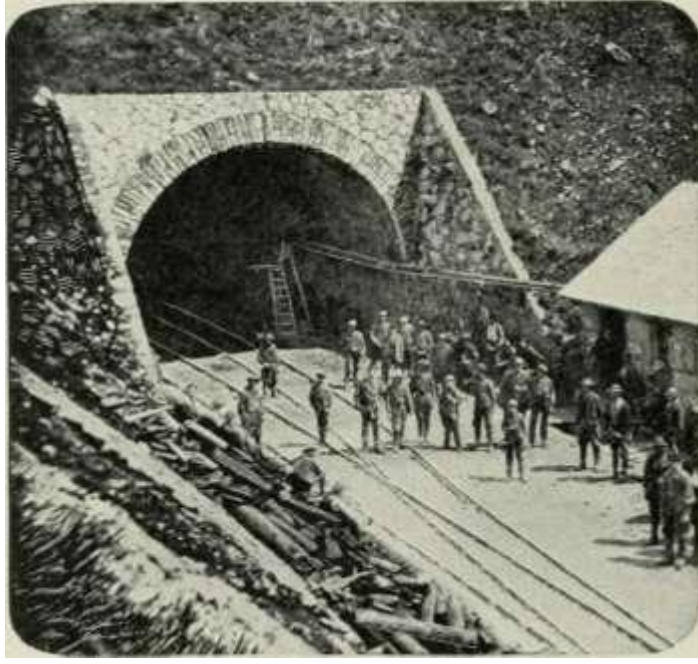
Fréjus Demiryolu Tüneli ya da Mont Cenis Tüneli, Avrupa'da İtalya'nın Torino kentinden başlayarak Fransa'nın Modane kentine giden Fréjus demiryolu hattını Mount Cenis üzerinden Alplerden geçiren 13.7 kilometre uzunluğunda bir tüneldir.



Şekil 2.3 Fréjus Demiryolu Tüneli

İlk olarak 12.8 kilometre uzunluğunda olan tünel, yapıldığı dönemin en uzun tünelinden yaklaşık iki kat daha uzundu. Tünelin doğudaki ucu 1857 yılında İtalya'nın Bardonecchia kentinde kazılmaya başlandı, 1857 yılında da Fransa'nın Modane kentinden diğer ucu kazılmaya başlandı. 26 Aralık 1870 tarihinde Fransız ve İtalyan işçiler kazarak geldikleri noktada buluştular. Tünel 17 Eylül 1871 tarihinde ulaşıma açıldı. 1881 yılında tünel biraz daha uzatılarak var olan uzunluğuna erişildi. Aynı zamanda Fransa tarafındaki çıkışında güçlendirme çalışmaları yapıldı. Şekil 2.3'te gösterilen Fréjus Tüneli bugün Alplerdeki en eski tünellerdendir (delmepatlatma.org).

Germain Sommeiller başkanlığında yürütülen yapım çalışmalarının 25 yıl süreceği öngörülmüştü ancak kompresörlerin (Hava basınçlı delgi) icadı gibi birtakım teknolojik gelişmelerle bu süre beklenmeden proje 14 yılda bitirildi. Özellikle yapımın son yıllarında bugün de kullanılan anlamda dinamitin bulunması yapım işlemlerine büyük ivme kazandırdı. Daha sonra yapımlarına başlanan Gotthard Tüneli ve Simplon Tüneli de bunlara benzer yöntemlerle inşa edildi. Şekil 2.4'te görülen Gotthard Tüneli dünyanın en uzun demiryolu tüneli (delmepatlatma.org).



Şekil 2.4 Dünyanın en uzun demiryolu tüneli-Gotthard Tüneli

İsviçrenin Alp dağlarından geçen 57 kilometre uzunluğa ve 2 bin 300 metre derinliğe sahip Gotthard tüneli, Avrupa'nın kuzey-güney hattı arasındaki mesafeyi kısaltan, dünyanın en uzun ve en derin demiryolu tünelidir. Şekil 2.5'te çift tüp şeklinde açılan Simplon Tüneli yer almaktadır (delmepatlatma.org).



Şekil 2.5 Simplon Tüneli

1868 ve 1871 yılları arasında, Fréjus Tüneli açılana kadar işleyen ve bir dağ geçidinden uzanan bir demir yolu hattı zaten vardı ve genelde İngiltere postalarını Hindistan'a ulaştırmak için kullanılıyordu.

Bugün de Fréjus Tüneli, Roma ve Paris'i Torino ile Chambéry üzerinden birbirine bağlayan önemli ulaşım hatlarından biridir. Otomobil ve kamyon taşımacılığının gelişmesiyle 1974 ve 1980 yılları arasında aynı doğrultuda bir de karayolu tüneli yapılmıştır.

1868 yılında New York metrosu Amerika kıtasının ilk yeraltı demiryolu ulaşım sistemi olarak hizmete açılmıştır (Şekil 2.6). İlk yeraltı demiryolu ise Türkiye’de 1874 yılında Galata – Pera arasında hizmete açılmıştır (delmepatlatma.org).



Şekil 2.6 New York Metrosu

Avrupa’da gerçekleştirilen büyük projelerden birisi de Manş denizinin altından tünel inşasıyla geçilmesidir (Şekil 2.7), (delmepatlatma.org).

Manş Tüneli, İngiltere ile Fransa'yı denizden birbirine bağlayan tüneldir. Manş denizi’nin tebeşir kayalarından meydana gelen tabanında kolayca tünel açılabileceğini düşünen bir Fransız mühendis, 1802’de Dover Boğazı’nda iki kıyıyı birleştiren bir tünelin yapılmasını teklif etti. Napolyon tarafından beğenilen teklif savaş yüzünden askıya alındı. Bu tür teklifler 19. yüzyılda defalarca gündeme geldi. 1880’li yılların başlarında bazı özel kuruluşlar iki kıyı arasında bir demiryolu tüneli yapmak için kazılara başladılar. Tünel 1800 m’ye ulaştığında basının, İngiltere'nin güvenliği açısından projenin tehlikeli olduğu hakkındaki kampanyası yüzünden yapım durdurulmuştur.



Şekil 2.7 Manş Tüneli

Manş Tüneli yüzyılımızın mühendislik harikalarından biridir. 14.000 işçinin görev aldığı bu projede, milyonlarca metrik tonluk taş, toprak ve çamurun atılması için son derece gelişmiş kazı makineleri kullanılmıştır. Bunlardan devasa iki kazıcı, kocaman birer solucan gibi, kanalın iki ucundan kazmaya başlamıştır. Her biri bir lazer ışını yardımıyla yönlendirilmiştir. Kanalın üç boyutlu haritasını hafızalarında saklayan bilgisayarlar, lazer ışığının geliş açısını sürekli kontrol etmişlerdir. Ayrıca tünel, Fransa ve İngiltere ortak yapımıdır. Şekil 2.8’de Manş anahat tüneli görülmektedir (<https://teknolojinsaat.blogspot.com/2016/12/mans-tuneli.html>).



Şekil 2.8 Manş anahat tüneli

Fransa ve İngiltere hükümetleri 1960’lı yılların ortalarında tünelin yapılması için tekrar anlaştılsa da daha sonra yüksek maliyetleri gerekçe gösteren İngiltere, 1970’li yıllarda yapımı durdurdu. Bu süre içinde tünelin her iki taraftan 2,4 km’lik kısmı

kazılmıştı. Manş Tüneli 1986’da tekrar gündeme geldi. Proje Fransız ve İngiliz firmalarından meydana gelen bir konsorsiyum tarafından çok sayıda bankadan borç alınarak ve hisse senedi çıkarılarak finanse edildi. Dover ile Calais’yi birbirine bağlayan tünel 1987’de başlayıp 1993 yılında tamamlanmıştır. Tünel 50.5 km. uzunluğunda, deniz yüzeyinin 100 m, deniz tabanının 40 m altındadır. Tünelin su altındaki bölümünün uzunluğu 38 kilometredir (<http://www.delmeplatatma.org/tunnel-tarihcesi-blgdty-55.html>), (Şekil 2.9). Çizelge 1’de dünya çapında inşa edilen belli başlı demiryolu ve metro tünelleri yer almaktadır.



Şekil 2.9 Manş Tüneli makas alanı

Çizelge 1. Dünya çapında inşa edilen önemli demiryolu ve metro tünelleri

Tünel	Yer / Ülke	Uzunluk (km)	İşletmeye açıldığı yıl
Demiryolu Tünelleri			
Gotthard Base Tunnel	Alpler, İsviçre	57	2018
Seikan Tunnel	Japonya	53.9	1988
Channel Tunnel	Manş Kanalı, İngiltere/Fransa	50.5	1994
Lötschberg Base Tunnel	Bernese Alpleri, İsviçre	34.5	2007
Metrolar			
Northern Line	Londra Metrosu	27.8(17,2)	1890-1940
Metro Madrid L-7	Madrid Metrosu / İspanya	32.9	1974-2007
Seoul Subway Line 6	Seul Metrosu	35.1	2000
Metro Madrid L-12	Madrid Metrosu, İspanya	40.9	1999-2003
Serpukhovsko-Timiryazevskaya Line	Moskova Metrosu	41.5	1983-2002
Seoul Subway Line 5	Seul Metrosu	47.6	1990-1996
Metro Lausanne	Lozan Metrosu	13.7	1991

2.2. Türkiye’de Tünel İmalatlarının Tarihteki Seyri

Ülkemizde tüneller, tarihten bu yana suyun taşınması, yer altı demir yolu ulaşımı ve karayolu ulaşımı için ihtiyaç duyulan noktalarda açılmışlardır. Son zamanlarda nüfus artışı ile birlikte kesintisiz ulaşım olan gereksinim gün geçtikçe artmaktadır. Ulaşım hizmetinin en kısa sürede daha konforlu ve erişilebilir hale getirilmesi adına, gerek raylı sistem projeleri gerekse de karayolu tünel inşaatlarına hız verilmektedir. Ülkemizde 19.yüzyılın sonlarında demiryolu projelerinin oluşturulması ile birlikte bazı geçiş noktalarında tünel açma gereği duyulmuştur. **1871** yılında İstanbul-İzmit mabeyninde demiryolu inşaatına başlanmış ve bu güzergâh üzerinde tüneller açılmıştır.

1875 yılında ise Galata–Pera (Beyoğlu) arasında dünyanın en eski 2.metrosu Türkiye’nin ise ilk yeraltı metrosu hizmete açılmıştır (Şekil 2.10) (<http://galeri.netfotograf.com>; <http://e-imo.imo.org.tr>).



Şekil 2.10 Beyoğlu metro hattı (Galata–Pera)

Yine **1982** senesinde, Ülkemizin güneyinde yer alan Mersin ilimizin 20 km kuzeyinde 7127 m uzunluğunda inşa edilen Kadıncık-I tüneli, o yıllarda Türkiye’nin en uzun tünelidir.

İstanbul - Ankara Otoyolu üzerindeki iki tüpten oluşan Bolu Dağı tünelinin 2952 m uzunluğundaki sağ tüp’ü 23 Ocak 2007 tarihinde, 3140 m uzunluğundaki sol tüp’ü ise 08 Mayıs 2007 tarihinde ise hizmete açılmıştır. Bolu tünelinin Türkiye’deki diğer tünel imalatlarından ayırıcı özelliği ise tünel kaplamalarında ilk defa hasır donatı yerine, çelik lifli püskürtme beton kullanılmıştır (Şekil 2.11), (www.insaathaber.org).



Şekil 2.11 Bolu Tüneli

2.3. Tünellerin Açılma Yöntemleri ve İksa Sistemleri

Tünel açma yöntemi ve iksa (destekleme) sistemlerinin belirlenmesinde güzergâh topoğrafyası, zemin koşulları ve tünel geometrisine ait parametrelerin yanında hız, maliyet, zaman, emniyet ve işlevsellik faktörleri de göz önünde bulundurulmalıdır.

Tünel açma, inşaat teknikleri açısından şu beş grupta incelenebilir;

- ❖ Delme ve Patlatma Metodu
- ❖ Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM)
- ❖ Tünel Delme Makinesi (TBM) Metodu
- ❖ Zemin Basınç Dengeleme Metodu (EPBM)
- ❖ Aç - Kapa Metodu

2.3.1. Delme ve Patlatma Metodu

Yeraltı kazılarında uzun süreden beri kullanılan bu yöntem, tünel duvarlarındaki kayalarla ve tünel çeperine zarar vermeden, açılacak yerdeki kayaları, hızlı ve ekonomik şekilde çıkarmayı amaçlamaktadır (Palmstorn, Berthelsen, 1988).

Delme ve Patlatma metodunun özellikleri:

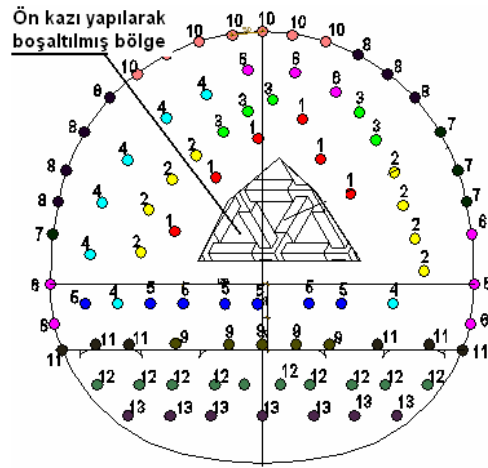
- ❖ İlk yatırım maliyetleri açısından büyük bütçeler gerektirmez.

- ❖ Kullanılacak malzemeler hızlı ve kolay temin edilir.
- ❖ Bu yöntemde üretim belli aralıklarla gerçekleşir.
- ❖ İş güvenliği açısından risk faktörü yüksektir.
- ❖ Patlatmanın etkisiyle tünel yüzeylerinde kırık ve çatlaklar meydana geldiğinden yüzeye iyi bir destek (tahkimat) yapılmalıdır.
- ❖ Bilhassa patlatmalara belli bir süre ara verildiğinden ilerleme hızı düşüktür.

Bu metodun kullanılacağı zeminin yapısı, kayanın dayanıklılığı göz önünde bulundurularak Tam Kesit yöntemi, Kalot-Stross yöntemi ve Çok Galerî yönteminden biri belirlenerek kontrollü patlatma yapılır.

2.3.1.1. Tam Kesit (Full-Face) Yöntemi

Patlatmadan sonra, formasyon kendisini tutuyorsa, kemerlenme söz konusudur ve destek sistemine ihtiyaç yoktur. Parçalanmış kısımlar kaya bulonları ile sağlamlaştırılır ve sonra gerekli yerlere kaplama yapılır. Kemerlenme süresine bağlı olarak patlatma yöntemi uygulanır. Kemerlenme süresi uzun olan sert kayalar ve küçük çaplı tüneller için uygun bir çözüm yöntemi olup, aynı zamanda en ekonomik tünel açma şeklidir. Söz konusu yöntemin uygulamasında çeşitli geçici destek ve nervür elemanları kullanılır (Erguvanlı, 1982). Bu yöntemde patlayıcı malzemelerin açılan deliklere dolum işlemi ve İstanbul Metro tüneline uygulanan tipik bir patlatma şeması Şekil 2.12’de gösterilmiştir (Ayış,2010).

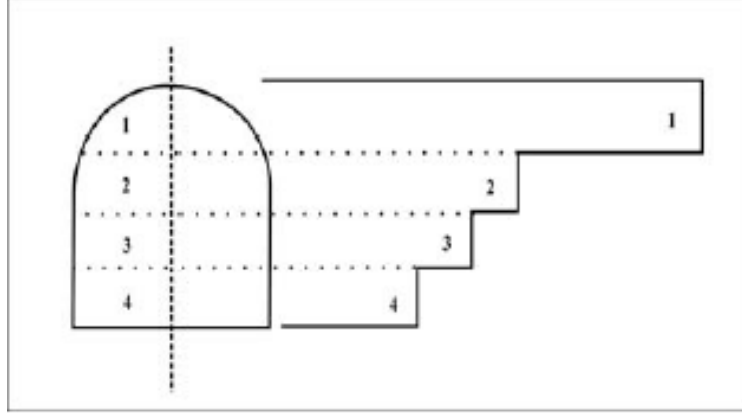


Şekil 2.12 Deliklere patlayıcı dolumu ve tam kesit patlatma şeması

2.3.1.2. Kalot - Stross Yöntemi

Kemerlenme süresi kısa, masif, çatlaklı kayalarda Kalot-Stross yöntemi uygulanmaktadır (Erguvanlı, 1982). Kalot-Stross yönteminde öncelikle tünelin üst kısmı (Kalot-Heading) (Şekil 2.13; 1 nolu bölge) dinamitle ilerlenir, daha sonra alt kısım (Stross) (Şekil 2.13; 2, 3 ve 4 nolu bölgeler) açılır. Bazen de, bütün tünel boyunca önce üst kısımda ilerlenir ve sonra alt kısım açılır, buna üst kalot (top

heading) yöntemi denir. İki aşama halinde patlatma yapıldığı için maliyeti yüksek ve tam kesit yöntemine göre daha zahmetli bir tünel açma yöntemi olup, çok tercih edilen bir yöntem değildir.

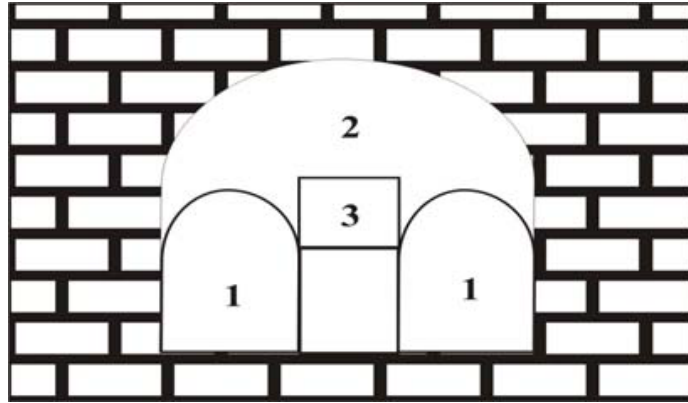


Şekil 2.13 Kalot-Stross tünel açma yöntemi

2.3.1.3. Çok Galerli Yöntemi

Daha zayıf kayalarda Çok Galerli Yönteminin (multiple-drift); yan galeri (side-drift), orta galeri (central drift), kemer galeri (arch-drift) sistemleriyle tünel açılır.

Bu yöntemlerde aynanın iki yanında öncelikle ufak yan galeriler açılır (Şekil 2.14; 1 nolu bölgeler), dinamitlemeden önce yan galerilerin destekleri kaldırılır. Bütün bu yöntemlerde, yerli kaya ile destek arasında boşluk kalmamasına dikkat edilmeli, boşluklar beton veya kaya parçaları ile doldurulmalıdır; aksi halde, tavan desteksiz kalır ve düşer (Erguvanlı, 1982).



Şekil 2.14 Çok galerli yöntemi

2.3.2. Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM)

Tünel açma yöntemlerinden en yaygın olarak uygulanan Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) klasik tünel açma tekniklerinin en deneysel ve esnek olanı, en optimum destek ve kazı yöntemlerinin uygulanabildiği tünelcilik anlayışıdır (Ünlütepe, 2005). Bu yöntem, kazı sonrası oluşacak deformasyonun bir kısmının ana kayaya, bir kısmının ise tahkimat elemanına taşıttırılması esasına dayanmaktadır (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi

2.3.2.1. NATM’ın Tarihsel Süreç İçerisindeki Gelişimi

1950’de Stini ile geliştirdikleri yöntemi, Rabcewicz, **1962** yılında, Salzburg’da düzenlenen XIII. Geomekanik konferansında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Austrian Tunneling Method) olarak tanıtmış (Karakuş ve Fowell, 2004) ve **1964** yılında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi’nin kısaltılmış adını “NATM” “olarak belirlemiştir. Yöntemi şu şekilde tarif etmiştir (www.maden.org.tr): İnce ve geçici bir destek uygulayarak, deformasyonlara izin vererek, tünel içine doğru gelişen kaya basıncını azaltmak ve yükleri kazı çevresindeki kayaya dağıtmak. Böylelikle son destekleme daha az yüklenecek, daha sonra yapılabilecek ve daha ince bir yapı olabilecektir. Deformasyonlar kazı sırasında ölçülecek ve teorik değerlerle karşılaştırılacaktır.

1966’da ilk defa Avusturya’da, daha sonra yayılımı hızla gelişerek, Fransa, Almanya ve İtalya’da uygulanmıştır.

1969 yılında yöntem, resmi olarak ilk defa Frankfurt Metrosu inşaatında kullanılmış; iç içe tabakalı kil, marn, tebeşir ve kum taşı geçilmiştir.

1987'de NATM, İngiltere'nin Barrow şehrinde ilk defa maden arama amaçlı kazı işlemlerinde kullanılmıştır (Karakuş ve Fowell, 2004).

1988'de yöntem, dünyanın en uzun demiryolu tüneli olan Seikan tüneline (Japonya) de başarı ile uygulanmıştır. Tsugaru Boğazı'nın yatağı boyunca uzanan Seikan Tüneli, 23.3 km'si yeraltında olmak üzere 53.85 km uzunluğa sahiptir. Bir başka başarılı uygulama da Mexico şehrindeki Emisor Central kanalizasyon tüneline olmuştur.

2004 yılında yapımı tamamlanan Boston demiryolu tünelinin, 100 yıllık tarihi 7 katlı Russia Wharf Binası altından geçerek Logan Havaalanı ile güney Boston'u birbirine bağlaması hedeflenmiştir. Yumuşak organik silt ve kil formasyonda, tarihi bina altından geçildiğinde riskli bir durumun oluşmasını önlemek için tünel kesitinin dürbün şeklinde tasarımı yapılmış ve NATM ile açılması planlanmıştır

Söz konusu tüneller açılırken mevcut binanın temel kazıkları kırılarak, kırılan kazıklar tünel kemer yapısına oturacak biçimde tünellerin tasarımı yapıp, binaya olası bir zararın önüne geçilmesi amaçlanmıştır. NATM ile açılan bu tünellerde parçalı kazı destekleme sistemi tasarlanmış, kazı destekleme sırasında bina temeli ile tünel arasındaki organik siltli zemine, dondurma özelliğine sahip bileşiklerin (CaCl_2 veya MgCl_2) enjekte edilmesi ile zemin stabilitesi sağlanmıştır (www.dr-sauer.com).

2006'da açılan Fort Canning karayolu tüneli (Singapur), 15 m eninde ve 11 m yüksekliğinde olup; killi silt, kil ve kum mercikleri içeren formasyonda NATM ile açılmıştır. Tünelin kötü zemin formasyonunda açılması ve geniş kesitli olması nedeniyle şemsiye boruları (umbrella arch) kullanılmış ve geçici alt yarı desteklemesi uygulanmıştır (Şekil 2. 16), (www.laabmayr.com).



Şekil 2.16 Fort Canning karayolu tüneline bir görünüm

2007 yılında, Londra Metro Sisteminin bir parçası olan Kings Cross İstasyonu'nda Londra kili (katı kil) formasyonunda açılmış olan tünelde pilot tünel (üst yarıda yapılan küçük çaplı tünel) uygulaması yapılmış, daha sonra 7 m çapında normal boyutlarına getirilerek açılmıştır. Tarihi duvar altından geçilmesi sırasında şemsiye boruları da kullanılmıştır.

2008 yılında, Washington Metro sistemine bağlı Dulles Coridor Metrorail projesi kapsamında Tynols Corner çift hat tüneline, silt ve düşük kil içerikli formasyonda, 8 m çaplı tüneller NATM ile açılmıştır. Tüneller kötü zemin şartlarında açılacağı için, hat boyunca tünel üst yarısına şemsiye boruları uygulaması yapılmıştır (Şekil 2.17), (www.dr-sauer.com).

2009 yılında, Londra Metro Sistemi'nin bir parçası olan Victoria İstasyonu'nda, Londra kili formasyonunda açılmış olan mevcut dar kesitli 6 m çapındaki tüneller, NATM ile 10 m çapına çıkarılarak genişletilmiştir. Genişletme yapılacak olan tünellerde öncelikle yüzeyden zemin içerisine basınçlı çimento harcı enjeksiyonu (jet grout) ile zemin iyileştirildikten sonra, hat boyunca tünel üst yarısına şemsiye boruları uygulanmıştır (<http://books.google.com.tr>).

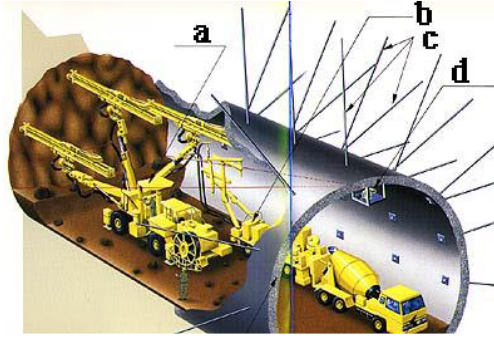


Şekil 2.17 Tynols Corner tüneline şemsiye borusu uygulaması

2.3.2.2. NATM Yöntemi İle Kazı-Destek Yapılarak Tünel Açılması

NATM’de ana ilke; en uygun kazı ve destekleme yönteminin seçilerek, kazı sonrası oluşacak ikinci gerilme ve deformasyonların kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığının olabildiğince korunarak; boşluğu çevreleyen bölgede kaya/zemin kütlesi ve destekleme elemanlarının doğrudan teması ile kendini tutan ve taşıyan kompozit bir statik sistem oluşturmaktır. NATM ile açılan tüneller genellikle iki aşama halinde (alt yarı ve üst yarı) açılmaktadır. Öncelikle üst yarı kısmında kazı destekleme işlemi yapıldıktan sonra belli bir mesafe aralığında alt yarının kazı destekleme işlemi gerçekleştirilir. Böylece tünelde kazı iksa işlemi tamamlanmış olur.

NATM detayları, tünel güzergâhı boyunca topoğrafya, zemin etütleri ve tünel geometrisine bağlı olarak belirlenir. Ayrıca zemin gözlemleri ve deformasyon ölçümlerinden elde edilen sonuçlara göre, kazı destek ve inşaat tipi ekipmanı uygulama sırasında sürekli gözden geçirilir. Böylece gerektiği kadar destekleme yapılarak, iyi bir zamanlama ve optimum maliyetle gerek duyulduğu ölçüde yapı emniyeti sağlanır (Ünlütepe, 2005). Şekil 2.18’de NATM’da kullanılan bazı ekipmanlar gösterilmektedir (www.civil.nagasaki-u.ac.jp).



- a) 3 kafalı Jumbo delgi makinesi
- b) Yaş püskürtme beton makinesi
- c) Kaya bulonları
- d) Otomatik jeodezik ölçüm sist

Şekil 2.18 NATM’ da kullanılan bazı ekipmanlar

NATM’de tünel kazı destekleme sistemindeki uygulama aşamaları genel olarak sırasıyla;

- Uygun açıklık aralığında kazı yapılması,
- Hasır çelik donatısının yerleştirilmesi,
- Çelik iksanın yerleştirilmesi,
- İlk kademe püskürtme betonun atılması (yaklaşık 15 cm kalınlığında),
- İkinci kat çelik hasır donatısının yerleştirilmesi,
- Püskürtme betonun projede belirtilen nihai kalınlığının tamamlanması,
- Püskürtme betonun priz almasının ardından tünel cidarına kaya bulonu çakılması.

aşamalarından oluşmaktadır.

Şekil 2.19’da Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesinin Çarşı istasyonunda P1 peron tüneli NATM ile kazı-desteğin yapıldığı görülmektedir.

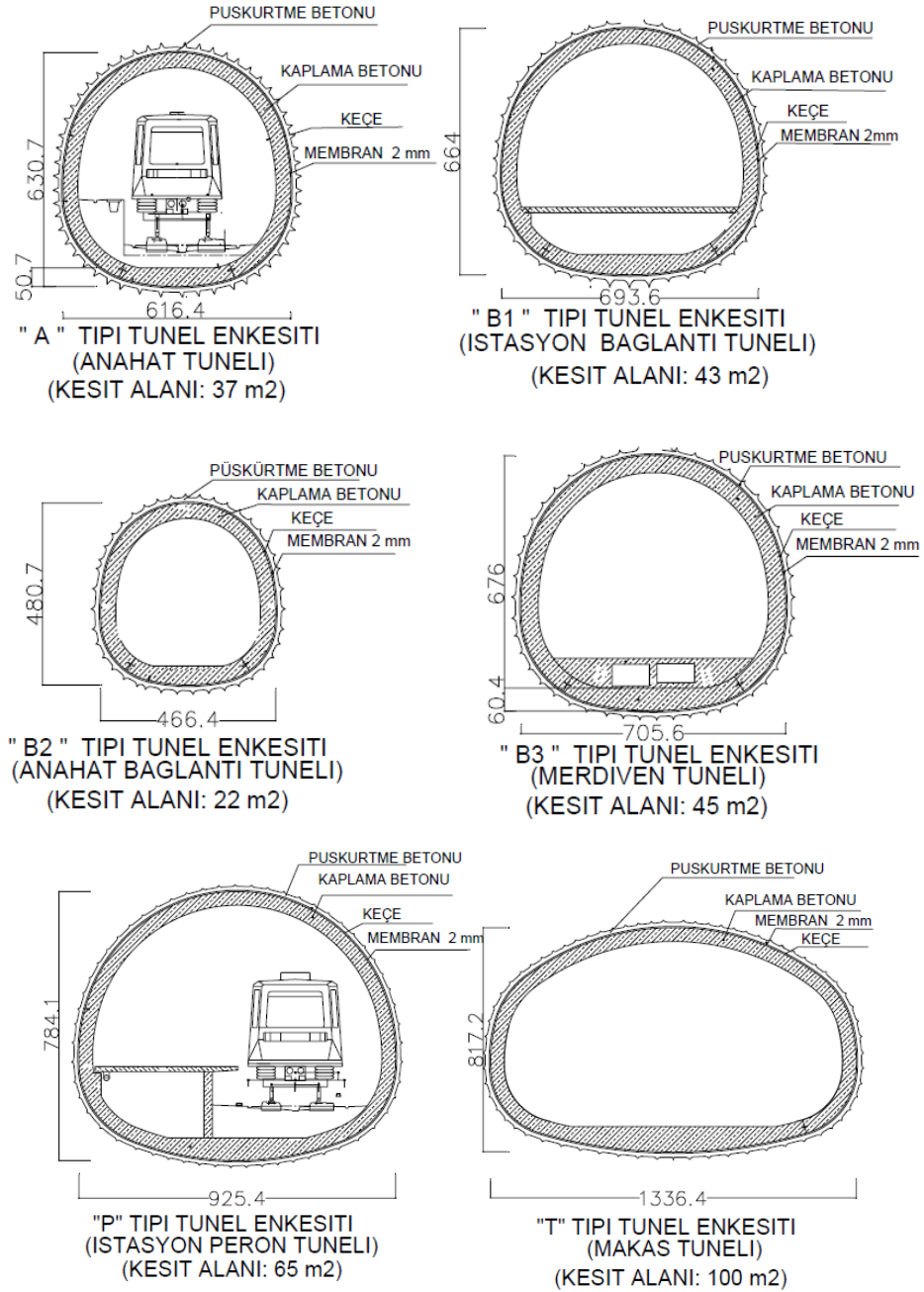


Şekil 2.19 ÜÜÇ Metro Projesi-Çarşı istasyonu P1 tüneli kazı-desteği

2.3.2.3. NATM Yöntemi ile Açılan Tünel Kesitleri

Tünel enkesiti; hatta çalıştırılacak trenlerin maksimum kapasitesi, tren ticari hızı, koltuk sayısı, konfor derecesi, araç sayısı, araç kapı sayısı, istasyon uzunluğu, tren dizilerinin takip aralıkları, sinyalizasyon durumu ve ücret toplama sistemlerine bağlıdır (Arnoğlu, 2008).

İstanbul Metrosu tünelleri gidiş-dönüş olmak üzere iki ayrı hat olarak açılmakta olup, 4 farklı tünel kesiti kullanılmaktadır. Bunlar, A (ana hat tünelleri), P (peron tünelleri), T (makas tünelleri) ve B tipi (bağlantı tünelleri) tünellerdir. Bu tünellerin tip kesitleri ve ortalama alanları Şekil 2.20’de verilmiştir.



Şekil 2.20 İstanbul Metrosunda uygulanan farklı tünel tip kesitleri

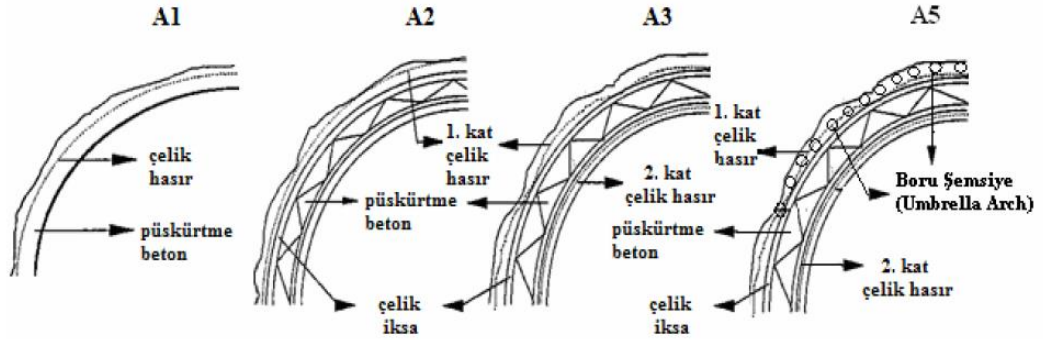
Kazı yapılan kayanın stabilitesi, tünel üstündeki örtü kalınlığı, tünel güzergâhı üzerindeki yapıların veya yapılaşmanın niteliği ve projelendirme aşamasında tünel içindeki gerilmelerin özellikle yoğunlaştığı bölgeler, kazı destekleme tipinin belirlenmesinde temel parametrelerdir.

Aynayı teşkil eden kayacın yapısal özellikleri ve su durumu stabiliteyi belirler. Eğer stabilite düşükse, buna bağlı olarak destekleme artırılır. Aynı şekilde örtü kalınlığı da, kazı destek oranıyla ters orantılıdır. Tünel içi gerilmelerin yoğunlaşması ve yüzeydeki yapı yoğunluğu ise destekleme oranı ile doğru orantılıdır. Çizelge 2’de İstanbul Metrosunda uygulanan kazı iksa sistemleri görülmektedir.

Çizelge 2. İstanbul Metrosunda uygulanan kazı iksa sistemleri

	A1	A2	A3	A5
ORTAM	Sağlam kaya	Orta-sağlam kaya	Zayıf kaya	Zemin
ÇELİK İKSA (kafes kiriş)	Yok	Var	Var	Var
ÇELİK HASIR	Tek kat (Q221/221)	Tek kat (Q221/221)	Çift kat (Q221/221)	Çift kat (Q377/221)
PÜSKÜRTME BETON	d=10-15 cm	d=20 cm	d=20 cm	d=25 cm
KAYA BULONU (adet) (şaşırtmalı)	4-5	6-7	7-8	—
ZEMİN ÇİVİSİ (adet)	—	—	—	Aynaya: 8-20 Yanlara: her iksada (3 sağ, 3 sol)
SÜREN (adet)	Yok	12 (ort.)	20 (ort.)	—
ŞEMSİYE BORUSU(adet)	—	—	—	23-27
KAZI ANO BOYU	1.5 m (maks.)	1-1.2 m	0.8-1 m	0.8 m

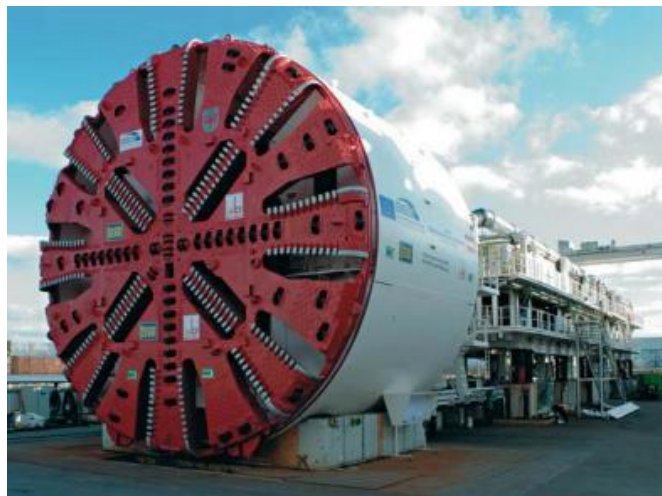
A1, A2, A3 ve A5 kazı iksa (destekleme) sistemlerinin şematik gösterimi ise Şekil 2.21’de verilmiştir. A1 kazı iksa sistemi sağlam kaya ortamını karakterize eder. A2 tipi kazı iksa sistemi orta sağlam-orta zayıf kaya ortamını karakterize eder. A3 tipi kazı iksa sistemi duraylılığı düşük, zayıf kaya ortamını karakterize eder. Kaya formasyonunda geniş kullanım alanı bulan A1, A2, A3 tipi iksa sistemlerinin, kohezyonu düşük zeminlerde istenilen performansı sağlayamadığının görülmesi üzerine, zayıf formasyonda uygulanabilmesi amacıyla A5 tipi iksa sistemi geliştirilmiştir (Ayış,2010).



Şekil 2.21 A1, A2, A3 ve A5 tipi kazı-destek sistemlerinin şematik gösterimi

2.3.3. Tünel Açma Makinesi (TBM) Metodu

Madencilik ve inşaat sektöründe yeraltı yapılarının önemi teknolojik gelişmelere paralel olarak gün geçtikçe artmaktadır. Özellikle yerleşim merkezleri ve büyük şehirlerde elektrik, su, kanalizasyon, telefon, doğalgaz ve metro tünelleri gibi yapıların açılması sırasında, çevreye ve yer üstünde yapılara zarar vermemesi için kullanılacak kazı yönteminin seçimi son derece önemlidir. Her ne kadar ilk yatırım maliyeti yüksek olsa da tam cepheli tünel açma makineleri (TBM) istenilmeyen yeraltı hareketlerini önleme kabiliyeti, daha sessiz, titreşimsiz ve hızlı çalışması nedeniyle günümüzde tercih edilen kazı makineleri haline gelmiştir. Sert, orta sert, yumuşak ve akıcı formasyonlar için farklı çalışma prensiplerine ve kesici kafa dizaynına sahip makineler üretilmektedir. Bu makinelerin seçimi proje başında verilmesi gereken bir karar olup yapılmış olan zemin etüdleri ve sondajlardan elde edilen verilerin ayrıntılı şekilde yorumlanması ve kazılacak jeolojiye uygun makine seçilmesi TBM ile kazının en önemli aşamalarından biridir. Şekil 2.22’de karışık zemin kazısına uygun tam cepheli tünel açma makinası gösterilmektedir (<http://www.herrenknecht.com/news/media-service/photo-archives.html>).



Şekil 2.22 Karışık zemin kazısına uygun tam cepheli tünel açma makinası

2.3.3.1. TBM'in Tarihsel Gelişimi

İlk tünel açma makinası imalatı ve uygulaması Amerika'da gerçekleşmiştir. Kesici kafa, kazılan malzemeyi uzaklaştırma sistemleri, itici (baskı) sistemler gibi özellikleri bünyesinde barındırmasına karşılık o zamanda kullanılan malzemelerin metalurjik yetersizliklerinden dolayı ilerlemeler oldukça zayıf kalmıştır.

1847'da ABD'de Talbot tarafından makine için disk kesicilerden istifade edilerek gelişim süreci başlatılmıştır.

1851'de ilk tünel açma makinesi A.B.D'de Hoosac tüneline kullanılmıştır (Şekil 2.23). Bu makine daire şeklinde döner bir kesme kafasına sahip olup, keski kolları konsantrik daireler çizerek kazı yapacak şekilde dizilmişlerdi. Bu makine, tutunma mekanizması, itme (baskı) mekanizması ve pası uzaklaştırma sistemlerinden oluşmaktaydı (<http://paulwmarino.org>, <https://www.wowamazing.com>).



Şekil 2.23 Hoosac tüneli

TBM'in esasını oluşturan sert kayalarda delgi işlemi, izleyen 100 yıl için yetersiz kalmış ve hiçbir gelişme olmamıştır. Bazı keski ve kesme cihazları ile donatılmış TBM'ler yumuşak kayalar ve kömür damarlarında denenmek istenmiş, fakat tatminkâr sonuçlara ulaşamamıştır.

1856-1857 yıllarında TBM, Wilson tarafından geliştirilmiş ve patentleri alınmıştır.

1871'de Brunton disk keskilere sahip ilk tam cephe kazı makinesini tasarladı (Stack,1982).

1875'de tamamıyla döner bir sistem ile donatılmış, sert zeminlerde üstün bir performans sergileyen ve tam cephe kazı yapabilen TBM tasarımı Beaumont tarafından yapılmış ve patenti alınmıştır. Bu tasarım İngilizler tarafından geliştirilmiş, 1880 yılında İngiliz kanal tüneli olan 38 km uzunluğundaki Manş tüneli kazısında (en uzun su altı tüneli) kullanılmıştır.

1950'lerin başında J.S. Robbins tarafından tasarlanan ilk TBM (Robbins makinesi) Washington'da Robbins şirketi tarafından üretilmiştir. Robbins, **1956** yılında kalem kesikler yerine döner disklerin kullanılma fikrini de ortaya atmıştır.

1956'da Robbins tarafından Toronto'da gerçekleştirilen uygulamada ilerleme hızı 38 m/gün olarak gerçekleşmiştir. Bu uygulama, TBM'lerin yumuşak ve orta sert kayalarda ekonomik olarak kullanılabileceğinin ilk göstergesi olmuştur (Friant ve Özdemir, 1994).

Toronto'daki uygulamayı izleyen 26 yıl boyunca teknoloji oldukça yavaş ilerlemiştir. TBM imalatçıları dene gör politikası izleyerek, makinelerin daha sert ve aşındırıcı kayalarda kullanılmasını sağlamaya çalışmışlardır.

2006 yılında yapımına başlanan Niagara tünel projesinde kayada çalışan dünyanın en büyük kazı çapına (14.4 m) sahip TBM kullanılmıştır. TBM'in disk kesici kafa sayısı 85, diske etki eden normal kuvvet 39 t/kesici, kesici kafa gücü 6330 HP, döndürme momenti 18800 kNm, hidrolik iticilerin (pistonların) maksimum uzunluğu 1.72m, kesici kafa itme basıncı 275.7 bar, delme ünitesi hariç TBM ağırlığı 1100 ton'dur.

2017 yılında ise E-Berk firması tarafından Türkiyede ilk yerli TBM üretilmiştir (<https://www.e-berk.com>), (Şekil 2. 24).



Şekil 2.24 İlk yerli TBM

2.3.3.2. TBM'in Performansı

Yer altı ulaşımında etkin yüklenici firmalar tünel imalatlarının çok olduğu metro ve demiryolu projelerine başlanılmadan önce TBM ile işin ne kadarını ne kadar zamanda yapabileceğini bilmek isterler. Trafik yoğunluğunun sıklıkla yaşandığı bazı güzergahlarda; hizmete bir an önce açılması arzu edilen metro projesi tünellerinde TBM performansları gözönüne alınarak kaç adet kullanılacağı belirlenir. Projelerde kullanılan TBM ile ilgili zaman içerisinde performansını etkileyen parametreler üzerinde çeşitli yaklaşımlar geliştirilmiştir. Şekil 2.25'te bakımı yapılmakta olan bir TBM görülmektedir.

TBM performansını etkileyen parametreler;

Kayaç Karakteristikleri

- Tek eksenli basınç dayanımı,
- Kayaç sağlamlığı (kayaç dokusu),
- Çatlak İndeksi,

Keski Geometrisi

- Çap,
- Ağız Genişliği

TBM Özellikleri

- Keski başına düşen baskı kuvveti,
- Keskiler arası mesafe,
- Güç (tork ve devir sayısı)



Şekil 2.25 Bakımı yapılmakta olan bir TBM

2.3.4. Zemin Basıncı Dengeleme Metodu (EPBM)

TBM teknolojisinde, kohezyonu düşük farklı ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altındaki zeminlerde ilerleme sırasında stabilite kaybı kaçınılmazdır. Kendini kısa süreli bile tutamayan gevşek formasyon kazılarında ayna stabilitesini sağlamak ve sistemin bütünlüğünü dengede tutmak için zemin denge basıncından yararlanılır (Kesici kafanın ilerlemesiyle ön kısmın stabilitesi de hemen gerisindeki çok sayıda piston tarafından sağlanır). Bu yöntem, Zemin Basıncı Dengeleme Yöntemi (Earth Pressure Balance Method) (EPBM) ismi verilir. Şekil 2.26’da Pekin Metrosuna ait bir EPB, TBM görülmektedir (www.tunneltalk.com).



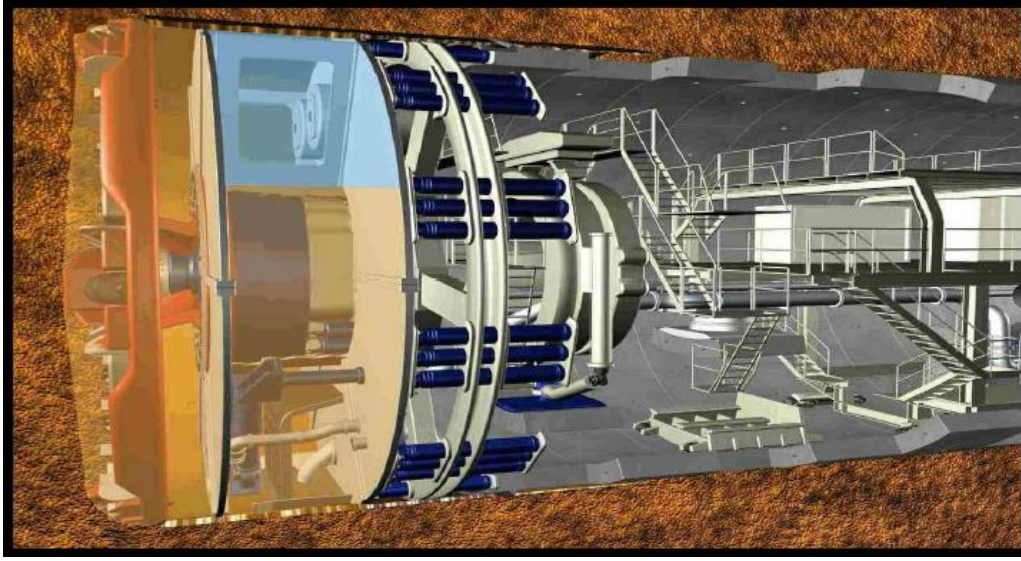
Şekil 2.26 Pekin Metrosunda kullanılan EPB makinası

2.3.4.1. EPBM’in Tarihsel Gelişimi

1824-1840 yılları arasında zayıf formasyonda TBM ile tünel açma teknolojisi, Thames nehrinin geçildiği Brunel şiltinden başlayarak, gelişim göstermiştir.

1864’de Peter Parlow, Brunel’in tasarımlarını geliştirerek dairevi şilt (kalkan) patenti aldı. Bu şilt içine yerleştirilen ön üretilmiş beton elemanların itilmesi suretiyle, basınç uygulanması ve ön tarafında çamur (pasa) akışı-uzaklaştırmayı temin edecek açıklığa sahiptir. Söz konusu makine, Arazi Basınç Dengeleme (EPB) Makinesi’nin ilk örneğidir (Bu şiltin bir benzeri ile 1869 yılında Thames nehri bir yılda geçilmiştir).

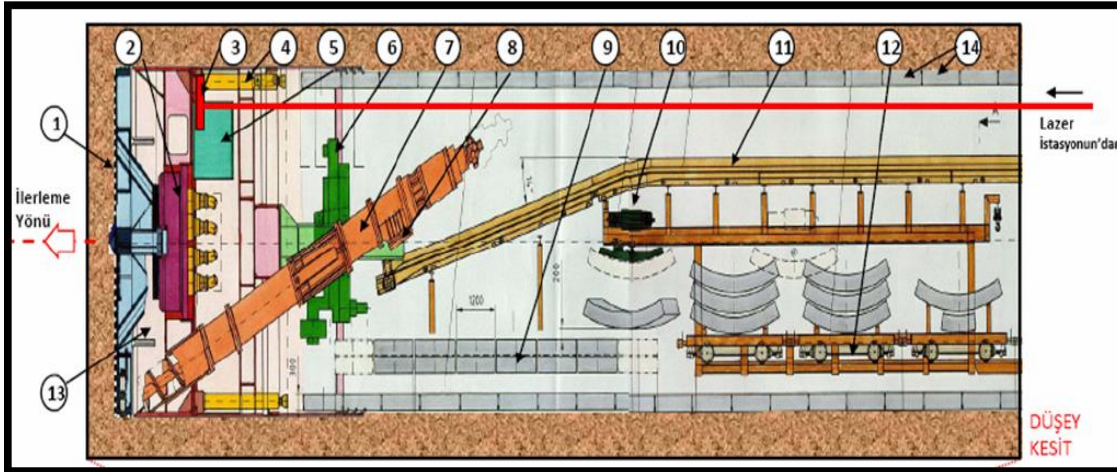
1960-1980 yılları arasında Japonya’da yeraltında nakliye ağı genişletilirken, şilt türlerinden yüzlercesi üretilmiştir (Çınar ve Feridunoğlu, 1994). Şekil 2.27’de EPB makinasının boyuna kesiti verilmektedir.



Şekil 2.27 EPBM'in boyuna kesit görünümü

2.3.4.2. EPBM ile Tünel Açma ve Kazı Destekleme Sistemi

Temel çalışma prensibi, “kesici kafa ve ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması” olarak tanımlanabilir. Akıcı formasyon, döner kafadaki kesiciler tarafından kazılır. Formasyonu destekleme basıncı, kesici kafa haznesinin kazılan malzeme ile doldurulmasıyla meydana getirilen basınç duvarı yoluyla aynaya transfer edilir. Ayna, daha fazla yük alamadığı anda denge sağlanmış olur (Arioğlu vd., 2002), (Şekil 2.28).



Şekil 2.28 EPBM kısımları

- | | | |
|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 1-Kesici Kafa | 6-Montaj Aparatı | 11-Konveyör |
| 2-Tahrik Ünitesi (Motor) | 7-Vidalı Konveyör | 12-Taşıma Dekovili |
| 3-Elektronik Hedef Panosu | 8-Vidalı Konveyör Kapağı | 13-Basınçlı Bölüm |
| 4- İtici Silindir | 9-Segment Besleme Ünitesi | 14-Yerleştirilmiş Segmentler |
| 5-Hava Kilidi | 10-Segment Vinci | |

EPB makineleri çalışma prensiplerine bağı olarak çeşitli isimler alır: Malzeme Hapsedici Şiltleri (Soil Confinement Shields), Su Basıncını Destekleme Şiltleri (Water Pressure Balance Shields), Yüksek Yoğunluktaki Çamur Şiltleri (High Density Slurry Shields) ve Çamur Şiltleri (Mud Shields).

EPB makineleri aşağıdaki özelliklere sahiptir:

- 4 bar (0.4 MPa)'a kadar ulaşan basınç altında çalışabilir.
- Formasyonu destekleme basıncı, sağlanan dengenin üzerine çıkarsa formasyon çok daha sağlam bir hale gelecektir. Tünel yeryüzüne yakınsa çok fazla uygulanan basınç nedeni ile yüzeyde kabarmalar görülebilir.
- Kazılan malzeme, bir vida (burgu) konveyör vasıtası ile kesici kafa haznesinden çıkarılır. Malzeme çıkış hızı, makine ilerleme hızına eşit olmalıdır; zemin oturmalarına yol açabilecek fazla malzeme çıkışına izin verilmez.
- Malzeme, basıncı sağlayabilecek ve konveyörle taşınacak kıvamda değilse, ya kazı aynasında iken doğrudan ya da kesici kafa haznesine alındıktan sonra kıvamlaştırıcı katkı maddeleri enjekte etmek gerekebilir.
- Tünel boyunca taşıma, bant konveyörlerle, vagonlarla, damperli kamyonlarla ya da borular içerisine taşınmayı kolaylaştıran bir katkı maddesi eklendikten sonra katı taşıma pompaları yardımıyla yapılabilir.
- Çalışmalarındaki basitlik ve uygulama alanlarının genişliğinden dolayı, giderek çamur makinelerin (slurry machines) yerlerini almaktadır.
- En iyi çalışma koşulları arazi nemlilik oranının % 10-15 veya daha az olduğu durumlardır. Şekil 2.29'da EPB, TBM ile kaplaması yapılan Prag Metrosuna ait anahat tüneli yer almaktadır.



Şekil 2.29 EPBM ile tünel kaplaması (Prag Metrosu)

2.3.5. Aç-Kapa Metodu

Metro tünellerinin güzergâh itibariyle ana yolların altından geçtiği yüzeye yakın kısımları, çıkış tünelleri, kanalizasyon ve içme suyu tünelleri ile yer altı geçitlerin (yaya, menfez vb.) inşası, aç-kapa yöntemi ile açılabilir. Aç-kapa yöntemi, diğer yöntemlere nazaran daha basit ve ekonomik bir yöntem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bu yöntemde önce kazı boşluğu çevresi betonarme kazık veya betonarme perde duvar ile desteklendikten sonra, yüzeyden hendek şeklinde kazılarak açılır. Yeraltı suları yüzeye yakınsa yeraltı su seviyesi düşürülür veya su, derin kuyulara drene edilir. Tamamen açık havadaki duvar, örme usullerine göre yapılır. Tavanın oluşturulmasında eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik varsa bir kemer oluşturulur ve bu kemer kısmı da açık havada oluşturulacağından fazla güçlüklerle karşılaşmaz. Eğer yeryüzünden yeteri kadar derinlik yoksa betonarme bir tavan oluşturulabilir.

Aç-Kapa tünel açma yönteminin diğer yöntemlerden farkı, tavanda çökme (tasman) oluşmamasıdır. Bu nedenle çevredeki yapılara zarar vermeden geçilmesi mümkündür. Ayrıca diğer yöntemlerle yeteri kadar yapılamayan izolasyon işlemi bu yöntemle kolaylıkla yapılabilir (Palmstorn vd., 1988).

Aç-Kapa yönteminin birçok dezavantaj oluşturan yanları da mevcuttur. Bunlar; İstasyon olarak belirlenen arazinin kamulaştırma maliyetleri, altyapı deplase işi ve deplase işi için harcanan süre ve kazı derinliği yüksek olan istasyonların etrafındaki komşu yapılarda deformasyon oluşturma tehlikesidir. Bu dezavantajların yanısıra yerleşim alanları içerisinde yapılan kazı çalışmaları, gürültü ve trafiğin engellenmesi gibi zararları nedeniyle sosyal hayatı olumsuz etkilemektedir. Şekil 2.30'da Aç-kapa yöntemi ile inşa edilen bir istasyon yer almaktadır (www.tekfenmuhendislik.com).



Şekil 2.30 Aç-Kapa metodu kullanılarak inşa edilen istasyon

3. PÜSKÜRTME BETON

Püskürtme beton; klasik dökme betona göre kalıp gerektirmeden yerleştirilmesi, katkılar (priz hızlandırıcı) yardımıyla hızlıca taşıyıcılık özelliğinin sağlanması gibi önemli avantajlara haiz olmasından dolayı kullanımı her geçen gün artmakta ve özellikle yer altı yapılarında (Tünel kazı destek, kazı-iksa destek vs.) kullanımı kaçınılmaz hale gelmiştir. Püskürtme beton, yer altı yapılarının yanısıra şevlerde, tarihi ve hasarlı yapıların güçlendirilmesi ve onarımında da yaygın olarak kullanılmaktadır. Şekil 3.1’de püskürtme beton ile tünel kazı-destek uygulaması görülmektedir.



Şekil 3.1 a) Tünel tahkimatı



b) Kazı sonrası destek

3.1. Püskürtme Beton (Shotcrete)’un Tanımı ve Tarihçesi

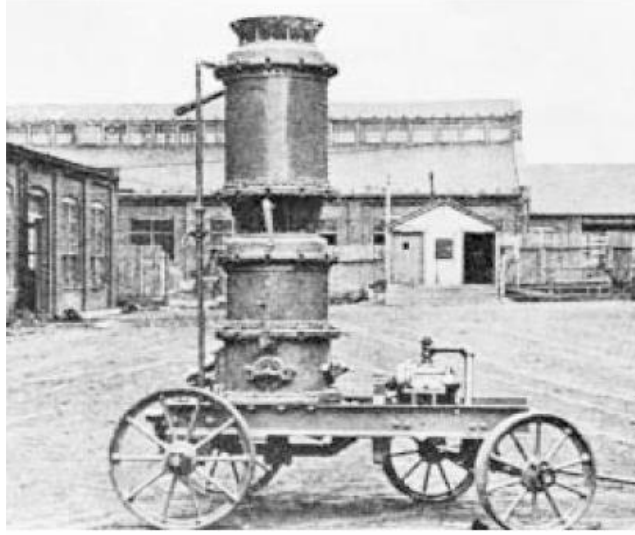
Püskürtme betonu kısaca agrega, çimento, su ve priz hızlandırıcı katkı karışımının yeterli basınçlı hava desteği ile uygun borularda taşınan, yüzeye püskürtme ile yerleşen beton olarak tanımlamak mümkündür.

Tarihçesine bakıldığında, 19.yüzyılda çimentonun icadı ve inşaat işlerinde kullanılması ile birlikte betonun kalıplı veya kalıpsız yerleştirilme ihtiyacı insanlığı yeni buluşlara yöneltmiştir.

1824 yılında J. Aspdin tarafından Portland çimentosu kil ve kalkerin birlikte pişirilmesi ile keşfedildi. Ancak bu «klinker» olarak adlandırılan pişmiş kalker cürufu su ile temasında hızla donuyordu. Tesadüfen alçı taşı ile birlikte öğütüldüğünde oluşan etrinjit bir “Dormant period” sağladı. Beton karışımının

hazırlanmasından yerleştirilmesine kadar geçen bu uyku süresi modern beton teknolojisi için dönüm noktası olmuştur.

1907 yılında, Carl Ethan Akeley, ismini verdiği püskürtme beton aleti (Şekil 3.2) ve tabancasının (Cement Gun) ilk modelini bir dinazor iskeletini kaplamak üzere geliştirdi (Karakuş ve Fowell, 2004), (www.shotcrete.org).



Şekil 3.2 1907 yılında geliştirilen püskürtme beton aleti

Akeley tarafından geliştirilen iki bölümlü çimento tabancası ile **1910** yılında püskürtme beton ilk defa inşaat sektörüne girmiştir. Püskürtme beton, tabanca sistemi kullanılarak basınçlı hava yardımıyla yüzeye püskürtülerek uygulanmıştır (Şekil 3.3).



Şekil 3.3 Tabanca sistemi kullanılarak püskürtme betonun yüzeye uygulanması

Ekipmanın **1911** yılında patenti alınmış, kum-çimento karışımına gunite adı verilmiştir. Takip eden yıllarda, cuncret, pneocret, plascirete, letcrete gibi isimler verilmiş ve küçük çapta üretime başlanmıştır.

1930'lu yılların ilk döneminde, Amerikan Demiryolları Mühendisler Birliği (American Railway Engineering Association, AREA) gunite üretimine shotcrete adını vermiştir. Günümüzde de bu isim aynen kullanılmaktadır.

1931 yılında, Amerikan Beton Enstitüsü (ACI), kuru üretim püskürtme beton tarifini yapmıştır. Kuru üretim püskürtme beton, ince ve iri agrega ile çimento karışımından oluşmaktadır.

1950 yılından bu yana, besleme bandı, kuru üretim miktarı, yaş üretim ve püskürtme ekipmanlarında önemli gelişmeler olmuştur.

1960'lardan sonra ilkeleri Rabcewicz ve arkadaşları tarafından ortaya konulan Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)'nde püskürtme beton; hızlı yerleştirilebilmesi, değişik zemin koşulları ve kesit geometrilerine kolaylıkla uyum sağlaması nedeni ile hasır çelik ve kaya bulonundan oluşan destekleme sisteminin ayrılmaz bir parçası haline gelmiştir. 1970'lerden sonra hasır çeliğin yerine çelik lif kullanılmaya başlanmıştır.

Ülkemizde 40 yıl gibi bir uygulama pratiği olan püskürtme beton, işveren idareleri, proje, danışmanlık ve uygulama firmaları, malzeme ve ekipman tedarik firmaları ile binlerce kişinin çalıştığı apayrı bir sektör konumundadır.

Püskürtme beton ve teknolojisi tünel ve yeraltı yapılarında tahkimat amaçlı beton için vazgeçilemez bir araçtır.

3.2. Püskürtme Betonun İşlevsel Özellikleri

Kaya mekaniği açısından yukarıda belirtilen avantajların yanı sıra püskürtme betonun uygulama açısından sağladığı yararlar (Arioğlu vd., 2008) ise şöyle özetlenebilir:

- ❖ Kazı yüzeyine açılır açılmaz hemen uygulanabilir.
- ❖ Betonun yerleştirilmesi ve sıkıştırılması bir arada yapılır.
- ❖ Kalıp gerektirmeden yerleştirildiği için malzeme ve işçilik tasarrufu sağlar.
- ❖ Yüksek uygulama hızına sahiptir ve farklı çalışma koşullarında istenilen kalınlık sağlanabilir.
- ❖ Farklı boyut ve geometrideki açıklık kesitlerinde uygulanabilir.

3.2.1. Püskürtme Beton Kaplamanın İşlevleri

- ❖ Püskürtme beton kaplaması, kazılan yüzeylerin hava ve su ile temasını keserek yüzeyin bozulmasını ve gevşemeleri önler.
- ❖ Püskürtülen taze beton, kırık ve çatlaklar arasına girerek süreksizlik noktalarındaki gerilme yoğunluklarını azaltırken, kayacın yerindeki kayma dayanımını artırır.
- ❖ Püskürtme beton sağladığı yapışma ve kayma direnci vasıtası ile kırık ve çatlaklarla sınırlanmış kaya bloklarının oluşturduğu yük çevresindeki kaya kütlelerine aktarılacak kayanın kendi kendini taşıması sağlanmış olur.
- ❖ Kaya parçaları arasındaki bağlayıcılık oldukça düşük ise, yüzeye uygulanan püskürtme beton kaplaması statik bakımdan bir kabuk gibi çalışarak taşıyıcılık sağlar.
- ❖ Çöken, gevşeyen arazi tabakalarına karşı erken dayanım göstererek iyi bir kemerleşme sağlar ve dayanımının zamanla artmasıyla gevşemeleri önleyip deformasyonları minimize eder (Mahar vd., 1975; Cecil, 1970).

Şekil 3.4'te püskürtme beton uygulaması ile tünel tahkimatı (kazı-destek) gösterilmektedir (<https://www.normet.com>).



Şekil 3.4 Püskürtme beton uygulaması

3.3. Püskürtme Beton Uygulama Metodları

Püskürtme beton, karışım tasarımı, taşıma ve yerleştirmede kullanılan ekipman, karışım bileşenlerinin ilave edilme şekli ve zamanı açısından farklılıklar gösterir. Dolayısıyla püskürtme beton, yaş karışım ve kuru karışım sistemleri olarak iki farklı şekilde uygulanır.

Her ne kadar iki yöntemle de başarılı uygulamalar yapmak mümkün olsa da, yaş yöntemde uygulama sırasında tozlanma ve geri sekme (rebound) kuru yöntemle göre daha az olur.

3.3.1. Kuru Sistem Püskürtme Betonu

Kuru karışımda, belirlenen oranlarda hazırlanan çimento ve agrega karışımı, püskürtme beton makinesine kuru olarak beslenir. Bu sistemdeki uygulama, beton santralinden kuru olarak alınan karışıma, tabanca ucundan basınçlı su ilave edilerek yapılır.

Kuru karışım püskürtme beton sisteminin başlıca özellikleri şunlardır (www.beksa.com.tr ; Gürol ve Doyuran, 2009) :

- Bu yöntem küçük ve basit ekipmanlar kullanılması nedeniyle düşük hacimli uygulamalarda yaygın olarak kullanılmaktadır.
- Karışıma eklenecek olan priz hızlandırıcı sıvı halde ise tabanca ucundan su ile birlikte, toz halde ise püskürtme beton makinesine besleme sırasında dozaj ünitesi ile ilave edilir.
- Çimentonun agregayı iyice sarması ve toz oluşumunun önlenmesi açısından agreganın, ağırlığının % 3-8' i oranında nem içermesi istenir.
- Su/çimento oranı, 0.40-0.45 aralığında olmalıdır.
- Karışıma lif eklenecekse, karışım hazırlama aşamasında ilave edilmelidir.
- Kuru karışımı, tabancadan geçerken tamamen ıslanmalı ve su basıncı (en az 6 kg/cm²) bunu sağlayacak şekilde ayarlanmalıdır.
- Püskürtme ucuna malzeme taşıyan hortum çapı, en büyük agrega çapının (maks.19 mm) en az 3 katı olmalıdır.
- Nozül genellikle elle tutularak, yüzeye operatör tarafından yönlendirilmektedir.

Dezavantajları ise şunlardır:

- Püskürtme sırasındaki toz oluşumu, iş yeri güvenliği ve işçi sağlığı açısından olumsuz bir durumdur.
- Karışıma ilave edilen su miktarı iyi ayarlanmalıdır, az su verilmesi durumunda, toz problemi, fazla su verilmesi halinde ise betonun yüzeyden akma sorunu yaşanır.
- Uygulama ekonomisini etkileyen en önemli unsur, geri sıçrama oranının yüksek olmasıdır. Geri sıçrama miktarı; karışım bileşenleri, uygulama yüzeyinin konumu ve operatörün deneyimine bağlı olarak %15-35 arasında değişebilmektedir (Melbye,2006).

3.3.2. Yaş Sistem Püskürtme Betonu

Yaş püskürtme beton uygulamasında karışım, beton santralinde ıslak olarak hazırlanıp, beton pompasına beslenir. Bu sistem, hortum ve basınçlı hava yardımıyla püskürtme ucuna iletilen agrega, çimento ve su ıslak karışımının bu uçta verilen basınçlı hava ile betonun yüksek bir hızla (35-45 m/sn) püskürmesini sağlar.

Bu sistemde püskürtülen beton yüzeyi ile püskürtme beton tabancası arasındaki mesafe (0.6-1.8 m) betonun kıvamına göre en iyi sonucu alacak şekilde operatör tarafından ayarlanır. Amaç, geri sıçramayı en aza indirmek ve en iyi yerleşimi sağlamaktır. Basınçlı havaya ayrıca priz hızlandırıcı katkı katılır. Böylelikle püskürtülen alanda hemen priz alması sağlanır. Kuru karışıma göre daha az geri tepme ve daha homojendir. Beton santralinde daha denetimli hazırlanması, kuru sisteme göre çok daha az toz oluşturması diğer avantajlarından bir kaçıdır. Şekil 3.5'te tünel kaplamasında yaş sistem ile püskürtme beton uygulaması görülmektedir (<https://www.normet.com>).



Şekil 3.5 Yaş püskürtme beton uygulaması

3.3.3. Kuru ve Yaş Püskürtme Beton Karışımlarının Mukayesesi

Kuru karışım sistemi; yaş karışım sistemine göre küçük çaplı üretimlerde daha ekonomik olduğundan yaygın kullanılmaktadır. Buna karşılık; kalite, geri sıçramanın az olması (% 5-10) ve kapasite (10-18 m³/saat) bakımından büyük çaplı üretimlerde, yaş sistemin kuru sisteme göre üstünlükleri bulunmaktadır. Kuru ve yaş püskürtme beton sistemleri, maliyet, ekipman, uygulama, geri sıçrama, kalite, toz ve kapasite faktörleri göz önüne alınarak Çizelge 3'te karşılaştırılmıştır (Girgin vd., 1998).

Çizelge 3. Kuru ve yaş püskürtme sistemlerinin karşılaştırılması

FAKTÖR	KURU SİSTEM	YAŞ SİSTEM
UYGULAMA	-Küçük ölçekli sık ve değişken destekleme işlemlerinin yer aldığı uygulamalar için daha elverişlidir.	-Büyük ölçekli ve daha rutin işlemlerin yer aldığı destekleme için daha elverişlidir.
EKİPMAN	-Daha ekonomik ve küçük yapıda, esnek donanımlara sahiptir. -Toplam yatırım maliyeti daha az, bakımı kolaydır.	-Daha büyük yapılarda, az sayıda fakat toplam yatırım maliyeti 3-10 kat fazla olan makineler gerektirir.
KAPASİTE, VERİM	-Küçük kapasiteli (5 m ³ /saat) ise düşük verimlidir. -İletim mesafesi daha kısadır (50-100m)	-Büyük kapasiteli (10-18m ³ /saat) -Daha verimli ancak iletim mesafesi kısadır.
KARIŞIM HAZIRLAMA	-Küçük kapasiteli karışım hazırlama ekipmanları ile yerinde hazırlanabilir. -Islak ortamda fazla bekletilmez.	-Beton santralinde daha denetimli beton hazırlanabilir. -Hazır beton kullanılabilir. -İletim süresi kısadır.
TOZ OLUŞUMU	-İş yeri çalışma konforunu azaltır. İşçi sağlığı problemlerine yol açar. -Nemli agrega ve toz azaltma katkıları ile azaltılabilir.	-Çok az toz meydana gelir.
KALİTE KONTROL	-Düşük su/çimento oranlarında üretim yapılabilir. -Su miktarı ayarlanabilir, ancak bu operatörün deneyimine bağlıdır.	-Su miktarı sabit olup, daha üniform bir karışım uygulanır. -Pompalanabilirlik koşullarından dolayı düşük su/çimento oranlarında çalışmaz.
GERİ SIÇRAMA	Duvar % 15-40 Tavanda % 20-50	Her yüzeyde % 5-10

3.4. Püskürtme Betonda Priz Hızlandırıcı Kullanımı

Priz hızlandırıcılar kuru ve yaş püskürtme beton uygulamalarında gittikçe daha sık kullanılmaktadır. Hızlandırıcılar priz süresini kısaltmak, erken dayanımı arttırmak, püskürtme betonun yüzeye yapışma kalitesini iyileştirmek ve geri sıçramayı azaltmak amacıyla kullanılır. Priz hızlandırıcıların performansı; çimentonun kimyasal bileşimi, mineral katkıların cinsi ve dozajı, beton ve ortamın sıcaklığına bağlı olarak değişir. Püskürtme betonda kullanılan priz hızlandırıcı katkı türleri;

- Alkali İçeren Priz Hızlandırıcılar,
- Alkali İçermeyen Priz Hızlandırıcılar,

olmak üzere iki ana grupta incelenebilir. Priz hızlandırıcı katkıların genel özellikleri Çizelge 4'te verilmiştir (Arioğlu vd., 2008).

Alkali içeren hızlandırıcı kullanılması durumunda söz konusu bazı problemler şunlardır :

- Artan kullanım dozajına da bağlı olarak, 28 günlük dayanımda kontrol numunesine oranla, % 20-50 oranında azalma görülmesi,
- Yüksek pH seviyesinin deri, solunum yolları ve gözde şiddetli tahriş ve yanıklar oluşturması,
- Alkali-agrega reaksiyon riski,

Bu sorunlara çözüm olarak son dönemlerde alkali içermeyen priz hızlandırıcılar geliştirilmiştir. Buna paralel olarak şartnamelerine ve yönetmeliklere alkali içeren hızlandırıcılar için sınırlamalar getirilmiştir.

Çizelge 4. Priz hızlandırıcı katkıların genel özellikleri

Özellik	Değer	Kaynak
Priz Süresi: Priz Başlangıcı Priz Sonu	≤ 10 dk. 3-10 dk. ≤ 60 dk. 9-30 dk.	EN 196-3 Malmberg, 1993 EN 196-3 Malmberg, 1993
Alkali İçeren Priz Hızlandırıcı Priz Başlangıcı Priz Sonu	< 60 sn. < 3.5 dk.	Melbye, 2006
Alkali İçermeyen Priz Hızlandırıcı Priz Başlangıcı Priz Sonu	< 4 dak. < 8 dak.	Melbye, 2006
Al_2O_3 içeriği	Hızlandırıcı dozajı x Al_2O_3 içeriği < 115	
Basınç Dayanımında Azalma	$\leq \% 45$ -toz katkı- $\leq \% 30$ -sıvı katkı- $\leq \% 25$	ACS, 1990 EFNARC, 1999
Suda Çözünebilir Maddeler: Alüminat Klorür	$\leq \% 3$ (püskürtme betonla temasta suda $SO_4 > 600$ mg/1) $< \% 1$	ACS, 1990
Sülfat içeriği (SO_3)	$< \% 4.8$	ACS, 2006
Eşdeğer Na_2O içeriği	$< \% 1$	ACS, 2006
pH	$3 < pH < 8$	ACS, 2006
Uygunluk Testi: Proktor testi	≥ 110 N, (10 dk'da)	EFNARC, 1992
ACS=Avusturya Beton Birliği, EFNARC=Avrupa Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Federasyonu		

3.5. Püskürtme Beton Karışımında Puzolanik Katkı Kullanımı

Puzolanik katkılar püskürtme betonda;

- Agrega boyut dağılımını optimize etmesi,
- Bağlayıcı madde içeriğinin artırılması,
- Taze veya sertleşmiş betonun dayanım ve dayanıklılığının artırılması,

- Geri sıçrama oranının azaltılması,
- Priz hızlandırıcı miktarının değiştirilmesi amacıyla kullanılırlar.

Puzzolanik katkı maddesi olarak püskürtme betonda;

- Silis Dumanı,
- Uçucu Kül,
- Öğütülmüş Fırın Cürufu

kullanılmaktadır. Uçucu kül ve yüksek fırın cürufu kullanımı aynı zamanda çimento maliyetinde tasarruf sağlamaktadır.

3.6. Püskürtme Betonlarda Lif Kullanımı

Günümüzde betonun değişik alanlarda kullanılma ihtiyacının ortaya çıkması, beton teknolojisinde gelişmelerin yaşanmasına neden olmuştur. Özellikle 1800’lü yılların ikinci yarısından itibaren, çeliğin beton içerisinde kullanılması ile gelişen betonarme teknolojisi, bir yapı malzemesi olarak betonun kullanım alanlarını oldukça genişletmiştir. Beton teknolojisinde lif malzemeler, betonun çekme dayanımını arttırmak amacıyla ilk olarak 1900’lü yılların başında kullanılmıştır (Yurdakul, 2001). Taze beton içerisine değişik miktarlarda katılan lifler; çelik, plastik ve cam gibi değişik malzemelerden oluşan farklı tip ve boyutlarda üretilebilir. Çizelge 5’te görülen lif tipleri içinde en yaygın kullanılan çelik lif olmakla birlikte sentetik lifler (polipropilen, polivinil alkol vb.) de püskürtme betonda yaygın olarak kullanılmaktadır (DSİ, 1994).

Çizelge 5. Değişik lif tiplerine ait mekanik büyüklükler

Lif Cinsi	Çekme Dayanımı (MPa)	Elastisite Modülü (GPa)	Maksimum Şekil Değiştirme (%)	Yoğunluk (ton/m ³)
Çelik	1100-2760	200	0.5-35	7.8
Polipropilen	552-759	3.5	25	0.9
Akrilik	207-414	2.1	25-45	1.1
Asbestler	552-966	83-138	0.6	3.2
Pamuk	414-690	4.8	3-10	1.5
Cam	1035-3795	69	1.5-35	2.5
Naylon	759-828	4.1	16-20	1.1
Polyester	724-863	8.3	11-13	1.4
Pamuk-Yün	414-621	6.9	10-25	1.5

3.6.1. Çelik Lifli Püskürtme Beton

Çelik lifli püskürtme beton, içinde homojen dağılmış çelik lifler bulunan ve basınçlı hava ile uygulanacak yüzeye, yüksek hızla püskürtülen harç veya betondur. Püskürtme betonda çelik liflerin kullanımındaki öncelikli amaç, çelik hasır donatının yerleştirilmesindeki zorlukların ve zaman kayıplarının azaltılması, hatta ortadan kaldırılmasıdır.

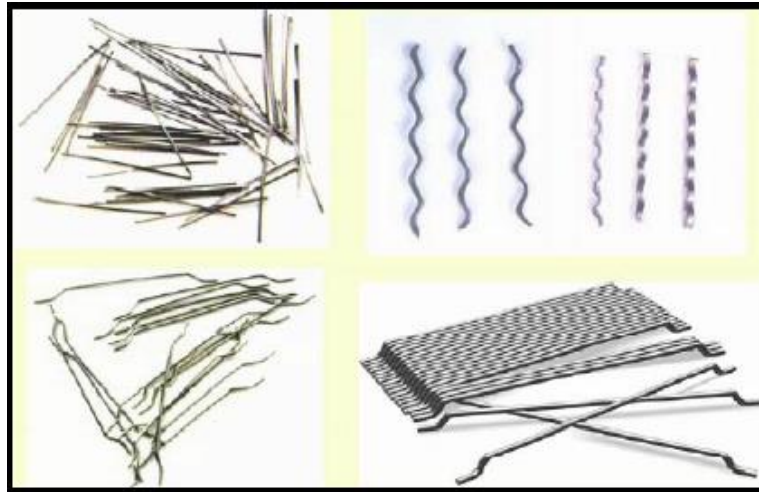
Çelik liflerle güçlendirilmiş püskürtme betonun yeraltı tahkimatlarında ilk uygulamaları, Kuzey Amerika'da **1970**'li yıllarda başlamıştır. İlk uygulamalarda, çelik lif olarak 0.25 mm çapında ve 25 mm uzunluğundaki düzgün teller kullanılmış, çimento ile agrega karışımına ağırlıkça % 3-6 arasında katılmıştır (Yurdakul, 2001). Çelik lif, **1973** yılında ilk kez bir yaklaşım tüneline (Rivie Barajı, Idaho, ABD) uygulanmıştır (Özbayoğlu ve Kenet, 1989). **1980**'lerden sonra, çelik lifli püskürtme betonun mühendislik özellikleri üzerinde yapılan çok sayıda araştırmaya paralel olarak üniform karıştırmayı sağlayan besleme ekipmanlarının da geliştirilmesiyle, çelik lif'in betonda kullanımı yaygınlaşmıştır.

EFNARC (Yapı Kimyasalları ve Beton Sistemleri Federasyonu), **1999**'da çelik lifleri üretim şekline göre;

- soğuk çekilmiş tel,
- levhadan kesilmiş lif,
- çelikten haddelenmiş lif,
- diğer çelik lifler

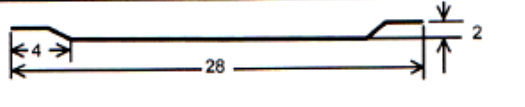
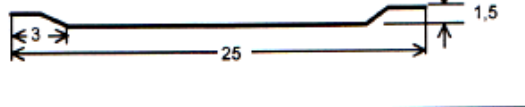
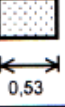
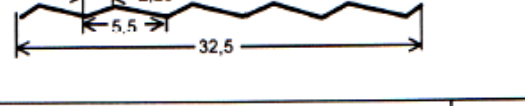
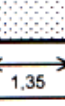
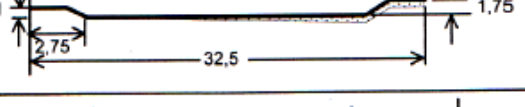
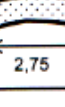
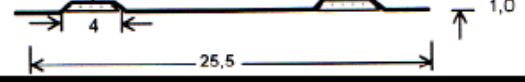
olmak üzere dört gruba ayırmıştır.

Yüksek sıcaklık ve korozyon etkilerine maruz uygulamalarda galvanizli çelik lifler tercih edilmektedir. Çelik liflere dairesel, kare veya dikdörtgen kesitlerde; düz, dalgalı veya kanca biçiminde bükülerek şekil verilmektedir. Şekil 3.6'da farklı şekillerdeki çelik lif tipleri görülmektedir (www.beksa.com.tr).



Şekil 3.6 Çelik lif tipleri

Aşağıda Şekil 3.7’de tipik çelik lif tipleri ve boyutları yer almaktadır (Banthia vd., 1994).

L ₁		 (mm)
L ₂		 (mm)
L ₃		 (mm)
L ₂		 (mm)
L ₅		 (mm)

Şekil 3.7 Tipik çelik lif tipleri ve boyutları

Betonda çelik lif kullanımının başlıca beş yararı vardır. Bunlar;

- Yüksek taşıma kapasitesi ve enerji yutma kapasitesine sahip sünek beton elde edilmesi,
- Donatı korozyonunun oluşmadığı düzgün beton yüzeyinin elde edilmesi,
- Etkin çatlak kontrolünün yapılabilmesi,
- Dayanıklılığın artırılması, darbe dayanımı 10-15 kat artar.
- Donatı işçiliğinde belirgin azalma olması,
- Tekrarlı yükler altında; E-modülü çok az etkilenir.
- Betonun tokluğu, çatlak sonrası enerji yutma kapasitesi artar.

şeklinde sıralanmaktadır.

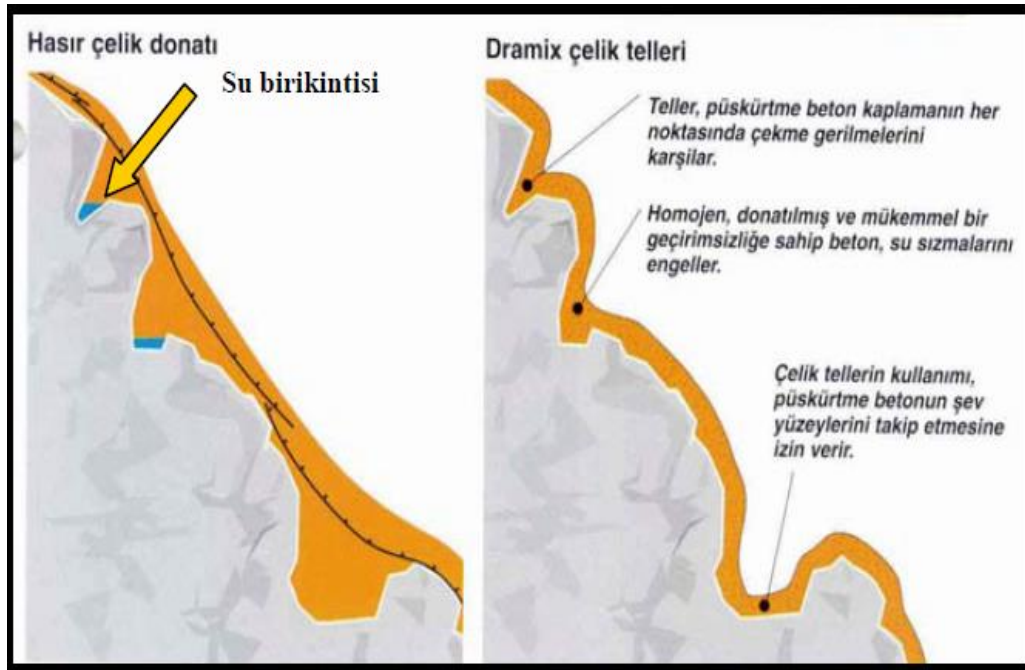
Çelik lifler, beton içinde yüzey ve kenarlarda dâhil olmak üzere homojen biçimde dağılır. Betonun sertleşmesi sırasında hidrasyon süreci, malzeme içinde sayısız küçük boşluklara ve çatlaklara neden olur. Çekme gerilmelerinin rastlantısal doğasına çelik liflerin karşı koyması; rötre çatlaklarının oluşması, şekillenmesi veya oluştu ise daha fazla büyümesini engellemektedir (Taşdemir vd., 2007).

Çelik lif donatılı püskürtme betonun performansı, lifin uzunluk/çap oranı (l/d), dozajı (% 0.4-1), geometrik biçimi ve kopma dayanımına bağlıdır. Püskürtme betonda çelik liflerin uzunluk/çap oranı ve dozaj arttıkça eğilme dayanımı, darbe ve çatlak dayanımı ile enerji yutma kapasitesi artar. Buna karşın liflerin betona karıştırılması ve püskürtülmesi zorlaşır. Lifler, betondan kolayca sıyrılmanın engellenmesi ve matrisin mekanik büyüklüklerin artırılması açısından yeterli uzunlukta olmalıdır. Lif çapı,

lifler arası boşluk ile doğru orantılıdır. Lif çapındaki azalma, birim hacim ve birim ağırlığa düşen lif adedini artırır. Çelik lif uzunluğu, çatlak başladığında iki komşu agrega arasındaki boşlukta köprü oluşturabilmesi için, maksimum agrega boyutunun ~3 katı olmalıdır. Püskürtme beton karışımlarında seçilen maksimum agrega boyutu genellikle 10-12 mm, çelik lif uzunluğu ise 30-35 mm' dir (ITA Report WG12).

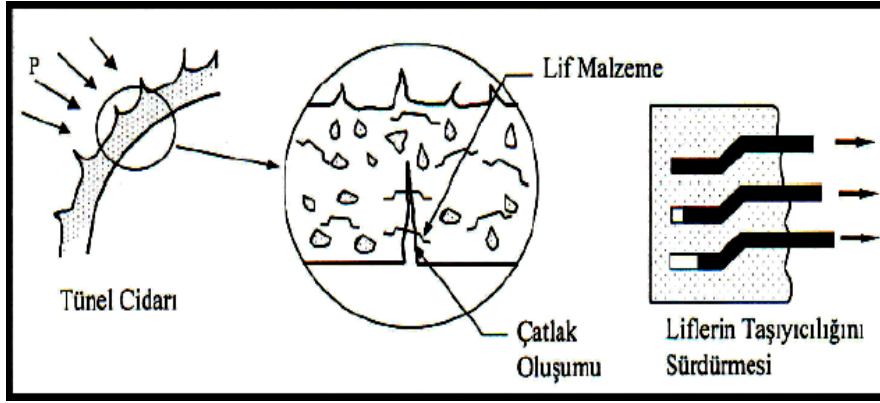
Çelik lifli püskürtme beton, uluslararası tünel uygulamalarında çelik hasırlı püskürtme betonun yerini almaya başlamıştır. Bu olgunun temel nitelikleri şöyle özetlenebilir:

- Çelik hasırlı kaplamada, hasırdan dolayı püskürtme betonun yapışma özelliğinin çok değişken olması ve geri sıçramanın özellikle tavan bölgelerinde % 40 gibi yüksek değerlere ulaşması,
- Çelik hasır kullanıldığında, tünel cidarı ile hasır arasında kalan boşluğun doldurulamaması ve bu nedenle kaplamanın nem-su gibi dış etkenlere açık olması (Şekil 3.8), (www.beksa.com.tr).
- Çelik hasırın tünel cidarlarına tespit edilmesi ve yerleştirilmesi işlemlerinde harcanan zaman ve işçilik girdisinin tünel ilerlemesindeki yüksek payı,
- Kaya patlaması gibi ani ve tahripkâr özellik sergileyen dinamik zorlamalarda, yaşamsal işlevi olan süneklilik özelliği'nin çelik lifli püskürtme beton kaplamalarında daha iyi gerçekleştirilmesi,
- Çelik lifli püskürtme betonun taşıyıcılık özellikleri nedeni ile kaplama kalınlığı hasırlı kaplamaya kıyasla daha düşük olması, böylelikle anlamlı boyutta kazı ekonomisi yaratması (Arıoğlu ve Girgin, 1998).



Şekil 3.8 Çelik hasırlı ile çelik lifli püskürtme betonun karşılaştırılması

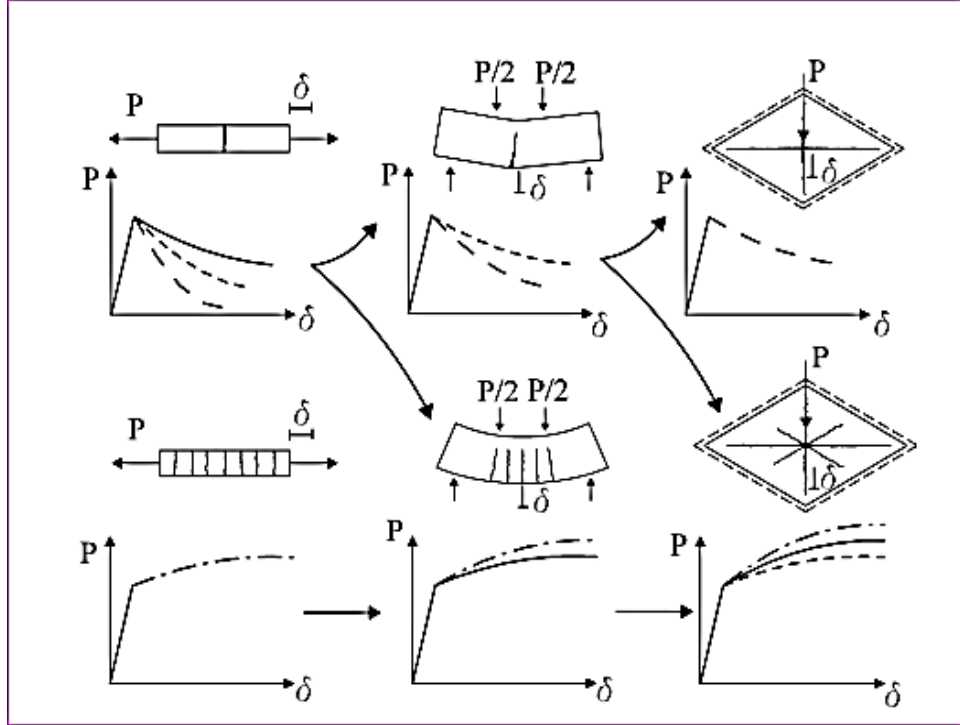
- Püskürtme betonda, ilk mikro çatlakların oluşumunu takiben çatlak yüzeyine dik olan çelik lifler, uzarken kancalı biçimleri nedeniyle taşıyıcılığını devam ettirmekte ve bir miktar daha deformasyon yapabilme yeteneğine sahip olmaktadır (Şekil 3.9), (Arioğlu vd., 2008).



Şekil 3.9 Püskürtme betonda kullanılan liflerin çatlak gelişimini önlemesi ve ilave taşıyıcılık işlevi

- ÇTDB kompozit bir malzemedir ve rastgele dağılmış çelik teller ve çimento matriksi ile tanımlanır.
- Donatı veya hasır çeliğin bilinen davranışına karşılık, pek çok çelik tel çekme sırasında betondan kopmadan sıyrılır. Çelik teller betonda mikro çatlaklar oluşuktan sonra aktif olurlar. Çelik telleri betona ilave etmenin etkisi, çatlak sonrasında kalan veya eşdeğer çekme gerilmelerinin elde edilmesi ile ortaya çıkar. Dolayısıyla çelik tel donatılı beton (ÇTDB) süneklik ve tokluk ile karakterize edilir.
- Kompozit malzemelerin özellikleri, kompoziti oluşturan malzemelerin karakteristik özelliklerine ve dozajlarına bağlıdır. Beton matriksi ile aralarında oluşan yapışma, matriksin mekanik özellikleri ve lif geometrisi de ÇTDB özelliklerine etki ederler. Matriksin elastik özellikleri ve basınç dayanımı lifler tarafından etkilenmez.
- ÇTDB, çekme gerilmeleri altında sertleşme veya yumuşama davranışı gösterir. Çatlak sonrası yumuşama davranışında, deformasyonlar tek bir çatlakta toplanırken, çatlak sonrası sertleşme davranışında, nihai taşıma gücüne ulaşmadan çok çatlaklı ve daha sünek bir davranış görülür.

Şekil 3.10'da liflerin beton davranışına etkilerini, direkt çekme ve eğilme altında kiriş ve plaklarda yumuşama ve sertleşme davranışını göstermektedir (Modelcode 2010).



Şekil 3.10 Liflerin beton davranışına etkileri, direkt çekme ve eğilme altında kiriş ve plaklarda yumuşama ve sertleşme davranışı

3.6.2. Sentetik Lifli Püskürtme Beton

Sentetik liflerin betona katılması dayanıklılık, süneklik ve darbe direncini belirli bir ölçüde artırır. Buna karşın rötre çatlakları ve geri sıçrama miktarında önemli azalma söz konusudur. Artan uygulama verimliliği, güvenlik ve kolaylaşan lojistik de diğer önemli özellikleridir.

Madencilik uygulamaları için püskürtme betonda sentetik liflerin kullanılma potansiyeli, yüksek performanslı polimer liflerin geliştirilmesi ile birlikte önemli ölçüde artmıştır. Yüksek çekme dayanımı ve bazı durumlarda sıkıştırılmış şekil performansı sonuçları, çelik lifli püskürtme betona benzer özellik göstermektedir. Sentetik lifler, püskürtme betona ağırlıkça 7.0-13.5 kg/m³ (hacimce % 0.75-1.5) oranında katılmaktadır (Spearing and Hague, 2003).

3.6.3. Çelik Lifli Betonda Karışım Tasarımı

Literatürde püskürtme beton üzerine yapılmış bazı çalışmalar derlenerek kullanılan karışım tasarımları Çizelge 6'da verilmiştir (Ayış,2010).

Yapılan çalışmaların karışım tasarımlarında;

- çimento dozajı 350-500 kg/m³,
- su/çimento oranı 0.39-0.61,
- toplam agrega miktarı 1462-1773 kg/m³,
- çelik lif miktarı 30-102 kg/m³

aralıklarında kullanılmıştır.

3.6.4. Çelik Lifli Püskürtme Betonda Geri Sıçrama (Rebound)

Püskürtme beton uygulamalarında, yüksek hızla yüzeye püskürtülen malzemenin bir kısmı yüzeye çarpma anında geri sıçrayarak yere dökülür. Uygulamaların kaçınılmaz bir parçası olan geri sıçrama (rebound) olgusu, gerek maliyet, gerekse de püskürtme betonun kalitesi açısından çok önemlidir.

Geri sıçrama miktarı aşağıdaki faktörlere bağlıdır:

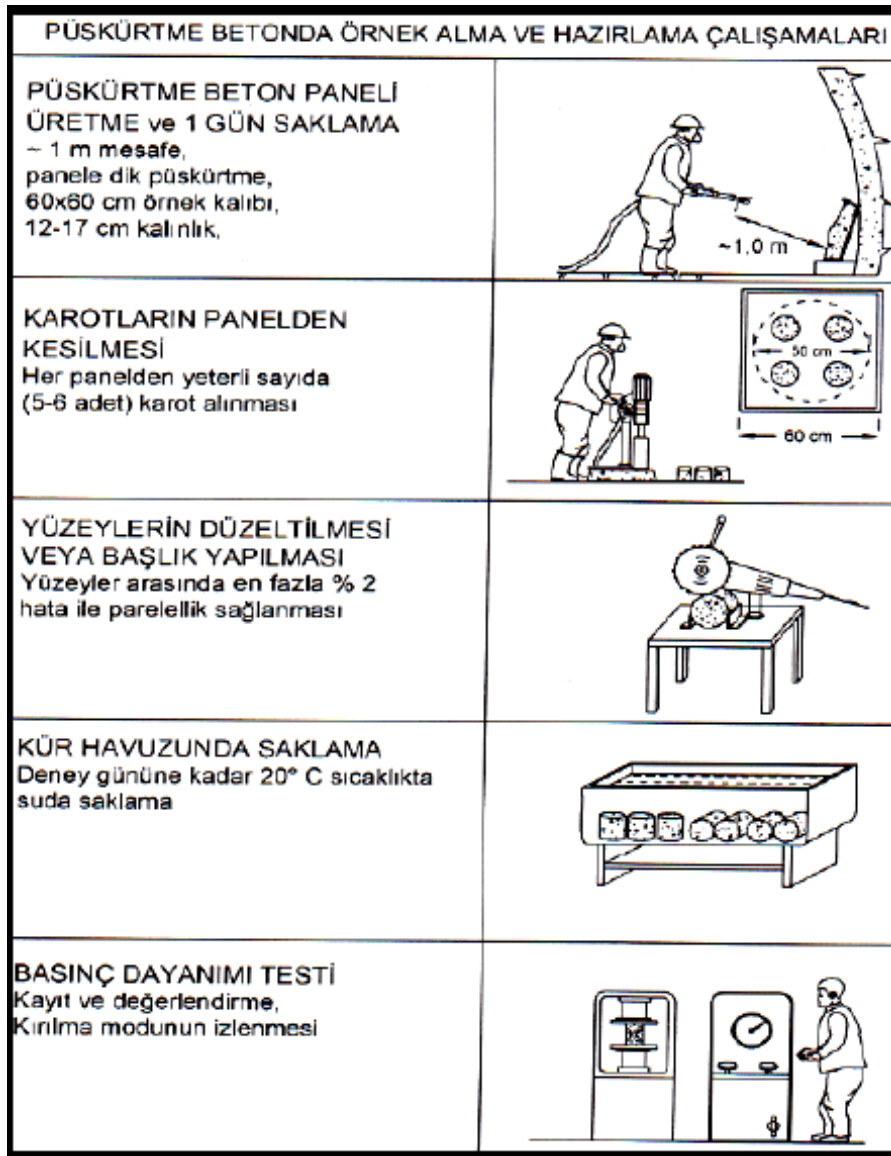
- püskürtmenin kuru veya yaş yöntem ile olması,
- su/çimento oranı,
- agrega gradasyonu,
- kullanılan katkıların cinsi ve miktarı,
- püskürtme ağzındaki basınç ve tanelerin hızı,
- püskürtme mesafesi ve açısı,
- püskürtülen yüzeyin temizliği ve ön hazırlığı,
- operatörün tecrübesi,
- püskürtme beton tabakasının kalınlığı

Çizelge 6. Püskürtme beton üzerine yapılmış bazı deneysel çalışmalarda kullanılan karışım tasarımları

	Msu/ Mç (Msu/Mç+Msf)	Mç (Mç+Msf) (kg)	Toplam Agrega Miktarı (ince+iri) (kg)	Mp (Ms) (lt)	Lif Tipi* (Boy/Çap) (mm)	Mf (kg)	Va (%)	Kaynaklar
1	0.40-0.55	500	1773	—	—	—	—	(Pfeuffer ve Kusterle, 2001)
2	0.40 (0.35)	400 (400+50)	1600-1670	—	—	—	—	(Armelin ve Banthia, 1998)
3	0.64 (0.59)	430 (430+65)	1462 (1097+365)	—	—	—	—	(Leung vd., 2004)
4	0.54-0.61 (0.49-0.55)	350-450 (400+40)	1667 (1037+630)	—	30/ 0.55- 0.75	30-60	—	(Jeng vd., 2001)
5	0.46	442	1618	—	30/ 0.4-0.5	46.5-102.5	5	(Ramakrishnan vd., 1981)
6	0.45 (0.41)	400 (400+40)	1700 (1225+475)	(1-1.5)	—	50	3	(Schallom ve Ballou, 2003)
7	0.45 (0.40)	400 (400+40)	1570 (1110+460)	1.5 (4)	—	—	—	(Jolin ve Beaupre, 2003)
8	0.43 (0.39)	420 (420+40)	1600	13 kg (6)	—	60	—	(Wood vd., 1993)
Msu = Karışımdaki su miktarı Mç = Karışımdaki çimento miktarı Mp = Karışımdaki priz hızlandırıcı katkı miktarı Ms = Karışımdaki süper akışkanlaştırıcı katkı miktarı Mf = Karışımdaki çelik lif miktarı Msf = Silis dumanı Va = Karışımın hava miktarı yüzdesi * = Kullanılan lif kancalı tiptir.								

3.6.5. Püskürtme Betonda Karot Alma İşlemleri

Püskürtme betonun mukavemetinin belirlenmesi için betonun panellere püskürtülmesi, numune alma, kür uygulama ve dayanımın belirlenmesi aşamaları Şekil 3.11’de gösterilmiştir (Arıoğlu vd., 2008). Şekil 3.11’de 60*60 cm’lik kalıba 1m mesafeden ve dik açıyla 12-17 cm kalınlığında püskürtme beton uygulanmaktadır. Bu uygulanan panelden ise 5, 6 adet numune kesilerek alınmaktadır. Alınan beton numunelerinin yüzeyleri düzeltilerek 20 derece sıcaklıktaki kür havuzunda deney gününe kadar bekletilir. Süresi dolan numunelerin basınç dayanımı testi yapılır.



Şekil 3.11 Panellere betonun püskürtülmesi ve numune alma aşamaları

ACI 506.2-95 standardına göre karotların kalite bakımından sınıflandırılması Çizelge 7’de verilmiştir. Tünel kaplamalarında ise maksimum hava boşluk çapının $d=3,18$ mm olduğu 1. kalite püskürtme betonun kullanılması arzu edilir.

Çizelge 7. ACI 506.2-95 standardına göre karot kalite sınıflandırması

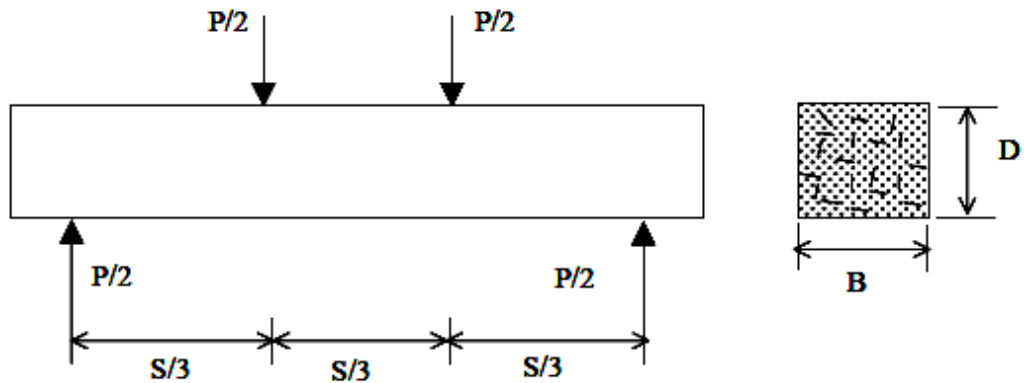
1.Kalite	2.Kalite	3.Kalite	4.Kalite	5.Kalite
				
$d=3.18$	$d=9.53$	$d=15.9$	$d=25.4$	$>d=25.4$

d = maksimum ortalama hava boşluğu çapı (mm)

3.6.6. Çelik Lifli Betonun Tokluk İndeksi ile Değerlendirilmesi

Çelik lifle güçlendirilmiş betonun sertlik deneyi ASTM C 1018’e (American Society for Testing Materials) göre belirlenmiş olup, çoğu kez aynı deney çelik lifle güçlendirilmiş püskürtme beton için de kullanılmaktadır (TS 10515 Standardı, ASTM C 1018 Standardına benzer özelliktedir).

Çelik lifli püskürtme beton ile üretilen kirişe iki noktadan yük uygulanması sırasında (ASTM C 1018 Standardına göre), ilk çatlak ve sehim için gereken enerji ve ilk çatlaktaki sehimin birkaç katı olan sehimler için gereken enerji belirlenmektedir (Şekil 3.12).

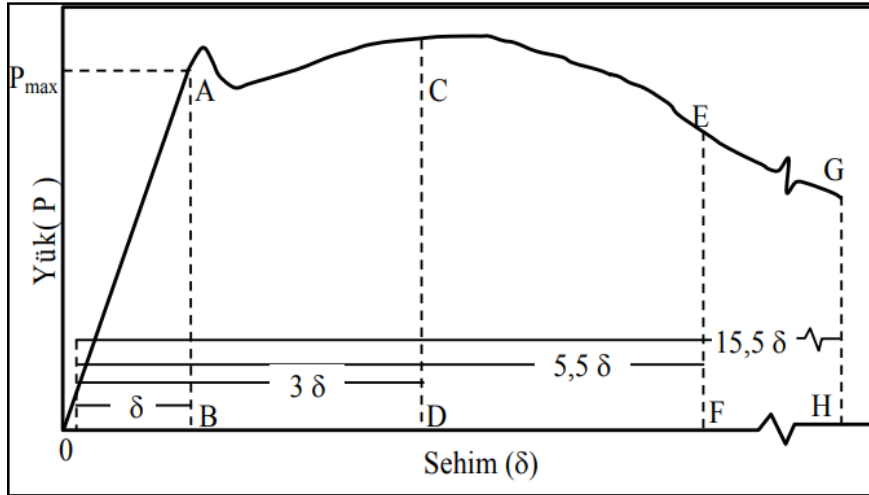


Şekil 3.12 ASTM C 1018’e göre deney düzeneği

Bu deney yöntemine göre ilk çatlak, yük-sehim eğrisinin yükselen kısmının doğrusallıktan saptığı nokta ile belirlenmektedir. Malzemenin süneklik özelliğini karakterize eden “tokluk faktörü”, enerji yutabilme kapasitesi olup, gerilme-şekil değiştirme eğrisi altında kalan alanı ifade etmektedir. Liflerin en önemli katkısı tokluk üzerinde olmaktadır.

Artan lif dozajları statik ve özellikle dinamik etkiler altındaki enerji yutma kapasitesini artırarak yapıya sünek davranış kazandırırken, bu artışın mertebesi üzerinde lif tipinin püskürtme beton ile arasındaki yapışma dayanımının etkin olduğu unutulmamalıdır (Yurdakul, 2001).

ASTM C 1018’de tanımlanmış olan I_5 , I_{10} , I_{20} tokluk indeksleri, seçilen yerdeğiştirme değerine kadar malzemenin elastik-plastik davranışını açıklamak için kullanılır. Şekil 3.13’te tokluk hesaplamalarında kullanılan yük-yerdeğiştirme eğrisi görülmektedir (Çivici, 2004).



Şekil 3.13 Tokluk hesaplamalarında kullanılan yük-yerdeğiştirme eğrisi

Şekil 3.13’e bağlı olarak yazılabilecek denklemler,

$$I_5 = \frac{OACD}{OAB}, \quad I_{10} = \frac{OAEF}{OAB}, \quad I_{20} = \frac{OAGH}{OAB}$$

olarak hesaplanır.

I_5 , I_{10} ve I_{20} indeksleri ilk çatlak anına kadar doğrusal elastik davranışı, daha sonra da plastik davranışı açıklamakta ve bu indeksler değerlendirilirken Çizelge 8'deki değerler dikkate alınmaktadır (Uğurlu,1994).

Çizelge 8. I_5 , I_{10} , I_{20} İndeksleri için ölçütler

Baz alınan tokluk alanı	İndeks	Eğilme gerilmesi ölçütü	Normal beton	Elastik- Plastik malzeme	Çelik lifli beton için aralık
OACD	I_5	3.0	1.0	5.0	1-6
OAEF	I_{10}	5.5	1.0	10.0	1-12
OAGH	I_{20}	15.5	1.0	30.0	1-40

Burada; I_{10}/I_5 oranı için 2, I_{20}/I_{10} oranı için 3 değeri mükemmel plastik malzeme hareketini, yani yükte herhangi bir değişiklik olmaksızın eğilmedeki artışı gösterir. I_{20}/I_{10} 'un 3'ten küçük değerleri ise düşük performansı ifade etmektedir (Yurdakul, 2001).

Tokluk indeksi değerlerinin düşük oluşu, çatlama sonrası dayanımdaki hasarın büyük, enerji yutma yeteneğinin ise az olduğunu göstermektedir. Çelik lifin tipi, içeriği, narinliği ve matris parametrelerinin uygun seçilmesi ile tokluk indekslerinin 5, 10 ve 20 gibi değerlere ulaşması ve hatta aşılması da mümkün olmaktadır.

Tokluk indekslerinin yanı sıra çelik lifli püskürtme betonun tokluğunu değerlendirebilmek için, R dayanım faktörü kullanılır. Başka bir deyişle, dayanım farkı faktörü R, Şekil 3.13'te CE ve EG deplasman aralıkları için ilk çatlak dayanımının bir yüzdesi olarak ilk çatlaktan sonra malzemede mevcut olan ortalama dayanım seviyesini gösterir. Bu değer 100 olması mükemmel bir plastik davranışı, daha düşük değerler ise plastik davranışa göre ikinci derece önemi olan davranışları ifade etmektedir. Katkısız betonun dayanım faktörü ise sıfırdır (Çivici,2004).

4. TÜNELLERDE KAPLAMA İMALATLARI

Bu kısımda tünel imalatlarının çok olduğu raylı sistem ve karayolu projelerinde iş programında önemli bir süreyi teşkil eden ve maliyet bazında da ciddi tutarları olan tünel kaplama imalatları incelenmektedir. Tünel kaplama imalatları, birinci (kazı-destek) kaplama ve ikinci (nihai) kaplama olmak üzere iki aşamada tamamlanır.

Tünellerde birinci kaplamanın tanımı, amacı ve uygulama tekniği ile ilgili detaylı bilgiler. Yeni Avusturya Tünel Açma Metodu (NATM) başlığı altında yer aldığı için, bu kısımda daha çok Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesinde ve Etiyopya Hızlı Tren Projesinde gerçekleşen tünel kaplamalarının süre ve maliyeti ile ilgili bilgilere yer verilmektedir.

4.1. Tünellerde İkinci Kaplama Yapım Metodolojileri

Metro, demiryolu ve karayolu tünellerinde kazı-destekten sonra zeminin yapısı da gözönüne alınarak ikinci kaplama yöntemleri belirlenir. Tünellerde nihai kaplama (ikinci kaplama), hem düzgün bir yüzey elde etmek hem tünellerin servis ömrü boyunca su geçirimsizliğini (yalıtımını) sağlamak ve daha önemlisi zemine kalıcı bir destek sağlamak amacıyla tasarlanmaktadır.

Tünel kullanımı süresince, nihai (kalıcı) kaplama aşağıdaki fonksiyonları üstlenecektir:

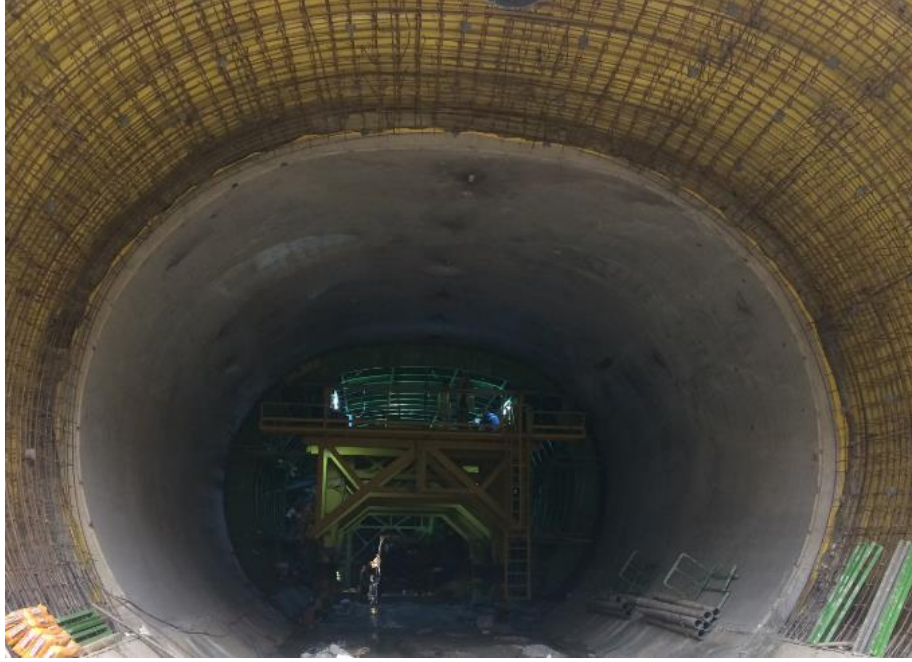
- Kalıcı olarak kaplama özelliğinin sürdürülmesi.
- Çevresel zorlamanın karşılanması.
- Tünel işletme açıklığına kalıcı olarak uyumun sağlanması.
- Sabit kalıcı hizmetler ve taşınabilir ekipmanlara destek sağlanması.
- Su geçirimsizliğinin sağlanması.

Dünya’da gerçekleşmiş ve halen yapımı süren metro projelerinde nihai kaplamanın sıklıkla uygulanan şu iki yöntemi vardır; Klasik dökme beton ile nihai (ikinci) kaplama ve Püskürtme beton ile nihai kaplama şeklindedir.

4.1.1. Klasik Dökme Beton İle Nihai (İkinci) Kaplama

Tünellerde kazı-destek sürecinden sonra uzun bir süredir ikinci kaplama olarak dünyada ve ülkemizdeki bilhassa metro projelerindeki tünel kaplamalarında klasik dökme beton ile nihai kaplama yapılmaktadır. Bu kaplama yönteminde sırasıyla önce yalıtım ardından BÇIII donatı bağlanması işlemi ve kalıp imalatından sonra dökme

beton imalatı ile nihai kaplama sağlanmış olur. Şekil 4.1 ve Şekli 4.2’de bu zincirleme imalatlar açık bir şekilde görülmektedir.



Şekil 4.1 CT Tipi Tünelin nihai kaplamasının dökme beton ile yapılması

Tünel nihai kaplamalarında kullanılan yürür kalıp malzemeleri sahaya getirildikten sonra montajı işlemine başlanılır. Tünel kesitine göre ve sahanın uygunluğuna göre montaj süresi değişir. Şekil 4.2’deki CT tipi tünelin yürür kalıp montajı (kurulumu) sahanın da uygun (kurulum ortamının genişliği) olduğu bir ortamda 4 gün sürmüştür.



Şekil 4.2 Tünel kemerinin yürür kalıp ile nihai kaplama montajının yapılması

4.1.2. Püskürtme Beton İle İkinci Kaplama

Son zamanlarda klasik dökme beton ile nihai kaplamaya alternatif olarak görülen; dünyada ve ülkemizde de kullanımı artan; tünellerde, kazı-destekten sonra donatılı püskürtme beton ile nihai kaplama yapılmaktadır. Bu yöntem tünel imalatlarının çok olduğu metro, demiryolu gibi raylı sistem projelerinde ve karayolu tünellerinde uygulanmaktadır. Püskürtme betonun kullanıldığı bu yöntemde hasır çelik, çelik tel veya fiber elyaflar da kullanılabilir. Bu yöntemin klasik dökme beton yöntemi ile kıyaslandığında süresel olarak ciddi anlamda avantaj sağladığı maliyet açısından da neredeyse birbirine yakın değerler elde edildiği saha uygulamalarında ve hakedişlerde görülmüştür. Şekil 4.3’te donatılı püskürtme beton ile nihai kaplamanın yapıldığı bir metro tüneli görülmektedir (<https://www.normet.com>).



Şekil 4.3 Nihai kaplamanın püskürtme beton ile yapıldığı Londra Whitechapel platform tüneli (Crossrail)

Aşağıda Çizelge 9’da püskürtme beton ile nihai kaplamanın yapıldığı bazı tüneller yer almaktadır.

Çizelge 9. Püskürtme beton ile nihai kaplamanın yapıldığı bazı tüneller

Tünel	Yer / Ülke	Uzunluk (km)	İşletmeye açıldığı yıl
Büyükdüz HES Tüneli	Gümüşhane, Türkiye	13	2012
Svealandbanan Demiryolu Tüneli	İsveç	3,42	1997
Möğlice Baraj ve HES Tüneli	Möğlice, Arnavutluk	17	2018
Grödingebanan Demiryolu Tüneli	İsveç	8,1	1992
Metro Lausanne	Lozan Metrosu	13,7	1991

4.2. Metro Tünellerinde İkinci Kaplamanın Süre Ve Maliyet Mukayesesi

Metro tünellerindeki kazı-destek sonrası ikinci (nihai) kaplama yöntemlerinin süresel ve mali açıdan kıyaslanması; ulaşım probleminin erken çözüm bulması ve hattın erken hizmete açılması ile işletme gelirlerinin elde edilmeye başlanması anlamında önem arz etmektedir. Aşağıda klasik dökme beton yöntemi ile püskürtme beton yönteminin ayrı başlıklar altında süre ve maliyet bilgileri verilecek. Ardından ise iki yöntem süresel ve maliyet anlamında kıyaslanacaktır. Nihai kaplama olarak bilinen ikinci kaplamadan önce yapılan birinci kaplama ile ilgili de daha önce yapılan çalışmalara yer verilmiştir. Aşağıda gerek birinci kaplama gerekse de ikinci kaplamada uygulanan yöntem farkından dolayı gerek maliyet gerekse de süre bazında ciddi farklılıklar görülmektedir. Tezin sonuç kısmında bu yöntemlerden hangilerinin tercih edilmesi durumunda maliyet ve süre anlamında avantaj ve dezavantaj sağlayacağına yer verilmiştir.

4.2.1. Klasik Dökme Beton İle İkinci Kaplama Yapılmasının Süre ve Maliyeti

Tünel imalatlarının çok olduğu metro gibi mega projelerde iş programının önemli bir dilimini tünel kazı-desteği ve nihai kaplamaları oluşturmaktadır. Tünel kaplamalarının proje süresi üzerinde bu kadar etkili olması mevcut yöntemlerin geliştirilmesi ve kaliteden ödün verilmeden alternatif yapım yöntemleri ile bu sürenin kısaltılması önem arz etmektedir. Bu bağlamda bitmiş bir metro projesi üzerinden tünel kaplama sürelerinin ortaya konulması ve incelenmesi bu konuda benzer projeler için analiz yapma fırsatı sağlayacaktır. Şekil 4.4'te dökme beton yöntemi ile yapılan ikinci kaplama aşamaları yer almaktadır.



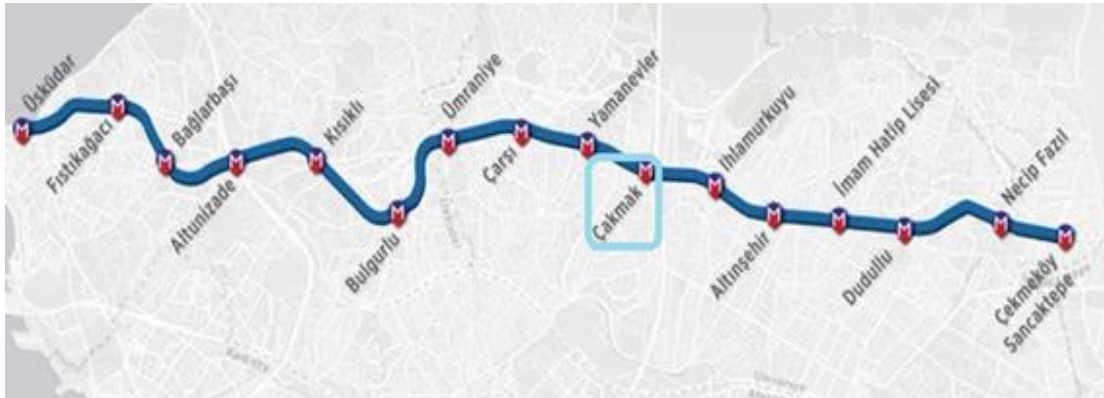
Şekil 4.4 Dökme beton yöntemi ile yapılan ikinci kaplama aşamaları

4.2.1.1 Çakmak İstasyonu Tünel Kaplamalarının Süre ve Maliyeti

Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesi (ÜÜÇMP), 17 km uzunluğundaki çift tüp ana hat tünelleri, 16 adet metro istasyonu, 2,8 km'lik depo sahası bağlantı tüneli, depo sahası ve bakım alanından oluşmaktadır. Bu metro projesindeki tünellerin yapımında Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ve zemin dengeleme basıncıyla çalışan tünel delme makineleriyle (EPB-TBM) tüneller açılmıştır. Bu proje kapsamında ana hat tünellerinin TBM ile peron, makas, merdiven, bağlantı ve depo yolu tünelleri ise ana hat tünel kesitinden farklı ölçülerde olduklarından aynı tünel makinesiyle açılmayacağı için NATM yöntemiyle açılması planlanmıştır.

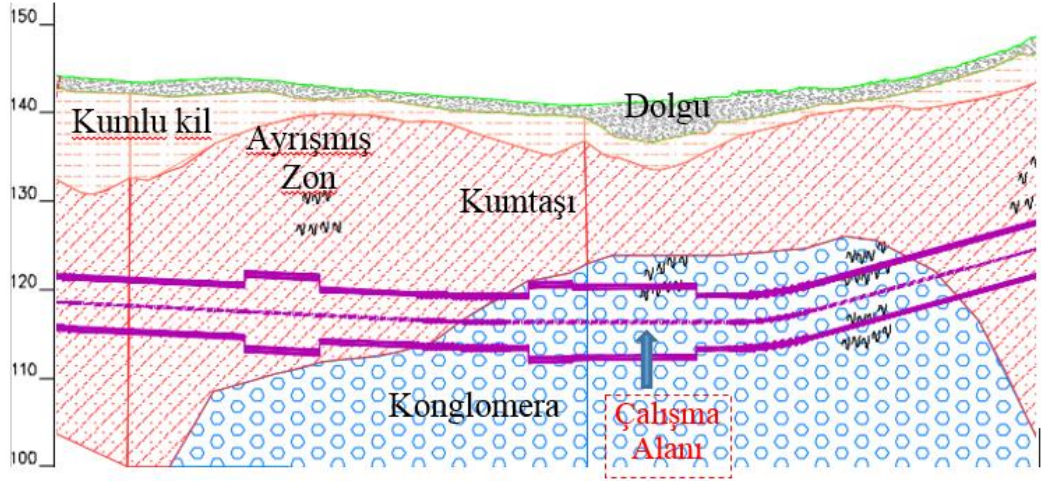
İstasyonların bazıları tamamen aç kapa inşa edilirken bir kısmı da kısmen aç kapa kısmen tünel şeklinde yapılmıştır. Kısmen aç kapa yapılan istasyonların konkors kısmı aç kapa yapılırken, geriye kalan kısım tünel olarak inşa edilmiştir.

Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy hattındaki istasyonlardan ise Çakmak istasyonu inceleme konusu olmuştur. Çakmak İstasyonu Üsküdar Ümraniye Çekmeköy (ÜÜÇ) metro projesinin 10. istasyonudur. İstasyon Alemdağ Caddesi güzergâhında Ümraniye sanayisinin önünde ve Çakmak köprüsünün yanında bulunmaktadır.



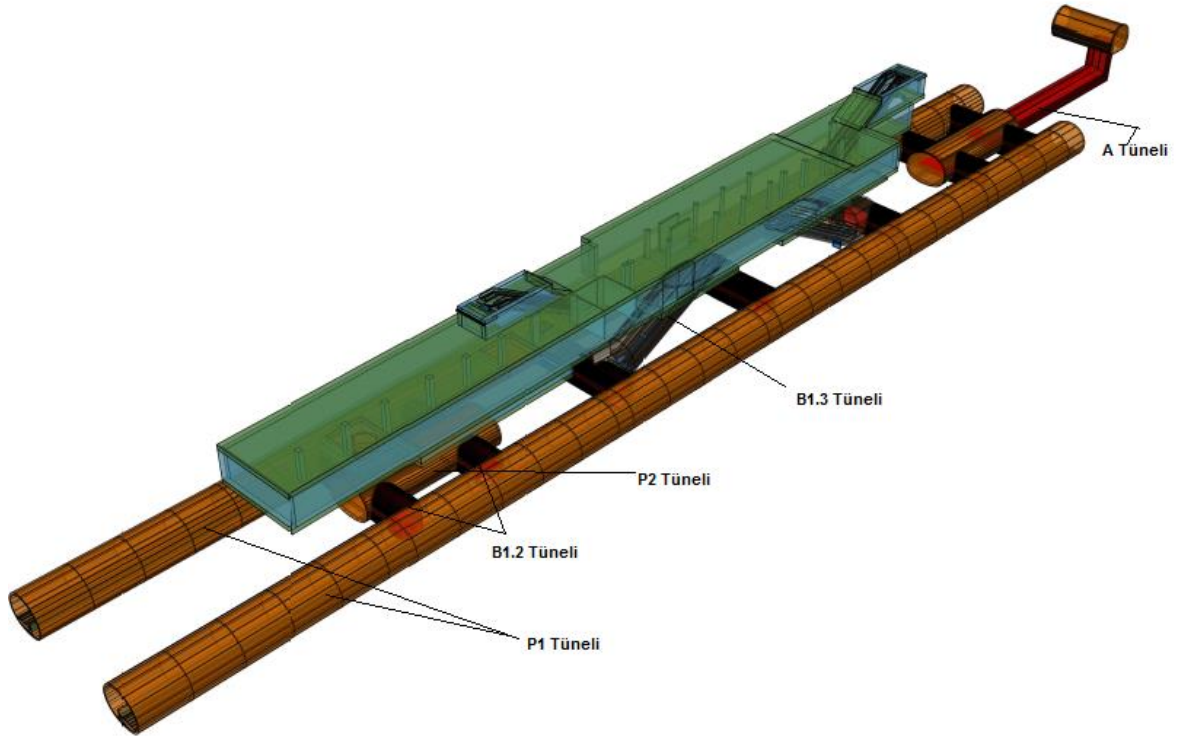
Şekil 4.5 Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro güzergâh hat planı

ÜÜÇMP'nin güzergâhı jeolojik olarak Kurtköy, Aydos, Gözdağı, Dolayoba, Kartal, Tuzla ve Trakya formasyonlarından geçmektedir. Bu tez çalışmasında ise Çakmak istasyonu ele alınmıştır (Şekil 4.5). İnceleme alanında yapılan sondaj çalışmasında mevcut zemin yüzeyinden 2 m derinliğe kadar dolgu tabakası gözlenmiştir. Dolgu tabakasının altında 22,5 m derinliğine kadar kumtaşı gözlenmiş olup, kumtaşı tabakasının altında ise konglomera tabakasına girilmiştir. Bazı faylar ve jeolojik süreksizlikler mevcuttur. Şekil 4.6'da inceleme alanının jeolojik kesit alanı yer almaktadır (İBB, 2012). Bu çalışma alanında tünellerin toprak örtüsü kalınlığı 20-30 m arasında değişmektedir.



Şekil 4.6 İnceleme alanının jeolojik kesit alanı

Çakmak istasyonunun tercih edilme sebebi ise sanayi ve iş merkezlerinin yoğun olduğu ve çevre yolu bağlantısına yakın olmasından kaynaklı hattın önemli bir konumunda yer alması, zeminin sahip olduğu jeolojik çeşitliliğinin yeterince öngörüleemeyen deformasyonlar oluşturması ve bunun imalatlarda gecikmelere sebep olması gibi nedenlerin proje iş programında aksamalara yol açmasıdır. Şekil 4.7’de Çakmak istasyonunun 3 boyutlu gösterimi yer almaktadır (İBB, 2013).

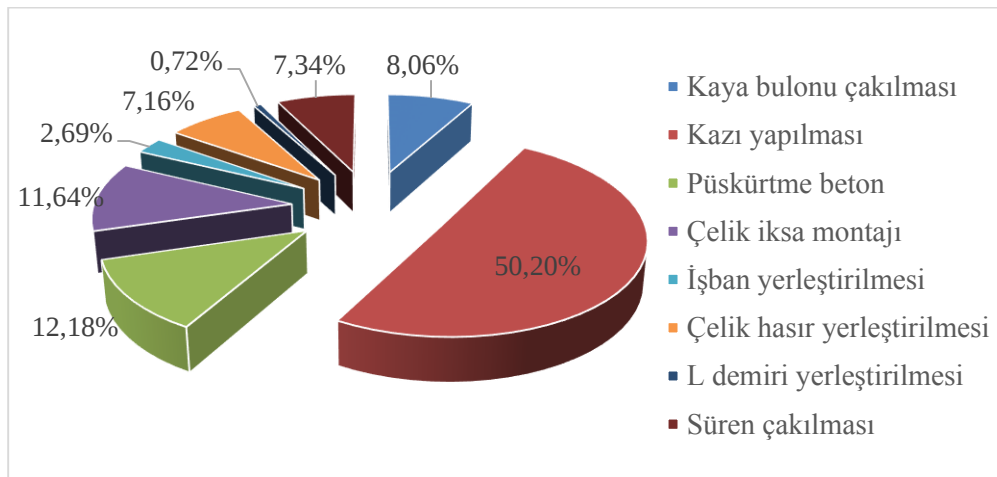


Şekil 4.7 Çakmak istasyonunun 3D gösterimi

Şekil 4.7’de Çakmak istasyonuna ait 3 boyutlu projede görüldüğü üzere istasyon kısmi aç-kapa olarak tasarlanmıştır. NATM ile P1 (Peron tünelleri), P2 (Havalandırma Bağlantı Tüneli), B1.2 (Bağlantı Tüneli), B3.1 (Merdiven Tüneli) ve A (Havalandırma tüneli) farklı kesitlerde istasyon tünelleri yapılmıştır. Kazı-destek aşamasında zemin yapısına ve öngörülen zemin davranışına göre şemsiye kemer (umbrella arch) de kullanılmıştır. Aşağıda Çizelge 10 ve Çizelge 12’de sahadan alınan bilgiler doğrultusunda NATM ve UAM ile yapılan kazı-destek kalemlerinin ilerleme süreleri verilmektedir. Çakmak İstasyonu Peron tüneline uygulanan NATM ve UAM yöntemleri ile harcanan süreler iş kalemleri bazında verilmektedir. Çizelge 10 incelendiğinde NATM yöntemi ile toplam 169,43 m kazı+tahkimat yapıldığı, bunun da toplamda 1576 saat 30 dakika sürdüğü görülmektedir. Bu da 65 gün 16 saat ve 33 dakikaya karşılık gelmektedir. Buna göre de ilerleme hızı 9 saat 19 dakika/metre olmaktadır (Selçuk,2016).

Çizelge 10. NATM yönteminin imalat kalemlerinin süresel dağılımı

Yapılan iş	Harcanan süre (dak.)	%(Yüzde)
Kaya bulonu çakılması	7.624	%8,06
Kazı yapılması	47.488	%50,20
Püskürtme beton	11.521	%12,18
Çelik iksa montajı	11.013	%11,64
İşban yerleştirilmesi	2.541	%2,69
Çelik hasır yerleştirilmesi	6.777	%7,16
L demiri yerleştirilmesi	678	%0,72
Süren çakılması	6.947	%7,34
Toplam	94.590	%100

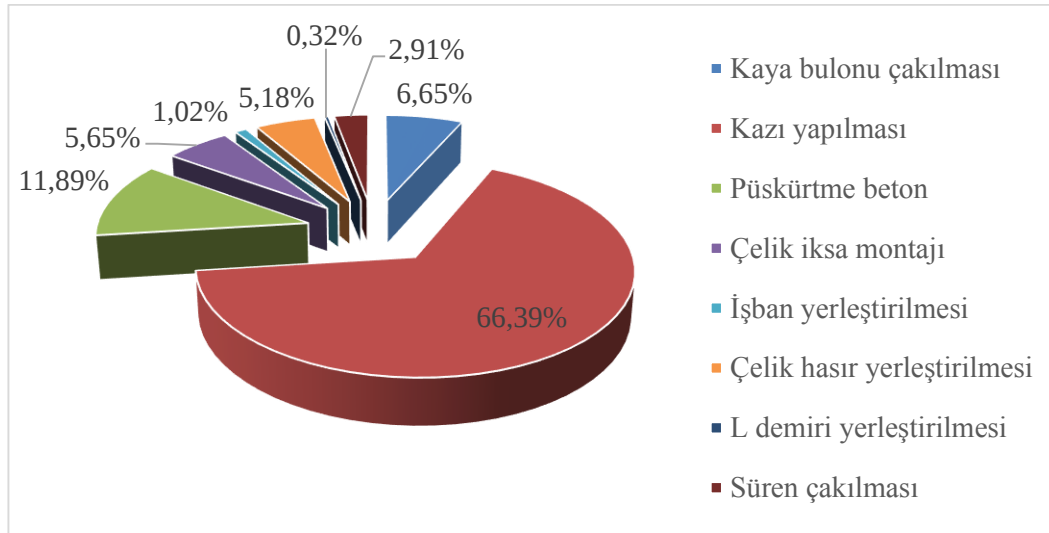


Şekil 4.8 NATM yönteminde imalat kalemlerinin sürelerinin yüzdelik dağılımı.

NATM ile yapılan P1 peron tünelinin kazı-destek iş kalemlerinin toplam maliyetleri Çizelge 11'de görülmektedir. İmalatların yapıldığı 0+003,77 km ile 0+173,20 km'ler arasında toplam 169,43 metre kazı+destek yapılmıştır. Dolayısıyla da, toplam maliyet olan 708.010,86 euro, bu metraje bölündüğünde 4.178,78 euro/m birim maliyet bulunmaktadır. Maliyet kalemlerinin toplam içinde % dağılımı da Şekil 4.9'da verilmiştir. Buna göre NATM'deki en büyük maliyet kalemi %66,39 ile kazı olmaktadır (Selçuk,2016).

Çizelge 11. NATM maliyet kalemleri

Yapılan iş	Toplam Maliyet (euro)	Birim Maliyet (euro/dak.)	Birim Maliyet (euro/m)	%
Kaya bulonu çakılması	47.094	6	227,95	6,65%
Kazı yapılması	470.014	10	2.774,09	66,39%
Püskürtme beton	84.159	7	496,72	11,89%
Çelik iksa montajı	39.991	4	236,03	5,65%
İşban yerleştirilmesi	7.217	3	42,6	1,02%
Çelik hasır yerleştirilmesi	36.689	5	216,54	5,18%
L demiri yerleştirilmesi	2.273	3	13,41	0,32%
Süren çakılması	20.575	3	121,43	2,91%
Toplam	708.011	42	4128,77	100,00%

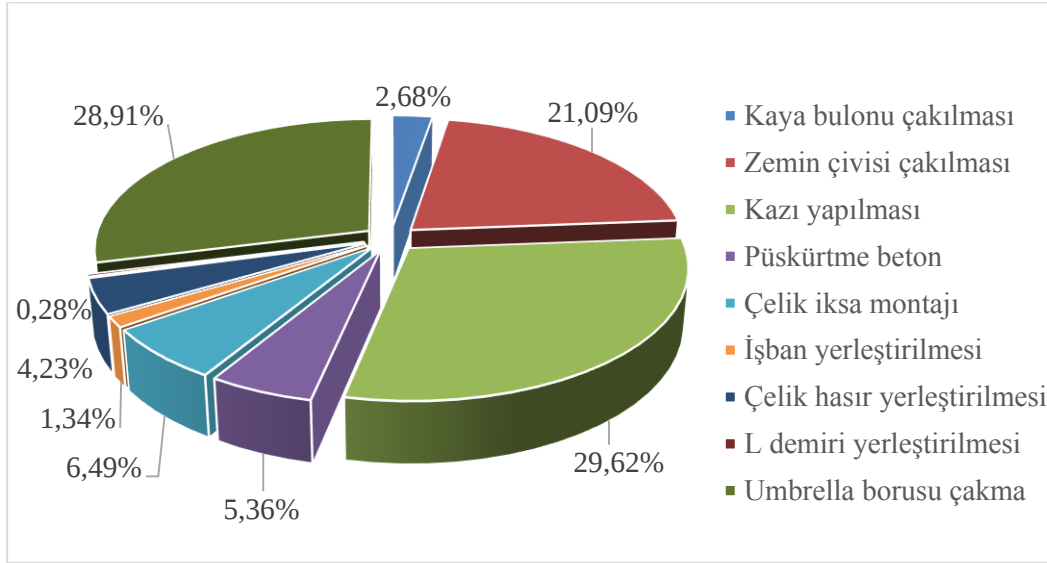


Şekil 4.9 NATM yönteminin maliyet kalemlerinin yüzdeler dağılımı.

Çizelge 12 incelendiğinde UA yöntemi ile toplam 86,56 m kazı+tahkimat yapıldığı, bunun da toplamda 2050 saat 30 dakika sürdüğü görülmektedir. Bu da 83 gün 10 saat ve 30 dakikaya karşılık gelmektedir. Dolayısıyla da ilerleme hızı 23 saat ve 41 dakika/metre olmaktadır (Selçuk,2016).

Çizelge 12. Şemsiye Kemer (UA) yönteminin imalat kalemlerinin süresel dağılımı.

Yapılan iş	Harcanan süre (dak.)	%(Yüzde)
Kaya bulonu çakılması	3.297	%2,68
Zemin çivisi çakılması	25.946	%21,09
Kazı yapılması	36.439	%29,62
Püskürtme beton	6.594	%5,36
Çelik iksa montajı	7.942	%6,49
İşban yerleştirilmesi	1.648	%1,34
Çelik hasır yerleştirilmesi	5.206	%4,23
L demiri yerleştirilmesi	347	%0,28
Umbrella borusu çakma	35.572	%28,91
Toplam	123.030	%100,00

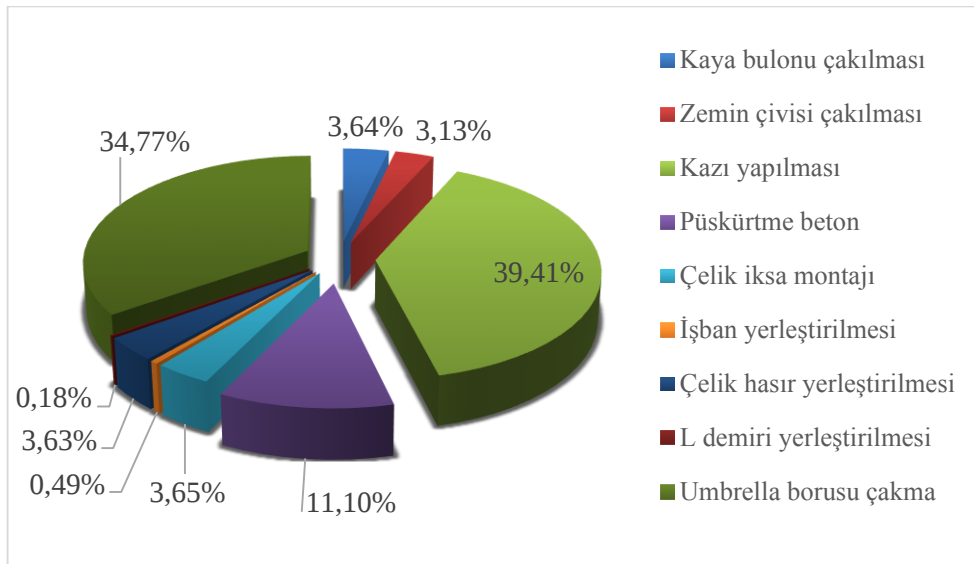


Şekil 4.10 Şemsiye Kemer (UA) yönteminde imalat kalemlerinin sürelerinin yüzdelik dağılımı.

Şemsiye Kemer (UA) yöntemindeki maliyet kalemlerinin tamamı Çizelge 13'te verilmiştir. Bu Çizelge'den de görülebileceği gibi, 1 metre UA için harcanan para 7.281,32 euro/m olmaktadır. İş kalemleri içerisinde maliyeti en yüksek %39,41 ile kazı yapılması ve ardından %34,77 ile de Umbrella borusu çakılması gelmektedir (Selçuk,2016).

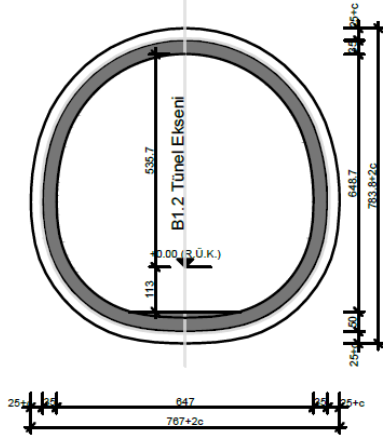
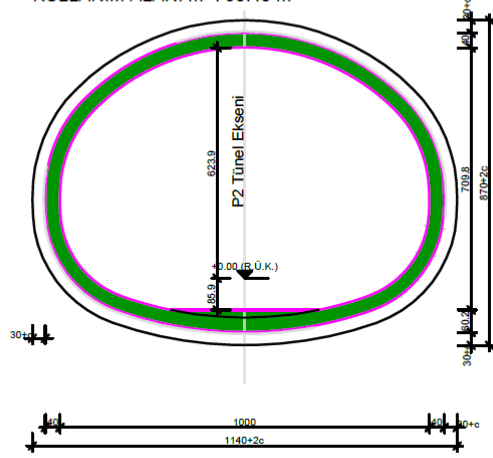
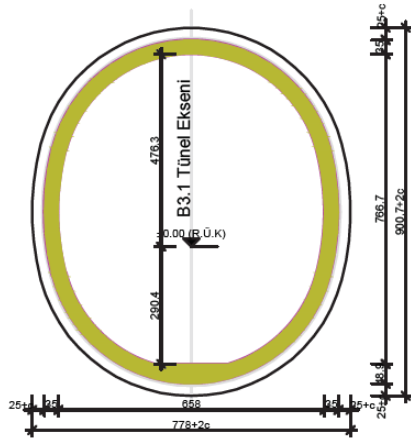
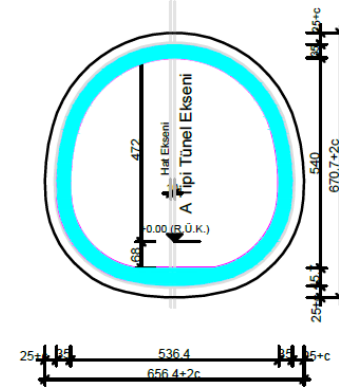
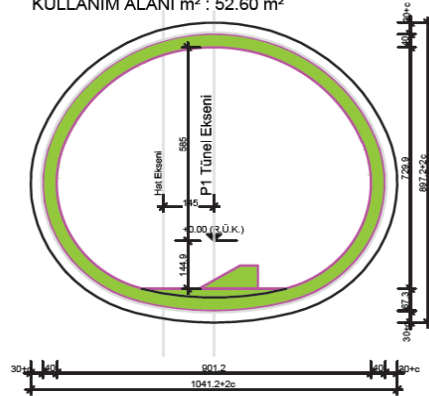
Çizelge 13. Şemsiye Kemer (UA) yönteminde imalat kalemleri bakımından maliyet Çizelgesi.

Yapılan iş	Toplam Maliyet (euro)	Birim Maliyet (euro/dak.)	Birim Maliyet (euro/m)	%
Kaya bulonu çakılması	22.942	7	265,04	3,64%
Zemin çivisi çakılması	19.722	1	227,84	3,13%
Kazı yapılması	248.399	7	2.869,67	39,41%
Püskürtme beton	69.951	11	808,13	11,10%
Çelik iksa montajı	22.995	3	265,65	3,65%
İşban yerleştirilmesi	3.092	2	35,73	0,49%
Çelik hasır yerleştirilmesi	22.861	4	264,1	3,63%
L demiri yerleştirilmesi	1.163	3	13,43	0,18%
Umbrella borusu çakma	219.146	6	2.531,72	34,77%
Toplam	630.271	44	7281,31	100,00%



Şekil 4.11 Şemsiye Kemer (UA) yönteminin maliyet kalemlerinin yüzde dağılımı.

Şekil 4.12'te Çakmak istasyonuna ait P1, P2, B1.2, B3.1 ve A tipi tünel tip kesitleri verilmiştir (İBB 2013). P1 tipi tünel, yolcuların treni beklediği peron tüneldir P2 tipi tünel havalandırma bağlantı tüneli, B3.1 tipi tünel merdiven tüneli, B1.2 tipi tünel bağlantı tüneli A tipi tünel de havalandırma tüneldir (Selçuk,2016).

B1.2 TİPİ TÜNELKAZI ALANI m² : 50.14 m²KULLANIM ALANI m² : 34.82 m²**P2 TİPİ TÜNEL**KAZI ALANI m² : 81.59 m²KULLANIM ALANI m² : 58.40 m²**B3.1 TİPİ TÜNEL**KAZI ALANI m² : 57.69 m²KULLANIM ALANI m² : 41.27 m²**A TİPİ TÜNEL**KAZI ALANI m² : 36.84 m²KULLANIM ALANI m² : 24 m²**P1 TİPİ TÜNEL**KAZI ALANI m² : 75.60 m²KULLANIM ALANI m² : 52.60 m²

Şekil 4.12 P1, P2, B1.2, B3.1 ve A tipi tünel en kesitleri

ÜÜÇ iş programına göre çakmak istasyonunun tünel imalatlarının birinci ve ikinci kaplamalarının tamamının 770 (25,5 ay) günde bitirilmesi planlanmasına rağmen sahada tutulan faaliyet raporlarına göre çakmak istasyonunun sadece birinci tünel kaplamaları (kazı-destek) 10.07.2013-06.08.2015 tarihleri arasında yaklaşık 23 ay sürmüştür. Zeminin sahip olduğu jeolojik yapısından kaynaklı yeterince öngörülemeyen göçüklerin meydana gelmesi ve göçüklerden dolayı zeminin tahkimatı için harcanan süre ve arızalanan iş makinalarının uzun süren bakım ve onarımlarından dolayı imalatlara zaman zaman ara verilmiştir.

Çizelge 14 ve Çizelge 15'te Çakmak istasyonuna ait tünellerde kazı - destek sonrası dökme beton ile yapılan ikinci kaplama süre ve maliyetlerinin verildiği görülmektedir. Çakmak istasyonu tünellerinin sadece ikinci kaplamalarının 16 ay'da bitmesinde TBM geçişinin sağlanması ve zeminel problemlerin giderilmesi gibi bir takım nedenlerden dolayı imalata ara verilmesinin de etkisi olmuştur. Bunun yanı sıra klasik yöntemde kalıp imalatı süresi, redüksiyon bölgelerinde imalatın uzun zaman alması, donatı bağlama süresi ve betonun priz süresi gibi durumlar da tünel nihai kaplamalarının bu sürede bitmesinde etkin rolü olmuştur. Maliyet anlamında ise kalıp maliyeti, kalıp ve demir işçilik maliyetleri bu yöntemde önemli gider kalemleridir.

Çizelge 14. Çakmak istasyonuna ait tünellerde dökme beton yöntemi ile yapılan ikinci kaplama süreleri

Tünel Tipleri	Uzunluk (m)	Sayı	Zaman (ay)
P1 Peron Tüneli	270	2	8,5
P2 Havalandırma Bağlantı Tüneli	32	2	1,5
B1.2 Bağlantı Tüneli	20	7	2,5
B3.1 Merdiven Tüneli	35	2	1,5
A Havalandırma Tüneli	75,86	1	2
Toplam Zaman (ay)			16

Çizelge 15. Çakmak istasyonuna ait tünellerde dökme beton yöntemi ile yapılan ikinci kaplama maliyetleri

İmalat Adı	Miktarı	Birim Fiyatı (€)	Tutarı (€)
Donatı (ton)	1.280,89	814,51	1.043.297,71
Beton (m ³)	7.981,25	49,45	394.672,81
Kalıp (m ²)	20.140,55	19,55	393.747,65
Su tutucu (m)	4.784,14	8,26	39.516,96
Membran (m ²)	20.160,45	7,95	160.275,59
Toplam:			2.031.510,73

Nihai kaplamada BÇIII donatının yerine çelik lif (tel) kullanıldığında ise Çizelge 16 ve Çizelge 17’de görüldüğü üzere donatı işçiliğinin olmamasının tünel kaplama süreleri ve maliyetleri üzerinde olumlu etki oluşturduğu aşikârdır. Hesaplamalarda ise çelik lif miktarı 1m³ püskürtme betonda 40 kg kullanıldığı kabul edilmiştir. Tünel kaplama süresinde önemli bir dilimi teşkil eden donatı işçiliğinin burda olmaması 4 aylık bir süre kazanımı sağlamaktadır. Her ne kadar çelik lif’in birim fiyatı yüksek olsa da miktar bakımından BÇIII donatıdan daha az kullanıldığından ve donatı montaj işçilik maliyeti olmayacağı için tutarında ciddi bir düşüş yakalanmış olunmaktadır.

Çizelge 16. Çakmak istasyonu tünellerinin çelik lifli dökme beton kaplama ile yapılması durumunda ikinci kaplama süresi

Tünel Tipleri	Uzunluk (m)	Sayı	Zaman (ay)
P1 Peron Tüneli	270	2	5,5
P2 Havalandırma Bağlantı Tüneli	32	2	1,2
B1.2 Bağlantı Tüneli	20	7	2,3
B3.1 Merdiven Tüneli	35	2	1,5
A Havalandırma Tüneli	75,86	1	1,5
Toplam Zaman (ay)			12

Çizelge 17. Çakmak istasyonu tünellerinin çelik lifli dökme beton kaplama yapılması durumunda ikinci kaplama maliyeti

İmalat Adı	Miktarı	Birim Fiyatı (€)	Tutarı (€)
Çelik Lif (ton)	319,25	1.350,00	430.987,50
Beton (m ³)	7.981,25	49,45	394.672,81
Kalıp (m ²)	20.140,55	19,55	393.747,65
Su tutucu (m)	4.784,14	8,26	39.516,96
Membran (m ²)	20.160,45	7,95	160.275,59
Toplam:			1.419.200,52

4.2.2. Püskürtme Beton İle İkinci Kaplama Yapılmasının Süre Ve Maliyeti

Son zamanlarda özellikle Yurtdışında hala yapımına devam edilen İngiltere'deki Crossrail Projesi, Etiyopya'daki Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Hızlı Tren Projesinde ve Ülkemizde de bazı metro ve karayolu tünellerinde püskürtme beton ile tünellerin kaplamaları yapılmaktadır. Bu projelerden inşaatına devam edilen Etiyopya'daki Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Hızlı Tren Projesinde hasırlı püskürtme beton ve çelik lifli püskürtme beton ile tünellerin kazı-desteği süreleri yer almaktadır.

Çizelge 18'de yer alan kazı-destek süreleri hâlihazırda Etiyopyada devam eden Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Hızlı Tren Projesindeki faaliyet raporlarından derlenmiştir. Çizelge 18'deki günlük ilerlemeler 40 m'lik bir peron tipi tünellerde çelik hasırla birinci (destek) kaplama süresini içermektedir. Sadece patlatma delgisinin olduğu günü çıkardığımızda geri kalan 10 günlük faaliyet raporunda çelik hasırlı püskürtme beton ile birinci kaplama performansını saat bazında göstermektedir.

Çizelge 18. Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Etiyopya Hızlı Tren Projesinde 40 m'lik tünellerde çelik hasırlı destek ilerleme süresi

Hasır Çelikli Püskürtme Beton İle Kazı-destek	01.06.2018	02.06.2018	03.06.2018	04.06.2018	05.06.2018	06.06.2018	07.06.2018	08.06.2018	09.06.2018	10.06.2018	11.06.2018	Toplam Süre (saat)
Umbrella&Süren Delgisi	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Umbrella&Süren Montajı	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Umbrella&Süren Enjeksiyon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Patlatma Delgisi	7,5	4,5	5,0	5,5	6,0	5,0	8,0	14,5	10,0	11,5	10,3	87,8
Patlayıcı Dolumu	1,8	1,5	0,0	3,8	1,0	1,0	1,8	3,5	3,5	0,0	2,0	19,8
Kontrollü Patlatma	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kazı Kesiti Kontrolü	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,5	0,3	0,0	0,0	1,5
Kazı	3,0	1,0	0,0	2,5	2,8	2,5	1,5	1,0	1,5	2,3	1,3	19,3
Nakliyat	7,5	3,3	0,0	3,0	3,5	4,5	2,8	4,5	2,8	3,0	4,3	39,0
Birinci(Koruma) Püskürtme Betonu	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	0,8	0,5	1,0	3,3
Birinci Çelik Hasır Delgisi	1,3	1,0	0,0	0,0	1,5	1,0	0,0	0,0	0,0	2,3	0,0	7,0
Kafes Kiriş Kurulumu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Birinci Çelik Hasır Montajı	0,0	3,0	0,0	0,0	2,0	1,5	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	9,8
İkincil Püskürtme Betonu	0,0	7,8	0,0	1,8	5,5	1,5	2,8	0,0	0,0	0,5	3,0	22,8
Kaya Bulonu Delgisi	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	2,5	0,0	1,0	2,3	0,0	1,0	12,8
Enjeksiyon	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	2,0	1,0	0,0	1,0	0,0	0,0	6,0
Ölçüm	1,8	1,3	0,0	1,3	1,0	0,5	1,0	1,0	1,0	0,0	0,8	9,5
Diğer işler	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	0,0	1,0
Destek	0,0	0,8	0,0	1,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8
Kırım	0,8	0,0	0,0	1,5	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	5,3

Çizelge 19'daki veriler Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Hızlı Tren Projesindeki aynı tip kesite sahip tünelde kazı-destek sürelerinin tutulduğu faaliyet raporlarından derlenmiştir. 10 günlük faaliyet raporunda çelik lifli püskürtme beton ile birinci kaplama 50 m'lik ilerleme sağlamıştır.

Çizelge 18'deki yer alan çelik hasırla destek süresi, Çizelge 19'da çelik lif kullanıldığı için yer almamaktadır.

Çizelge 19. Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Etiyopya Hızlı Tren Projesinde 50 m'lik tünelde çelik telli püskürtme beton ile destek ilerleme süresi

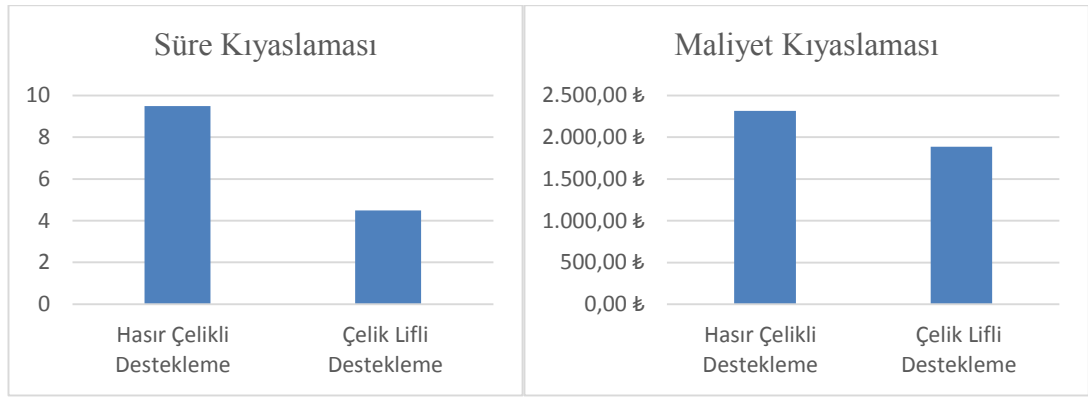
Çelik Lifli Püskürtme Beton İle Kazı-destek	01.06.2018	02.06.2018	03.06.2018	04.06.2018	05.06.2018	06.06.2018	07.06.2018	08.06.2018	09.06.2018	10.06.2018	11.06.2018	Toplam Süre (saat)
Umbrella&Süren Delgisi	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Umbrella&Süren Montajı	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Umbrella&Süren Enjeksiyon	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Patlatma Delgisi	7,5	4,5	5,0	5,5	6,0	6,0	9,3	12,5	10,0	13,0	10,3	89,5
Patlayıcı Dolumu	1,8	1,5	0,0	3,8	2,0	1,8	1,8	1,8	1,8	2,0	1,8	19,8
Kontrollü Patlatma	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kazı Kesiti Kontrolü	0,0	0,0	0,0	0,3	0,3	0,0	0,3	0,5	0,3	0,0	0,0	1,5
Kazı	3,0	1,0	0,0	2,5	2,8	2,5	1,5	1,0	3,8	0,0	1,3	19,3
Nakliyat	7,5	3,8	0,0	3,0	4,0	5,0	4,5	2,8	5,8	0,5	4,0	40,8
Birinci(Koruma) Püskürtme Betonu	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,3	0,0	1,0	3,3
Birinci Çelik Hasır Delgisi	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Kafes Kiriş Kurulumu	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Birinci Çelik Hasır Montajı	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
İkincil Püskürtme Betonu	0,0	7,8	0,0	1,8	5,5	1,5	2,8	0,0	0,0	3,8	0,0	23,0
Kaya Bulonu Delgisi	0,0	0,0	6,0	0,0	0,0	2,5	0,0	2,5	0,8	0,0	2,8	14,5
Enjeksiyon	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	2,0	1,0	1,0	0,0	0,0	1,5	7,5
Ölçüm	1,8	2,3	0,0	1,3	1,0	2,5	1,0	1,0	1,0	1,3	0,8	13,8
Diğer işler	1,3	2,0	0,0	0,0	1,5	0,0	1,0	0,0	0,0	1,0	0,0	6,8
Destek	0,0	0,8	0,0	1,5	0,0	0,0	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	2,8
Kırım	0,8	0,0	0,0	1,5	0,0	1,0	0,0	0,0	0,0	2,0	0,0	5,3

Yukarıdaki Çizelge 18 ve Çizelge 19'dan çıkarılacak sonuç:

Çelik tel takviyeli püskürtme beton uygulamasında çelik hasır montaj süresi olmayacağı için çelik hasır montajı, fırkete delgi ve demirinin (hasır donatısını tünel cidarına bağlayan) montajı sürelerini çıkardığımızda zamandan %20'lik ciddi bir kazanım sağlanmış olmaktadır. Bu bahsedilen süre kazanımı sadece tek sıra çelik hasır montajından elde edilen süre kazanımıdır. Çift sıralı çelik hasırla desteklenen tünellerde ise çelik lif uygulamasının kazandıracığı zaman tasarrufu iki katına çıkacak yani %40 lık bir zaman tasarrufu sağlanabilecektir.

Çizelge 20’de İstanbul Metrosu 4.Levent-Ayazağa-Hacıosman Metro Projesi Anahat (A tipi) tüneline üst yarı kısmının hasır ve çelik lifle desteklenmesi sonucu 1 m’lik ilerleme süre ve maliyetleri verilmektedir (Ayiş, 2010). Çizelge 20’den yararlanılarak Şekil 4.13’te tünel desteğinin hasır çelikli püskürtme beton ve çelik lifli püskürtme betonla sağlanması durumunda süre ve maliyet kıyaslamaları grafiksel olarak yer almaktadır.

Grafikte de görüldüğü üzere hasır çelik yerine çelik lif kullanılması durumunda süresel anlamda %55’lik zaman kazanımı sağlanmış oluyor. Hasır çelik uygulamasının süresel dezavantaj oluşturmasının nedeni ise çelik lifli uygulamada olmayan donatı bağlama işçiliği ve montajı için gerekli olan sürenin bu uygulamada yer almasıdır.



Şekil 4.13 Tünel desteğinin çelikli hasır püskürtme beton ve çelik lifli püskürtme betonla sağlanması durumunda süresel ve maliyet kıyaslamaları

Çizelge 20. İstanbul Metrosu 4.Levent-Ayazağa-Hacıosman Metro Projesi Anahat (A tipi) tünelde üst yarı kısmının hasır ve çelik lifle desteklenmesi sonucunda 1 m’lik ilerleme maliyetlerinin kıyaslanması (2010 yılı fiyatlar ile)

Hasır Çelikli Püskürtme Betonla Destekleme Yapılması							Çelik Lifli Püskürtme Betonla Destekleme Yapılması						
	Yapılan İmalatlar	Miktar	İşlem Süresi (Saat)	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	İmalat Tutarı (TL/m)		Yapılan İmalatlar	Miktar	İşlem Süresi (Saat)	Birimi	Birim Fiyatı (TL)	İmalat Tutarı (TL/m)
Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0,5	saat/m	182	91	Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0,5	saat/m	182	91
1.Aşama	1.Kat Çelik Hasır Maliyeti	14	2	m ² /m	4,1	58	1.Aşama	Çelik İksa Maliyeti	181	1,5	kg/m	1,5	278
	Çelik İksa Maliyeti	181	2	kg/m	1,5	278		İş Makinesi	1	1,5	saat/m	141	211,5
	İş Makinesi	1	2	saat/m	141	282		Makine Operatörü	1	1,5	saat/m	21	31,5
	Makine Operatörü	1	2	saat/m	21	42		Düz İşçi	5	1,5	saat/m	14,3	107,3
	Düz İşçi	5	2	saat/m	14,3	143	Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0,75	saat/m	182	136,5
Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0,75	saat/m	182	136,5	2.Aşama	Toplam Püskürtme Beton (20 cm)	2,9	1,75	m ³	179,7	521,2
2.Aşama	1.Kat Püskürtme Beton (15 cm)	2,1	1	m ³	78,6	165,1		Geri Sıçrama Miktarı (%7,5)	0,22	1,75	m ³	179,7	39,5
	Geri Sıçrama Miktarı (%10)	0,21	0	m ³	78,6	16,5		Püskürtme Robot Makinesi	1	1,75	saat/m	198	346,5
	Püskürtme Robot Makinesi	1	1	saat/m	198	198		Robot Operatörü	2	1,75	saat/m	21	73,5
	Robot Operatörü	2	1	saat/m	21	42		Düz İşçi	2	1,75	saat/m	14,3	50,1
	Düz İşçi	2	1	saat/m	14,3	28,6							
Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0,75	saat/m	182	136,5							
3.Aşama	2.Kat Çelik Hasır Maliyeti	14	1	m ² /m	4,1	58							
	İş Makinesi	1	1	saat/m	141	141							
	Makine Operatörü	1	1	saat/m	21	21							
	Düz İşçi	5	1	saat/m	14,3	71,5							
Hazırlık	İlave Hazırlık Maliyeti	1	0,75	saat/m	182	136,5							
4.Aşama	2.Kat Püskürtme Beton (5 cm)	0,8	0,75	m ³	78,6	62,9							
	Geri Sıçrama Miktarı (%10)	0,08	0,75	m ³	78,6	6,3							
	Püskürtme Robot Makinesi	1	0,75	saat/m	198	148,5							
	Robot Operatörü	2	0,75	saat/m	21	31,5							
	Düz İşçi	2	0,75	saat/m	14,3	21,5							
	Toplam Süre		9,5	Toplam Maliyet	2.315,75			Toplam Süre		4,5	Toplam Maliyet	1.886,54	

Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro projesindeki saha çalışmalarından edinilen bilgiler doğrultusunda tünellerde püskürtme beton ile yapılan ikinci kaplama süreleri ve maliyetleri ile ilgili çalışma aşağıda yer almaktadır. Bu hattın Kısıklı istasyonundaki havalandırma tüneline uygulanan püskürtme beton ile nihai kaplamadan edinilen bilgiler Çakmak istasyonunun bütün tünelleri için türetilerek teorik bir hesap yapılmıştır. Aşağıda Çakmak istasyonuna ait tünellerin püskürtme beton ile nihai kaplama yapılması durumunda çıkacak süre ve maliyet bilgileri yer almaktadır. Şekil 4.14'te tünel kemerinde hasır donatı bağlanmasından sonra püskürtme beton uygulaması yapılmaktadır.



Şekil 4.14 Montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton uygulaması ile nihai kaplama yapılması (normet.com)

Çizelge 21 ve Çizelge 22’de ise kaplama yapılmaksızın dökme beton yerine püskürtme beton kullanılması ile süresel anlamda 6 aylık gibi önemli bir zaman kazanımı sağlanmaktadır. Yalnız maliyet anlamında ise aynı şey söylenemez.

Püskürtme betonun birim fiyatının neredeyse dökme betonun iki katı olması ve püskürtme beton kullanıldığında ideal bir yalıtımın sağlanması için kullanılan püskürtme membranın da birim fiyatının pvc membrana göre yüksek olmasından dolayı ikinci kaplama maliyetleri yükselmiş olmaktadır. Burda 6 aylık süre kazanımının proje süresi üzerindeki etkisi düşünüldüğünde erken işletme getirisi sağlayacağı için önem arz edecektir. Çift katlı donatı üzerine püskürtme beton uygulaması yapılmasının teknik anlamda dezavantaj oluşturan yanı ise donatının arkasının homojen bir şekilde betonla yeterince dolmaması, boşluk oluşturmastır. Ayrıca BÇIII kullanıldığından geri sıçrama (rebound) yüzdesi artacağından dolayı beton kaybı da yükselecektir.

Çizelge 21. Çakmak istasyonuna ait tünellerin montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton uygulandığı takdirde ikinci kaplama süresi

Tünel Tipleri	Uzunluk (m)	Sayı	Zaman (ay)
P1 Peron Tüneli	270	2	5
P2 Havalandırma Bağlantı Tüneli	32	2	1
B1.2 Bağlantı Tüneli	20	7	1,75
B3.1 Merdiven Tüneli	35	2	1
A Havalandırma Tüneli	75,86	1	1,25
Toplam Zaman (ay)			10

Çizelge 22. Çakmak istasyonuna ait tünellerin montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton uygulandığı takdirde ikinci kaplama Maliyeti

İmalat Adı	Miktarı	Birim Fiyatı (€)	Tutarı (€)
Donatı (ton)	1.280,89	814,51	1.043.297,71
Püskürtme beton (m ³)	9.178,44	81,76	750.429,05
Su tutucu (m)	4.784,14	8,26	39.516,96
Püskürtme membran (m ²)	20.160,45	25,00	504.011,30
Toplam:			2.337.255,02

Montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton yöntemi, dökme beton yöntemine göre yapım süresi açısından avantaj sağlamış olsa da bu süreyi daha da kısaltacak ve maliyet anlamında dökme betona göre daha kazanç sağlaması beklenen çelik lifli püskürtme betonla nihai kaplama yapılması yöntemi de son zamanlarda tünellerde uygulanmaktadır. Şekil 4.15’da çelik lifli püskürtme beton ile nihai kaplaması yapılan tünel yer almaktadır.



Şekil 4.15 Çelik lifli püskürtme beton uygulaması ile nihai kaplama yapılması

Çizelge 23 ve Çizelge 24’te çelik lifli (donatılı) püskürtme beton ile nihai kaplamanın süre ve maliyeti yer almaktadır. Çizelgelerde de görüldüğü üzere çelik lifli püskürtme beton ile nihai kaplama yapılmasının süresel anlamda çok ciddi bir zaman kazanımı sağladığı aşikârdır. Bu yöntemle nihai kaplamanın 6 ay gibi bir süreye inmesi iş programında yer alan diğer inşaat ince işlerine, elektromekanik, sinyalizasyon imalatlarına da erken başlanılma fırsatı vermektedir. Bu yöntemle elde edilen süresel avantaj erken işletme gelirleri açısından çok önem arz edecektir.

Çizelge 23. Çakmak istasyonuna ait tünellerin kaplamaları çelik lifli püskürtme beton yöntemi ile yapıldığı takdirde ikinci kaplama süreleri

Tünel Tipleri	Uzunluk (m)	Sayı	Zaman (ay)
P1 Peron Tüneli	270	2	3
P2 Havalandırma Bağlantı Tüneli	32	2	0,6
B1.2 Bağlantı Tüneli	20	7	1,05
B3.1 Merdiven Tüneli	35	2	0,6
A Havalandırma Tüneli	75,86	1	0,75
Toplam Zaman (ay)			6

Çizelge 24. Çakmak istasyonuna ait tünellerin kaplamaları çelik lifli püskürtme beton ile yapıldığı takdirde ikinci kaplama maliyetleri

İmalat Adı	Miktarı	Birim Fiyatı (€)	Tutarı (€)
Çelik lif (ton)	351,18	1.350,00	474.086,25
Püskürtme beton (m ³)	8.779,38	81,76	717.801,70
Su tutucu (m)	4.784,14	8,26	39.516,96
Püskürtme membran (m ²)	20.160,45	25,00	504.011,30
Toplam:			1.735.416,21

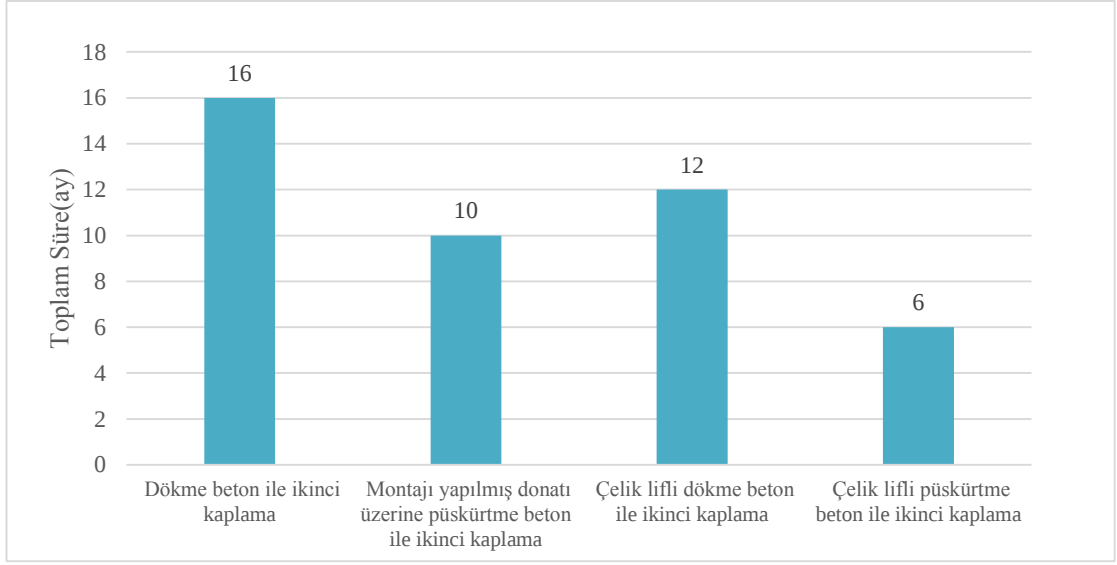
4.2.3. Tünellerdeki İkinci Kaplama Yöntemleri Üzerinden Süre ve Maliyet Analizi Yapılması

Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesinden Çakmak istasyonuna ait önceki sayfalarda yapım yöntemine göre tünel kaplama maliyeti ve süresine ait Çizelgeler oluşturuldu. Bu bölümde ise mevcut Çizelgeler üzerinden tünel kaplama maliyet ve sürelerine ait grafiklere yer verilerek bilhassa metro imalat süresinde önemli bir zaman dilimini oluşturan tünel imalatlarında maliyet ve süre açısından en uygun yöntem ortaya çıkarılmıştır. Çizelge 25'teki değerler çakmak istasyonu tünel kaplamalarına ait toplam süre ve maliyetleri içermektedir. Bu Çizelgedeki değerlerden Şekil 4.16 ve Şekil 4.17' de grafikte görüldüğü üzere dökme beton yöntemi ve püskürtme beton yöntemi ile kaplamaların süresel ve maliyet olarak mukayesesi yapılmıştır.

Çizelge 25. Nihai(İkinci Kaplama) Süre ve Maliyetleri

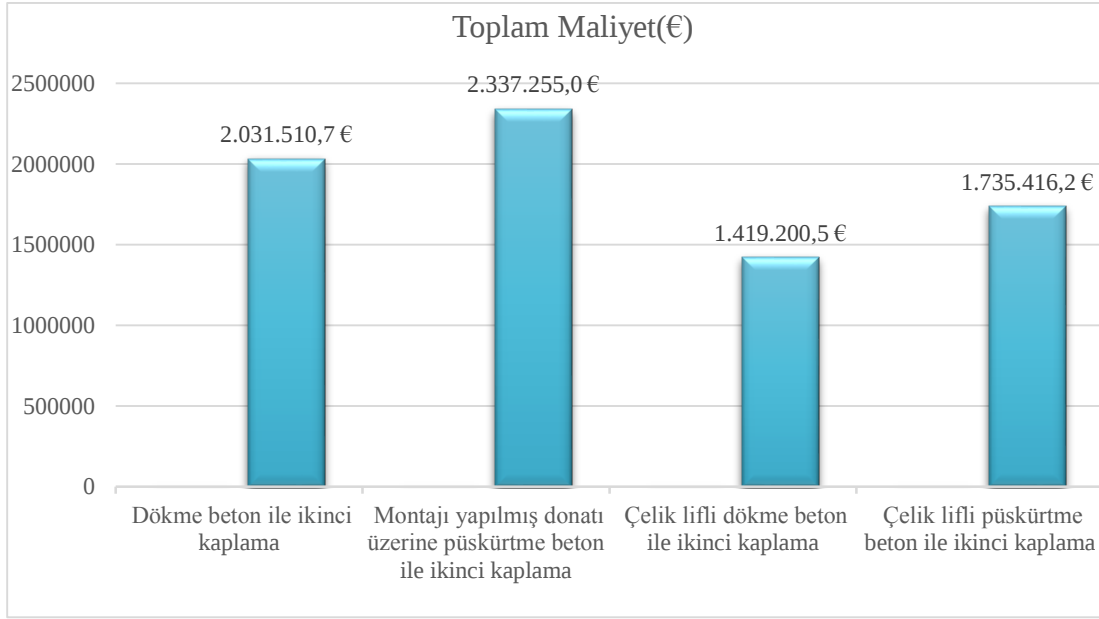
Nihai (İkinci) Kaplama Yöntemleri	Toplam Süre (ay)	Toplam Maliyet (Euro)
Dökme beton ile ikinci kaplama	16	2.031.510,7 €
Montajı yapılmış donatı üzerine püskürtme beton ile ikinci kaplama	10	2.337.255,0 €
Çelik lifli dökme beton ile ikinci kaplama	12	1.419.200,5 €
Çelik lifli püskürtme beton ile ikinci kaplama	6	1.735.416,2 €

Şekil 4.16'da Tünel nihai(ikinci) kaplama yöntemlerinin süresel açıdan kıyaslandığını gösteren grafik yer almaktadır. Bu grafikte Çakmak istasyonunun dökme beton yöntemi ile yapılan tünel nihai kaplamaları şartlar aynı kabul edilerek istasyon için geliştirilen diğer nihai kaplama yöntemlerine göre 16 ay'la en uzun süren yöntem olarak görülmektedir. Çelik lifli dökme beton ile tünel kaplaması yapıldığında donatı bağlama işçiliği olmayacağı için 4 aylık bir zaman kazanımı sağlanmış olmaktadır. Donatılı püskürtme beton ile nihai kaplama yapıldığında ise iş kalemleri içerisinde en çok zaman alan kalıp işçiliği, montajı ve priz süresini bekleme olmayacağı için 6 ay'lık bir zaman kazanımı olmaktadır. Çelik lifli püskürtme beton ile tünel nihai kaplamaları yapıldığında ise hem donatı işçiliğinin olmaması hem de yöntem gereği kalıp gerektirmemesinden dolayı dökme betona göre 10 ay, çelik lifli dökme betona göre 6 ay, donatılı püskürtme betona göre de 4 ay erken biterek süresel anlamda en avantajlı yöntem olmaktadır.



Şekil 4.16 Yapım Yöntemlerine göre Nihai Kaplamanın Süresel Olarak Kıyaslanması

Şekil 4.17’de Çakmak istasyonunda tünel nihai kaplamalarında uygulanmış dökme beton yöntemi ile istasyon tünelleri için geliştirilen alternatif nihai (ikinci) kaplama yöntemlerinin mali açıdan kıyaslandığını gösteren grafik yer almaktadır. Bu grafikte Çakmak istasyonunun dökme beton yöntemi ile yapılan tünel nihai kaplama maliyeti 2.031.510,7 € tutmaktadır. Çelik lifli dökme beton ile tünel kaplaması yapıldığında, kullanılan çelik lif birim fiyatı yüksek olmasına karşın klasik BÇIII donatıya göre tonaj olarak az kullanıldığı ve donatı bağlama işçiliği olmayacağı için uygulanan dökme betona göre % 31 daha az maliyetle 1.419.200,5 € tutmaktadır. Montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton ile nihai kaplama yapıldığında gerek püskürtme beton birim fiyatının yüksek olması gerekse de püskürtme membran birim fiyatının yüksek olmasından dolayı diğer yöntemler içerisinde en yüksek maliyet olan 2.337.255,0 € tutmaktadır. Montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton ile nihai kaplama yönteminde kazı-destekten sonra PVC membran kullanılan tüneller de vardır. PVC membranın dezavantaj oluşturan yanı ise; gerek püskürtme betonun kullanılacağı yüzeylerde yeterince pürüzlü bir yüzeyi oluşturamaması dolayısıyla yeterince aderans yüzeyi sağlayamaması gerekse de donatı bağlanması sırasında pvc membranın delinme ihtimalinden dolayı yeterince çözüm sağlayamamasıdır. Çelik lifli püskürtme beton ile tünel nihai kaplamaları yapıldığında ise hem donatı işçiliğinin olmaması hem de yöntem gereği kalıp gerektirmemesinden dolayı kaplama maliyeti 1.735.416,2 € tutmaktadır. Dökme betona göre % 15’lik bir maliyet kazancı sağlamaktadır.



Şekil 4.17 Yapım Yöntemlerine göre Nihai Kaplamanın Maliyet Olarak Kıyaslanması

Bu kıyaslamadan çıkarılan sonuç ise montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton ile yapılan tünel nihai kaplamanın dökme beton ile yapılan tünel nihai kaplamaya göre süresel anlamda 6 ay, çelik lifli dökme betona göre ise 4 ay zaman kazanımı sağlamaktadır. Maliyet açısından montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton yöntemi, dökme beton yöntemleri ile kıyaslandığında ise Çizelge 25’te en yüksek maliyete sahip olmasından dolayı dezavantajlı görünmesine rağmen projenin 6 ay erken bitirilip hattın da planlanan süreden önce işletmeye alınması durumu düşünüldüğünde avantajlı duruma geçmektedir.

Çakmak istasyonu nihai kaplamaları çelik lifli (donatılı) püskürtme beton ile yapıldığında ise hem süresel açıdan hem de mali açıdan diğer yöntemlere göre en uygun kaplama yöntemi olarak ortaya çıkmaktadır. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesinin Çizelge 26’da gösterilen özet iş programındaki planlanan imalat sürelerine bakıldığında NATM (Kazı-İç kaplama) süresinin projenin diğer kalemleri içerisinde en uzun süren imalat kalemi olarak görülmektedir (İBB, 2012). Bu da NATM’ın proje süresi üzerindeki kilit rolünü göstermesi açısından anlamlıdır. NATM’ın proje süresi üzerindeki etkisi göz önünde bulundurularak bu sürenin çelik lifli püskürtme beton yöntemi ile tünel kaplamaları yapılması durumunda bu sürenin % 40-50’e kadar kısılacağı sahada tutulan faaliyet raporlarından elde edilen bilgiler göstermektedir. Bunlardan Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Etiyopya Hızlı Tren Projesinde tutulan faaliyet raporlarından elde edilen verilerle oluşturulan Çizelge 18’de 50 m’lik tünel kazı-desteğinde kullanılan çelik lifin çelik hasıra (tek sıra) göre % 20’lik süre kazanımı sağladığı görülmüştür. Bu projenin yanısıra İstanbul Metrosu 4.Levent-Ayazağa-Hacıosman Metro Projesi ana hat tünelinin 1 m’lik tünel kazı-desteğinde kullanılan çelik lifin çelik hasıra (çift sıra) göre % 52’lik süre kazanımı ve % 18’lik maliyet kazancı sağladığı görülmüştür.

Çizelge 26. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metro Projesi Planlanan İmalat Süresi (ay bazında)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	
İş Yeri Teslim																																															
Deplase+Mobilizasyon																																															
TBM Portal Giriş Kazı Destek																																															
TBM Montaj																																															
TBM(6 adet)																																															
Bağlantı Tünelleri																																															
Faz Beton+Ray+Katener Sistem																																															
NATM(Kazı+İç Kaplama)																																															
Tünel Elektromekanik																																															
İstasyon Kazı Destek+Betonaarme																																															
İstasyon Mimari+Elektromekanik																																															
Entegrasyon Testleri																																															
Test Sürüş																																															

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Metro Projelerinde tünel kaplamalarının klasik yöntemin dışında alternatif yöntemlerle yapılması durumunun istasyon yapım süresine ve maliyetine etkisi analiz edilmiştir. Tez’de ülkemizdeki projelerin yanısıra yurtdışında devam eden projelerden de referanslar alınmıştır. Farklı projelerde tünel kaplama imalatlarının alternatif ve klasik yöntemlerle yapılması durumu incelenmiştir.

Kısmen aç kapa ve kısmen tünel olarak yapılmış olan Çakmak İstasyonunun tünel olarak inşa edilmiş olan peron tüneli, havalandırma tüneli, merdiven tünelleri ve bağlantı tünellerinin nihai kaplamasının alternatif yöntemlerle yapılması durumunun istasyon yapım süresine etkisi analiz edilmiştir.

Yapılan saha tespitleri ve mukayese neticesinde elde edilen süre ve maliyetler şöyledir;

1. Donatı bağlanması akabinde kalıp montajı sonrası beton dökülmesi durumunda tünel kaplamaları 16 ayda tamamlanırken; montajı yapılmış ikinci kaplama donatısı üzerine püskürtme beton ile yapılması durumunda tünel kaplamalarının 10 ayda ve % 13 daha yüksek maliyetle tamamlanabileceği görülmüştür.
2. Tünel nihai kaplamasında Çelik lifli donatı kullanılarak beton döküldüğünde nihai kaplama süresi 12 ayda tamamlanabilmekte ve donatı bağlandıktan sonra kalıp kurularak beton dökülmesi durumuna göre % 31 daha düşük maliyetle nihai kaplama tamamlanabilmektedir.
3. Tünel nihai kaplamasında Çelik lifli (donatılı) püskürtme beton kullanıldığında ise nihai kaplama süresi 6 ayda bitmekte ve donatı bağlandıktan sonra kalıp kurularak beton dökülmesi durumuna göre % 15 daha düşük maliyetle nihai kaplama tamamlanabilmektedir. Her ne kadar lifli donatılı kalıplı yöntem ilk maliyet olarak Çelik lifli püskürtme beton yöntemine göre daha düşük gözükse de metro projesinin 6 ay gibi bir süre daha erken tamamlanması sonucu yapım sabit giderlerinin azalması ve işletme gelirleri göz önüne alındığında donatılı püskürtme betonun daha avantajlı olduğu aşikârdır.
4. Yine Etiyopya’da devam eden Awash-Kombolcha-Haragebeya Demiryolu Hattı Hızlı Tren projesinde tünel imalatlarında birinci kaplamada hasır yerine

kullanılan elik lif takviyeli püskürtme betonun süresel olarak daha avantajlı olduğu sahada tutulan günlük faaliyet raporlarıyla ortaya çıkarılmıştır. Bu projede elik lifli püskürtme beton kullanımı ile tek sıra hasır uygulaması ile tutan süreden (%20) kazanım sağlanmış olur. Zemin şartlarına göre çift sıra hasır uygulanması gereken bölgelerde ise elik lif kullanıldığında %40'lık bir zaman kazanımı elde edilmiş olunmaktadır.

Netice olarak, uygulanacak yöntemin tercihinde işin süresi ve elde edilecek işletme gelirinin ön planda olduğu metro gibi büyük projelerde, gerekli işçilik ve imalat kalitesi sağlanması durumunda nihai kaplamanın donatılı püskürtme beton kullanılması süre ve toplam maliyet avantajı açısından değerlendirilmesi gereken önemli bir alternatif yöntem olarak mutlaka dşnlmelidir.

6. KAYNAKLAR

1. Khosravi, Mahdi., Kähkönen, Kalle (2015), Management and planning under complexities of metro construction, 8th Nordic Conference on Construction Economics and Organization Tampere University of Technology, 33101 Tampere, Finland
2. İstanbul Ulaşım Master Planı-2010,(www.ibb.gov.tr)
3. Ayış,H.İ.,Tünel Açma Sistemlerinde Çelik Lifli Püskürtme Betonun Uygulanabilirliği,Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü,Yüksek Lisans Tezi,2010
4. Erguvanlı, K., (1982) Mühendislik Jeolojisi, İ.T.Ü Yayını, İstanbul.
5. Ünlütepe, A., (2005) “Marmaray BC1 Projesi ve Ölçme Çalışmaları”, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası, Mühendislik Ölçmeleri STB Komisyonu, 2.Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu , 23-25 Kasım 2005, İ.T.Ü-İstanbul.
6. Karakuş, M., Fowell, R.J., (2004) “An Insight Into the New Austrian Tunnelling Method”,Kayamek, 2004-VII. Bölgesel Kaya Mekanik Sempozyumu / Rockmec, VIIth Regional Rock Mechanics Symposium, 2004, Sivas.
7. Arıoğlu, E., Yüksel, A., Yılmaz, A.O., (2008) “Püskürtme Beton Bilgi Föyleri – Çözümlü Problemler Kitabı”, Mayıs 2008 İstanbul.
8. Stack, B., (1982) “Handbook of Mining and Tunnelling Machinery”, John Wiley & Sons, New York.
9. Friant, J.E., Özdemir, L., (1994) “Tünel Açma Teknolojisi Bugün ve Yarın”, İTÜ Maden Fakültesi Tünel ve Galeri Açma Meslek İçerisi Semineri, İstanbul.
10. Çınar, M., Feridunoğlu, C., (1994) “Tünel Açma Makineleri (TBM)” Ulaşımında Yer altı Kazıları I. Sempozyumu, 1-3 Aralık 1994, 343-367, İstanbul.
11. Cecil, O.S., (1970) “Correlation of Rock Bolt-Shotcrete Support and Rock Quality Parameters in Scandinavian Tunnels”, Ph.D. Thesis, University of Illinois, Urbana.
12. Mahar, J.W., Parker, H.W., Wuellner, W.W., (1975) “Shotcrete Practice in Underground Construction”, Department of Civil Engineers, Univesity of Illinois, Final Report, August 1975.
13. Gürol, G., Doyuran, C., (2009), “Püskürtme Beton, Şantiye Dergisi, Nisan 2009”,250: 96-100, İstanbul.
14. Melbye, T.A., (2006) “Sprayed Concrete for Rock Support”, UGC

- International Division of BASF Construction Chemical, 11th Ed, 279, Zurich.
15. DSİ Teknik Araştırma ve Kalite Kontrol Dairesi, (1994) “Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Beton” MLZ-878: 9-75, Ankara.
 16. Özbayoğlu, F., Kenet, L., (1989) “Püskürtme Betonu Uygulamalarında Çelik Fiber Kullanımının Dayanım Üzerindeki Etkileri”, Türkiye İnşaat Mühendisliği X. Teknik Kongrem Bildiriler Kitabı, 9 –12 Ekim 1989 Ankara T.M.M.O.B İnşaat Mühendisleri Odası Cilt 2.p 507-522.
 17. Yurdakul, Ş., (2001) “Püskürtme Beton Teknolojisinin TTK Ocakları Ana Galerilerinde Uygulanabilirliğinin Araştırılması”, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen bilimleri Enstitüsü Maden Mühendisliği Anabilim Dalı Yüksek Lisans Tezi, Eylül 2001, Zonguldak.
 18. Banthia, N., Trottier, J.F., Beaupre, D., (1994) “Steel-Fiber Reinforced Wet-Mix Shotcrete: Comparisons With Cast Concrete”, Canada, 431.
 19. Taşdemir, M.A., Bayramov, F., Kocatürk, A.N., Yerlikaya, M., (2007) “Betonun Performansa Göre Tasarımında Yeni Gelişmeler”, İstanbul.
 20. ITA Working Group N 12, (2006) “Shotcrete Use”, ITA/AITES REPORT February 2006,Lausanne, Switzerland, 16.
 21. Arnoğlu, E., Girgin,C., (1998) “Çelik Lifli Püskürtme Beton Kaplama Tasarımı Kaya Patlama Olayına Maruz Tünellerde Kullanım”, 4.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu Bildiriler Kitabı, 22-23 Ekim 1998, Zonguldak.
 22. ASTM C 1018 Standardı, (1997) “Standard Test Method for Flexural Toughness and First-Crack Strength of Fiber-Reinforced Concrete”, 10 December 1997.
 23. Spearing A.J.S., Hague I., (2003) “The Application of Underground Support Liners Reaches Maturity”, Technology Roadmap for Rock Mechanics, South Africa Institute of Mining and Metallurgy
 24. ACI 506.2-95 (1995) “Specification for Shotcrete”, American Concrete Institute.
 25. Çivici, F., (2004) “Çelik Lif Donatılı Betonun Eğilme Tokluğu”, Beton Kongresi, 10-12 Haziran 2004, İstanbul.
 26. Uğurlu, A., (1994) “Çelik Liflerle Güçlendirilmiş Betonun Özellikleri ve Su Yapılarında Kullanılması”, DSİ Teknik Bülteni,80, 18-22.
 27. <https://www.normet.com/process/concrete-spraying/#gallery-3>, 27.03.2018
 28. delmepatlatma.org,2017
 29. <https://teknolojinsaat.blogspot.com/2016/12/mans-tuneli.html>,2018
 30. www.insaathaber.org,2018
 31. <http://www.delmepatlatma.org/tunel-tarihcesi-blgdty-55.html>,04.03.2018
 32. <http://paulwmarino.org/special-announcement.html>
 33. <https://www.wowamazing.com/trending/spooky/haunted-by-ghosts-tunnels-with-spooky-stories-behind-them>
 34. Üsküdar-Ümraniye-Çekmeköy Metrosu İnşaatı Ve Elektro-Mekanik İşler Projesi,Rev.00-B03,2013

EKLER

Ek-1. Yumuşak Zemin Tünel Açma Makineleri İle İlgili Detaylı Bilgiler

1. Arazi Dengeleme Makineleri (EPB)

Arazi basıncını dengeleme esasına göre çalışan EPB makineleri ilk olarak Japonya'da 1960-70 'li yıllarda görülmeye başlamıştır (Maidle, 1996).

Yapışkan olmayan ortamlarda ve yeraltı su seviyesi altında bulunan zeminlerde ilerlemeler sırasında stabilité kaybı kaçınılmazdır. Genellikle bu gibi alanlarda ve kendini kısa süreli bile tutamayan kayaçların kazısında bu makineden faydalanılır. Temel çalışma prensibi su getirini veya arazi akmasını kontrol etmek amacıyla ayna boşluğunun kapalı bir hacim haline getirilerek basınç altında tutulması, 'bizzat arazi ve içindeki su basıncı etkisiyle, kesme kafası ve ayna boşluğunda doğal bir basıncın oluşmasına imkân verilmesi' diye tanımlanabilir (Friant, 1994). Bir başka deyişle amaç kazılan malzemenin kesici kafa haznesini doldurması ve tüm yüzeyi desteklemesidir. Bu destekleme basıncının tünel kalınlığındaki doğal arazi basıncını karşılayacak bir değerde ayarlanması gerekir. Bu makineler 10 bara (1 MPa) kadar ulaşan basınç altında çalışabilecek şekilde yapılabilirler. En iyi çalışma koşulları arazi nemlilik oranının % 10-15 veya daha az olduğu durumlardır.

EPB makinesi çok sert kayaçlardan (diskli) çok yumuşak olanlarına (kalem kesikli) kadar, değişik kayaç ve zemin formasyonlarında kullanılmak üzere tasarımılandırılabılırler. Çalışmalarındaki basitlik ve uygulama alanlarının genişliğinden dolayı, giderek çamur makinelerin (slurry machines) yerlerini almaktadırlar.

Bir EPB makinesinde kazılan malzeme bir vida konveyör vasıtası ile kesici kafa haznesinden çıkarılır. Kazı bölgesindeki arazi basıncı azalmalarını ve bu yüzden oluşacak oturmaları engellemek için malzeme aktarımının kontrollü bir şekilde yapılması gereklidir. Bu yüzden vida konveyörün hızı malzeme çıkış hızının kontrol etmek için ayarlanabilir. İstenilen bir şekilde vida hızı ayarlaması bilgisayarlı bir monitörden izleme sistemiyle yapılabilir. Dengeli ve güvenli bir kazı yapabilmek için malzeme çıkış hızının makine ilerleme hızına eşit olması gerekir, Böylece zemin oturmalarına yol açabilecek fazla malzeme çıkışına izin verilmez. Eğer ortamda

bulunan suyun basıncı atmosfer basıncının üzerine çok fazla çıkarsa bazı basınç kilitleri gerekli olabilir. Basınç kilitleri vidanın bir yanından diğerine doğru bir patlamayı önlemek için gereklidir ve vidanın çıkış kapısında konumlandırılır.

EPB makinelerinde diğer metotların aksine ikinci bir destekleme metodu kullanılmaz (sıkıştırılmış hava, süspansiyon). Akıcı formasyon döner kafadaki kesiciler tarafından kazılır. İttirme kuvveti aynaya kazı haznesinin doldurulmasıyla meydana getirilen basınç duvarı yoluyla transfer edilir. Böylece kazı bölgesinde kontrolden çıkmış bir şekilde malzeme akışı engellenmiş olur. Kazı bölgesindeki formasyon uygulanan itirme kuvveti nedeniyle daha fazla yük alamadığı anda denge sağlanmış olacaktır. Formasyonu destekleme basıncı, sağlanan dengenin üzerine çıkarılırsa kazı bölgesindeki akıcı formasyon çok daha sağlam bir hale gelecektir. Eğer açılan tünel yeryüzüne yakınsa çok fazla uygulanan itirme basıncı sebebiyle kabarmalar meydana gelebilir.

Tünel boyunca taşıma, bant konveyörlerle, vagonlarla, damperli kamyonlarla ya da borular içerisine taşınmayı kolaylaştıran bir katkı maddesi eklendikten sonra katı taşıma pompaları yardımıyla yapılabilir.

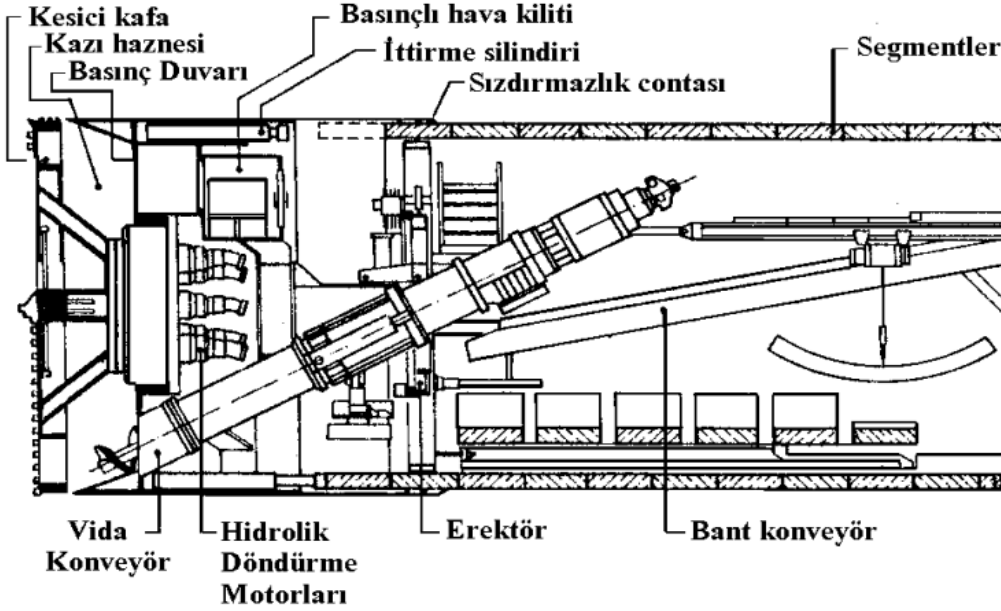
EPB çalışma prensiplerine bağlı olarak çeşitli isimler alır: Malzeme Hapsedici Şiltleri (Soil Confinement Shields), Su Basıncını Destekleme Şiltleri (Water Pressure Balance Shields), Yüksek Yoğunluktaki Çamur Şiltleri(High Density Slurry Shields) ve Çamur Şiltleri (Mud Shields).

Eğer malzeme destekleme basıncını sağlayabilecek durumda ve vida konveyörle taşınacak kıvamda değilse çeşitli kıvamlaştırmacı katkı maddeleri eklemek gerekebilir. Standart durumda, çeşitli katkı maddeleri kayaca ya kazı aynasında iken direkt olarak ya da kesici kafa haznesine alındıktan sonra enjekte edilir fakat verimlilik açısından en iyisi birinci seçenektir. Bu maddeler 3 amaç için malzemeye enjekte edilir:

- Malzemenin akışkanlığını artırarak kesici kafa ve vida konveyörden geçişini kolaylaştırmak,
- Kesici kafadaki herhangi bir boşluğu doldurmak ve stabiliteyi sağlamak,
- Kazılan kaya eğer geçirgen ise su fişkırmasını önleyen hemen hemen sızdırmaz bir engel oluşturmak.

EPB makinesinin kazı anında çalışma aşamaları da şu şekilde gerçekleşmektedir: Şekil 1'de elemanları görülen bir EPB makinesinde öncelikle kesici kafanın döndürme motorları ile döndürülmesi ve kesici kafaya itirme silindirleri ile araziye destekleyecek kadar ya da biraz daha fazla kuvvet verilmesiyle akıcı alüvyal zemin kazı haznesine dolmaya başlar. Kazı haznesi tamamen dolduktan sonra istenilen destekleme ortamı yaratılır ve kazılan malzeme vida konveyör yardımıyla normal basınçtaki bölgeye alınmaya başlanır. Burada vida konveyörün en önemli görevi aynada oluşturulan

basıncın kademeli olarak düşürülmesi ve normal basınca indirilerek düzenli bir malzeme çıkışının sağlanmasıdır. Vida konveyörün çıkış kapısından bant konveyöre boşalan malzeme kuyruk bölümde bekleyen vagonlara ulaşır ve buradan da kuyu ağzına taşınır.



Şekil 1. EPB Şilti Kesit Görünümü

Eğer kazı sırasında istenilen miktarda malzeme geliri olmuyorsa yani malzeme yerine-su geliyor veya zeminin fazlasıyla kuru olması nedeniyle vida konveyörden malzeme geçişi mümkün olmuyorsa, kazı aynasına doğru malzemeyi daha kaygan yapan ve böylece su geçişini engelleyen bir katkı madde enjekte edilmesi gerekebilir. Kazı ilerlerken şildin tam arkasına taşıyıcı raylarla getirilen beton segmentler erektörler yardımıyla yerleştirilirler.

Bu arada segmentler ve zemin arasında kalan boşluklar beton- bentonit karışımı ile doldurularak kapatılırlar. [Hakan Tunçdemir, ‘Arazi Basıncının Dengelenmesi Esasına Göre Çalışan Tam Cephe Tünel Açma Makinelerinin Kazı Performansını Etkileyen Zemin Özellikleri ve İzmir Metrosu Örneği’, 1998,4.Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu]

2. Çamur Şildi (Slurry Machine)

Bu tip şiltler, arazinin çok akıcı olduğu veya tünel güzergâhı boyunca böyle akıcı formasyonlara da rastlanabileceği durumlar için yapılmışlardır. Makine, değişken devirli tam cephe kesme kafasına sahip, astarlara dayanarak itmek suretiyle kuvvet oluşturan tam bir şilt tasarımıdır. Genel olarak kalem keskil kullanılmakla birlikte bazen disk keskillerle kombinezon da yapılabilmektedir. Diskler kalem keskilere

nazaran biraz daha öne çıkmış vaziyette olurlar. Böylece, büyük bloklara rastlandığında disklerin onları parçalaması ve kalem keskinin kırılması önlenmiş olmaktadır.

Makine kalem keskinin tam cephe şilt tipinden ‘daima basınç altındaki kafa ile çalışıyor’ olma özelliğiyle anılmaktadır. Akıcı çamur, (genellikle, bentonit) ayna ile kesme kafası arasındaki boşluğa pompalanmaktadır. Bu sıvı, aynadan sıyrılarak kazılıp çıkarılan malzeme ile katışmakta ve bu karışım bir çamur pompası ile geri tarafa alınıp yeryüzüne pompalanmaktadır. Yeryüzünde süzülüp temizlenen sıvı, yeniden devreye sokularak kullanılmaktadır.

Bu makine Japonya'da ve Batı Avrupa'da göçmeyi önlemek için kazı aynasını basınç altında tutmanın gerekli olduğu şartlarda geniş çapta kullanılmaktadır. Çalışma esnasında dikkat edilecek başlıca hususlar:

- 1 - Aynaya gereğinden fazla basınç vermemek (bu durumda yeryüzünde kubbeler oluşabilir),
- 2- Yeryüzüne ulaşacak şekilde baca oluşmasını önlemek için kazılan malzeme miktarını dikkatle ölçmek.

Bu tip makineler derinliği az olan yerlerde kullanılmakta olup, uygulanan basınç değeri 3 bar mertebesinde (Ayış,2010).

Ek-2. Kaya Sınıfları ve Özellikleri

ÖNORM B2203'te tanımlanan kaya sınıfları ve özellikleri aşağıda özetlenmiştir:

A Kaya Sınıfı:

A kaya sınıfı 'Stabil-Hafif Aşırı Sökülen kaya Kütleleri' olarak tanımlanmaktadır. Bu cins kaya kütleleri genellikle stabil olup elastik davranış gösterirler. Yerel destek uygulanmaması halinde, yerçekimi nedeniyle, yer yer sığ göçükler meydana gelebilir. Göçükler genellikle izole olmuş, önemsiz eklem yapıları nedeniyle oluşur. Elastik deformasyonlar hızla azalır. A kaya sınıfı kendi içinde A1 (Stabil) ve A2 (Sonradan az sökülen) olmak üzere iki tipe ayrılır.

A1 Destek Sınıfı:

'Stabil' kaya kütlesi olarak adlandırılır. Kaya kütlesi elastik davranış gösterir. Deformasyonlar küçük olup, çok hızlı azalır. Serbest kaya parçaları temizlendikten sonra sökülme eğilimi yoktur. Suyun kaya stabilitesine olumsuz bir etkisi yoktur. Tünel kazısı teorik olarak "tam ayna" olarak yapılabilir. Kazı profilinin büyük olması halinde, kazı genellikle üstyarı ve altıyarı kazısı şeklinde sürdürülür. Delme-patlatma kazı için gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu yumuşak patlatma şartları ve yapım tekniğine bağlı olarak seçilir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

A2 Destek Sınıfı:

'Sonradan Az Sökülen' kaya kütlesi olarak adlandırılır. Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Kaya kütlesi elastik davranış gösterir. Tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında süreksizlikler ve kaya kütlesi zati ağırlığından dolayı sığ sökülmelerin olma eğilimi vardır. Suyun kaya stabilitesine etkisi gözardı edilebilecek durumdadır. Tünel kazısı teorik olarak 'tam ayna' olarak yapılabilir. Kazı profilinin büyük olması halinde, kazı genellikle üstyarı ve altıyarı kazısı şeklinde sürdürülür. Delme-patlatma kazı için gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu yumuşak patlatma şartları ve yapım tekniğine bağlı olarak seçilir. Üstyarı kazısında 2.5-3.5 m, altıyarıda 4 m ile sınırlanmaktadır. Bu tip destek sınıfında sadece bölgesel olarak tünel tavanında/yan duvarlarda yersel blokların stabil hale getirilmesi amacıyla kaya bulonları kullanılabilir. Bu durumda kullanılacak kaya bulonları, aynadan itibaren en çok bir ilerleme adımı geriden uygulanacaktır. Kaya bulonlama yönü süreksizliklerin yönelimlerine göre seçilecektir. Bulonlama ve diğer destekler projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

B Kaya Sınıfı:

B kaya sınıfı 'Gevrek Kaya Kütleleri' olarak tanımlanmaktadır. 'B' olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı, yapısal kenetlenme ve/veya çekme mukavemeti azlığından

ötürü hızlı gevşeme ve ayrışmaya yatkındır. Hemen hemen tüm çevrede, boşluk civarındaki ikinci gerilmeler, kaya kütlelerinin mukavemetini biraz aşmakta, bununla beraber bu zafiyet mekanizması içerilere ulaşmamaktadır. Destek yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler meydana gelir. B kaya sınıfı kendi içinde B1 (Gevrek), B2 (Çok Gevrek) ve B3 (Taneli) olmak üzere üç tipe ayrılır.

B1 Destek Sınıfı:

‘Gevrek’ kaya kütlesi olarak adlandırılır. Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Patlatmadan kaynaklanan kayadaki gevşemeler ve kaya kütlelerinin düşük dayanımı tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında sökülmeyle neden olur. Suyun kaya stabilitesine etkisi genelde önemsiz olarak nitelenebilir. Tünel kazısı üstyarı ve altyarı olmak üzere iki kademededir. İlerleme adımı uzunluğu üstyarı kazısında 2.0-3.0 m arasında, alt yarıda ise 4.0 m olacaktır. İlerleme adımı uzunluğu zeminin desteksiz durma süresine, desteksiz açıklığa, destekleme elemanı yerleştirme süresine bağlı olarak ayarlanmalıdır. Kazı için delme patlatma gereklidir. Sınırlı bölgelerde sistematik destekleme gereklidir. Lokal olarak ön destekleme gerekebilir. Destekleme aynadan en fazla bir ilerleme adımı geriden monte edilecektir. Tehlikeli alanlar derhal desteklenecektir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

B2 Destek Sınıfı:

‘Çok gevrek’ kaya kütlesi olarak adlandırılır. Tünel desteklemesinin zamanında yapılması halinde deformasyonlar hızla azalır. Zamanında destekleme yapılmaması veya destekleme elemanlarının yetersiz olması halinde derinlere ulaşan gevşemeler ve buna bağlı olarak kopmalar meydana gelir. Bozuşmuş veya ayrılmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlelerinin mukavemeti üzerinde etkisi bulunmaktadır. Kazı tünel kesitine bağlı olarak bölünür. İlerleme adımı uzunluğu, desteksiz durma süresi ve desteksiz açıklığına bağlı olarak belirlenir. İlerleme adımı üstyarı kazısında 1.5-2.0 m altyarıda ise 3.0- 3.5 m’den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır. Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik destekleme gereklidir. Gerektiğinde tavanda süren kullanılacaktır. Süren için delme ve benzeri işlemlerin aynadaki veya tavandaki kaya kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenmelidir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

B3 Destek Sınıfı:

‘Taneli’ kaya kütlesi olarak adlandırılır. Bölünmüş kazıda bile kaya kütlelerinde dökülmeler meydana gelir. Kohezyonun az olması ve az çimentolaşma kazının stabilitesinde yetersizliğe neden olur. Bozuşmuş veya ayrılmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlelerinin dayanımı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bölünmüş kazı ile ilerleyebilmek için kaya kütlelerini iyileştirici, desteksiz durma süresini artırıcı önlemler alınmalıdır. İlerleme adımı uzunluğu üstyarı kazısında 1.25-1.50 m, altyarıda

ise 3 m'den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma ile yapılır, titreşime hassas kaya kütlelerinde mekanik kazı metotları kullanılacaktır.

Taban kazısı ve bir taban beton kemeri yapılması gerekli olabilir. Tünel tavanı ve yan duvarlarda, aynada ve aynanın ilerletilmesinden önce monte edilecek sistematik destekleme gerekmektedir.

Süren kullanımı yerel olarak gerekebilir. Sistematik çelik iksa kullanılacaktır. Jeolojik şartlara göre, üstyarı aynasından 75-100 metreden daha geride olmamak üzere, yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

C Kaya Sınıfı:

C kaya sınıfı 'Baskılı Kaya Kütleleri' olarak tanımlanmaktadır. 'C' olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı genellikle, kaya basıncının yeniden dağılımı süreci ve/veya deplasman sınırlamaları sonunda oluşan gerilmelerin kaya dayanımından daha büyük olduğunu göstermektedir. Kaya kütlelerinin aşırı gerilmelere maruz kalması ile kabuk atma, burkulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zafiyet mekanizmaları oluşur. Kaya kütlelerinin plastisite ve viskozitesi, zamana bağlı belirgin deformasyon davranış göstermesine ve sonuçta büyük deformasyonlara yol açar. Kaya zati ağırlık yüklerinin aktif hale geçmesi ve önemli miktarda gevşeme basıncı, sadece büyük deformasyonlara izin verildiğinde meydana gelir. Bu durum kaya kütlelerine zarar verecek derecedeki gevşeme ve ayrışma, kaya dayanımında büyük miktarda azalmaya yol açar. Açılan boşluktaki büyük deformasyonlar ve uzun dönemde zamana bağlı deplasman davranışı, zeminin elastik olmayan, plastik ve viskoz davranışına bağlıdır. Çatlamaya veya dökülmeye eğilimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenleri olan kaya kütleleri bu gruba girer. Bu grup, aynı zamanda ayrışmış veya bozuşmuş kayalar, gevşek zemin ve organik zeminler gibi kaya kütlelerini kapsamaktadır. Kaya kütlelerinin düşük özellikleri nedeniyle kohezyon miktarına ve/veya gevşeme basıncını takiben aşırı gerilmelere bağlı olarak, elastik veya plastik aşırı gerilme oluşur. C kaya sınıfı kendi içinde C1 (Dağ Atma), B2 (Baskılı), C3 (Çok Baskılı), C4 (Akıcı) ve C5 (Şişen) olmak üzere beş tipe ayrılır.

C1 Destek Sınıfı:

Yüksek örtü kalınlığı altında masif kayada yüksek ön gerilmeler kırılma kaya kütlelerinde elastik enerji depolanmasına neden olur. Bu enerjinin aniden yer değiştirmesiyle kayada kesme ve kaya yapısının ezilmesi ile birlikte kırılmalar olur. Desteksiz bırakılan kısımlarda fırlayan kayalar parçalanmaya müsaittir. Kaya kütlelerindeki kırılmalar derinlere ulaşır. Bozuşmuş veya ayrışmış kaya kütleleri içerisinde fazla su akışının kaya kütlelerinin dayanımı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Bölünmüş kazı ile ilerlenmelidir. Taban kazısı gereklidir. İlerleme adımı uzunluğu üstyarıda 1.5-2.0 m altyarıda 3 m'den fazla olmayacaktır. Kazı düzgün patlatma veya

mekanik kazı metotları ile yapılabilir. Destekleme elemanları olarak kısa ama sık yerleştirilmiş kaya bulonları, çelik hasır gereklidir. Ek tedbir olarak kaya kütlesindeki basıncı azaltıcı delikler açılabilir. Bu yöntemle dağ atmaları da önlenabilir. Jeolojik şartlara göre üstyarı aynasından 50-75 m'den daha geride olmamak üzere yerinde dökme bir taban kemeri betonu yapmak gerekebilir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

C2 Destek Sınıfı:

'Baskılı' kaya kütlesi olarak adlandırılmaktadır. C2, çevreleyen kaya kütlesi içerisinde derine uzanan plastik zonlar ve basınç veren davranışı ile karakterize edilir. Bu kaya kütlesinde orta derecede fakat belirgin olarak uzun süren ve yavaş son bulan deformasyonlar gözlenir. Kazı çevresindeki deformasyonların mertebe ve hızları orta derecededir. Plastik davranışlı yüksek kohezyonlu kaya kütlelerinde gerilme gözlenir. Su sızıntıları ve konsantre su akışının kaya kütlesi üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır. Tünel kazısının, üstyarı, altyarı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Portal bölgelerindeki özel durumlar hariç, üstyarı kazısı kendi içerisinde bölümlere ayrılacaktır. Üstyarı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu üstyarıda 0.75-1.25 m, altyarıda 2 m'den fazla olmayacaktır. Kazı düzgün patlatma ve mekanik kazı metotlarıyla yapılabilir. Traşlamadan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Genellikle tünel aynası stabildir. Tüm kesit çevresinde sistematik destekleme gereklidir. Her ilerleme adımında destekleme sistemi tamamlandıktan sonra bir sonraki ilerleme adımına geçilecektir. Tünel tavanında süren uygulaması gerekecektir. Süren uygulaması için delgi sırası ve sonrasında imalatın ayna ve tavandaki kaya kütlesinin olumsuz etkilenmesi önlenmelidir. Destekleme elemanlarının görevi derin plastik kırılmaları sınırlamaktır. Jeolojik şartlara uygun olarak üstyarı aynasından 50 m'den daha geride olmamak üzere taban kemeri gereklidir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

C3 Destek Sınıfı:

'Çok baskılı' kaya kütlesi olarak adlandırılır. C3, derin zayıflık zonlarının oluşması, başlangıçta yüksek ve hızlı deformasyonlar ile karakterize edilir. Deformasyonlar uzun sürer ve yavaş son bulur. Derine inen kırılma ve plastik bölgeler gözlenir. Su sızıntıları ve konsantre su akışının kaya kütlesinin davranışı üzerinde önemli etkisi olmaktadır. Tünel kazısının üst yarısı kazısı, alt yarısı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Genellikle üst yarısı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gerekecektir. Aynada sistematik destekleme gerekebilecektir. İlerleme adımı uzunluğu, üst yarısı kazısında 1.2 metreden, alt yarısı ise 2.0 metreden fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlatma veya mekanik kazı metotlarıyla yapılacaktır. Traşlamadan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Yoğun bir destekleme paterni tüm kazı aynalarında gerekecektir. Deformasyon mertebeleri, deformasyon boşlukları ve/veya büyük deformasyonlara cevap verebilecek destek elemanlarının kullanımı gibi

özel bir tertibat gerektirecektir. Destekleme elemanları, kaya kütlesinin üç eksenli gerilme durumunu idame ettireceklerdir. İlerleme adımı uzunluğunun kısaltılması, süren boyunun uzatılması ve üstyarı kazısı aynasında büyük bir merkez destekleme gövdesinin bırakılmasının yeterli olmaması halinde ayna kazısının ayrıca alt kısımlara bölünmesi gerekebilir. Muhtemel çözümler, üstyarı kazısının yarı taraf kazılar veya yan galeriler halinde yapılması olabilir. Komple kazı bölümünün aşırı düşey hareketleri olması halinde, kaplama temelini genişletilmesi, püskürtme beton kabuğunun temel bölgesinin bulonlanması ve enjeksiyonlanması veya geçici taban kemerleri gerekli olabilir. Tüm tünel desteklemesi sistematik olarak, üst yarı ve alt yarı kazı aynasının daha fazla ilerletilmesinden önce tatbik edilir. Tüm tavan kesimi üzerinde süren boru kullanımı gerekecektir. Süren için delme veya benzeri işlemlerin aynadaki veya tavandaki kaya kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenecektir. Üst yarı kazısında alt bölümlere ayrılmış enkesit ve geçici ring yapıları gerekli olabilir. Üst yarı kazısı aynasından 25-50 metre geride taban kemerinin ring kapaması gerekebilecektir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

C4 Destek Sınıfı:

‘Akıcı’ kaya kütlesi olarak adlandırılır. Çok az kohezyon ve sürtünme, kaya kütlesinin az plastik davranışı kısa süre desteksiz bırakılan bölünmüş kazıda bile tünel içine malzeme akışına sebep olur. Düşük kohezyon kazıda birçok alt bölünmeyi gerektirmektedir. Önceden süren montajı yapılmadan veya süren ve kazı ile birlikte püskürtme betonu kaplaması yapılmadan zeminin kendini tutma süresi yoktur. Su sızıntıları ve konsantre su akışlarının açığa çıkan zeminin davranış ve özelliklerinde önemli etkisi olabilecektir. Bu nedenle kayanın ortamının dayanımını iyileştirici önlemlerin alınması düşünülebilir. Aynada stabilite problemlerini önlemek için yan galeriler şeklinde bir alt bölünme gerekecektir. İlaveten üstyarı kazısı aynaları destekleme gövdeleri gereklidir. Önden yapılan desteklemeler veya özel destekleme önlemleri ile tünel aynasının destek etkisi sayesinde sınırlı kazı yapılmasına olanak verilmesi mümkündür. İlerleme adımı uzunluğu üstyarı kazısında 1.5 m altyarıda ise 2.0 m’den fazla olmayacaktır. Kazı tünel ekskavatörü ile yapılacaktır. Kazı ile birlikte püskürtme beton kaplaması gerekmektedir. Tünel desteklemesi, üstyarıda ve altyarıda her bir ilerleme adımında tamamlanmalıdır. Süren boru veya çelik levha süren tabiki, tavan kesiminin büyük kısmında gerekecektir. Kazı aynasında, püskürtme beton, hasır çelik, kaya bulonu, drenaj elemanlarından oluşan destekleme sisteminin, kazı sırasında veya hemen sonrasında kullanılması gerekebilecektir. Alt bölümlere ayrılmış kesitin kazısı ile birlikte püskürtme beton kaplaması yapılması gerekli olacaktır. Süren uygulanması zorunludur. Üst yarı kazısının alt bölümlere ayrılmış kesimlerinde geçici ring kapama gerekebilir. Taban kemerinde ring kapaması, üstyarı kazı aynası gerisinde 25 ile 50 metre arasındaki kısa mesafelerde gerekli olabilir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir.

C5 Destek Sınıfı:

‘Çok kohezyonlu, kısa süreli stabil’ kaya kütlesi olarak adlandırılır. Şişme potansiyelli kil minerali, tuz, anhidrit içeren kaya kütlelerinde su alımıyla meydana gelen hacim artışı sebebiyle gevşemeler olur. Kemer ve aynada serbest açıklıkların sınırlandırılmasıyla kaya kütlesi sınırlı bir sürede stabil kalabilir. Sızıntı ve konsantre su akışının, kazılan zeminin davranışı ve özelliklerinde büyük etkisi vardır. Şişme başlatılmış olabilir. Üst yarı, alt yarı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Pek çok halde üst yarı kazısı aynası için bir destekleme gövdesi gerekecektir. İlerleme adımı uzunlukları üst yarı kazısında 1.5 metreyi, alt yarı kazısında 3.0 metreyi geçmeyecektir. Kazı tünel ekskavatörü ile yapılabilir. Büyük kayaların veya mevzii olarak sert kaya kısımlarının kazısında patlatma gerekebilir. Tünel desteklemesi, üstyarıda ve altyarıda her ilerleme adımında tamamlanmalıdır. Süren boru veya çelik levha süren uygulaması, tavan kesiminin büyük kısmında gerekecektir. Alt bölümlere ayrılmış kesitin kazısı ile birlikte püskürtme beton kaplaması yapılması gerekli olacaktır. Geoteknik ihtiyaçlara uygun olarak üstyarı aynasından 25 metreden daha geride olmamak üzere taban kemeri gereklidir. Destekleme sistemi projelerde detaylı olarak gösterilecektir. Tünel güzergâhı üzerinde yapılan sondajlar ve sondaj numuneleri üzerinde yerinde ve laboratuvarında yapılan testler sonucunda elde edilen verilerin ışığında ÖNORM B 2203’e göre tünel yukarıda tanımlanan çeşitli kaya sınıflarına ayrılır. Her bir kaya sınıfı için kazı sistemi birinci destekleme elemanlarının (püskürtme beton, çelik hasır, çelik iksa, süren, bulon vb.) ve ikinci destekleme elemanlarının (kaplama betonu) tasarımı gerçekleştirilecektir. Tüneli boyunca tünel yapımı sırasında karşılaşılabilecek kaya/zemini tünelin kazı ve desteklemesine yönelik olarak sınıflandırılması ve kazı/destek tip projelerinin hazırlanmasında aşağıdaki sıra izlenecektir.

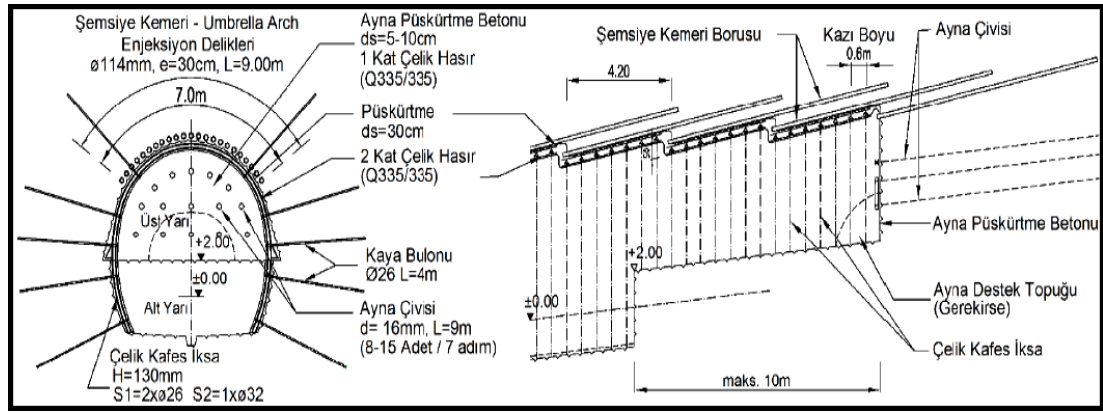
Aşamalı olarak ve delinerek açılan tüneller genel olarak Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (New Australian Tunnelling Method – NATM) ile inşa edilmektedir. Metro ve demiryolları gibi tünel imalatları çok olan projelerde NATM’in emniyetli ve ekonomik bir şekilde tünel açılmasına imkân veren bazı prensipleri içermesinden dolayı çoğu kez tercih sebebi olmuştur. Bu yöntemde kazı iksa (destekleme) sistemlerinin oluşturulmasında, uluslararası kabul görmüş Avusturya standartlarına (ÖNORM 2203, 1994) göre tanımlı kaya sınıflandırma sistemlerinden yararlanılmıştır. Bu sınıflandırma sistemi Çizelge 1’de verilen kaya destek sınıfları (Q) ve (RMR) değerlerine göre bulunmaktadır (www.dlh.gov.tr).

Çizelge 1 Avusturya Standartları ÖNORM 2203'e göre kaya sınıflama sistemlerinin karşılaştırılması ve kaya sınıfları

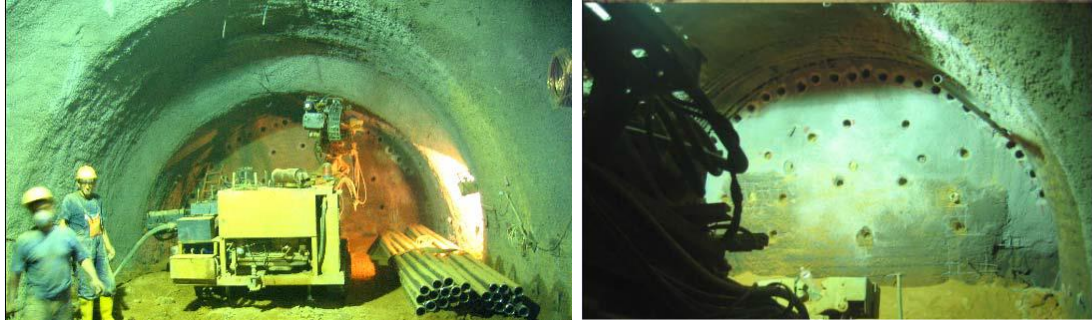
	BARTON KAYA KÜTLESİ NİTELİĞİ (Q)	BIENIAWSKI KAYA KÜTLESİ DEĞERİ (RMR)	ÖNORM B2203 Ekim 1994 öncesi	ÖNORM B2203 Ekim 1994 sonrası
1000	Son derece iyi	100		
400	Pek çok iyi	94	A1 Stabil	A1 Sağlam
100	Çok iyi	82.7 80		
40	İyi	76	A2 Aşırı sökülen	A2 Sonradan az sökülen
10	Orta	60		B1 Gevrek
4	Zayıf	58	B1 Gevrek	B2 Çok gevrek
1	Çok Zayıf	47		
0.1	Çok fazla zayıf	40	B2 Çok gevrek	B3 Taneli
0.01	Çok derece zayıf	29	C1 Baskılı	C1 Dağ atma
0.001		20	C2 Çok baskılı	C2 Baskılı
		17		C3 Cok baskılı
		15	L1 Gevşek zemin yüksek kohezyon	C4 Akıcı
		10	L2 Gevşek zemin düşük	C5 Şişen
		5		
		2.5		

Ek-3. Şemsiye borusu (umbrella arch) uygulaması

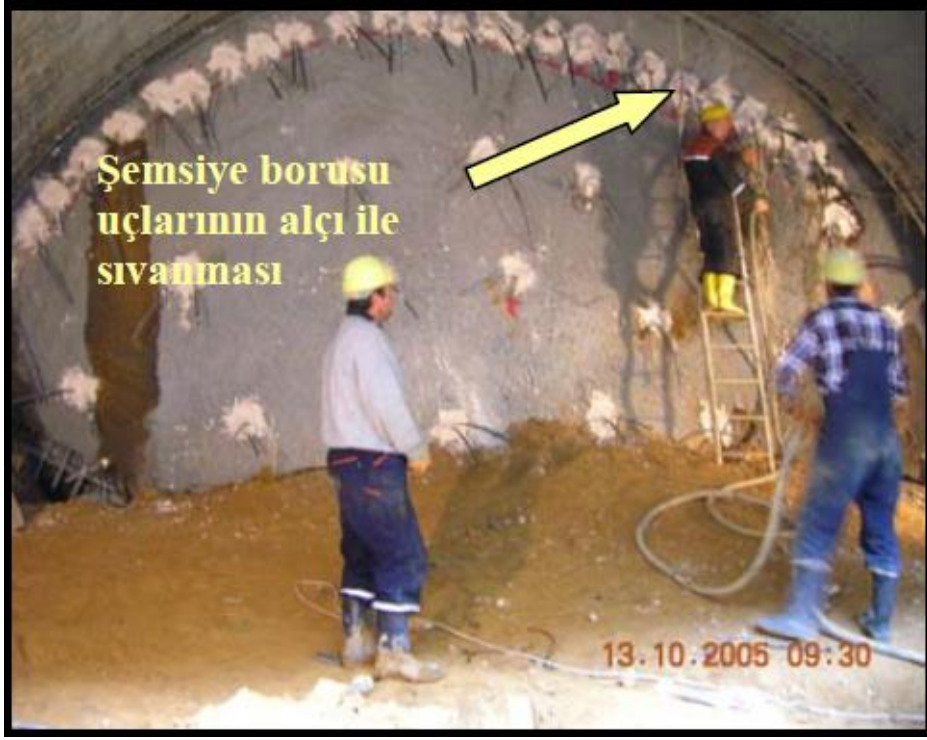
Şemsiye borusu uygulaması, delik çapı 130 mm, delik açısı 6-8° olacak şekilde delgi yapılarak içerisine et kalınlığı 6.3 mm, boyu 9 m olan, 11.6 cm çapındaki boruların yerleştirilmesi suretiyle sağlanmaktadır. Montajı yapılan şemsiye borularının baş kısmı alçıyla sıvandiktan sonra boru içine çimento şerbeti enjeksiyonu verilir. Geri dönüş borusundan çimento şerbeti gelinceye kadar çimento enjeksiyonuna devam edilir. Bu işlem ile hem borunun içi hem de boru ile delik arasında kalan boşluk kısım basınçlı çimento şerbeti ile doldurulmuş olur. Tipik bir şemsiye borusu uygulamasının şematik gösterimi Şekil 2’ de verilmiştir. Şemsiye borusunun uygulama detaylarına ait görünümeler ise Şekil 3, Şekil 4 ve Şekil 5’ te verilmiştir.



Şekil 2. Şemsiye borusu uygulamasının şematik gösterimi (Arioğlu, 2008)



Şekil 3. Şemsiye borusu delgisinin yapılması ve açılan delgilere yerleştirilmesi (Ayış,2010)



Şekil 4. Şemsiye borusu içine basınçlı çimento şerbeti enjeksiyonun yapılması (Ayış,2010)



Şekil 5. Belirli aralıklarla şemsiye borusu için açılan delikler (Selçuk,2015)

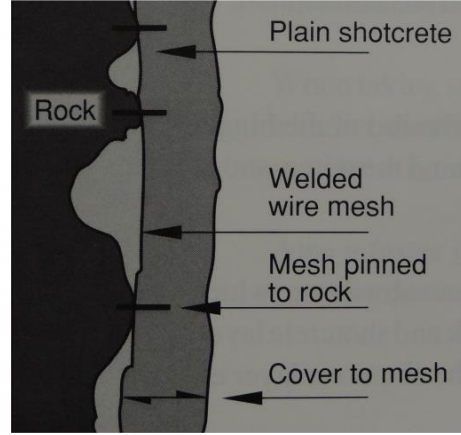
Ek-4. Tünel Kaplama Süreleri

Çizelge 2 Ovit Tünelinde Belli Mesafeler Arası Tünel İmalatlarında Sentetik Lif Katkılı Püskürtme Beton Kullanılmasının Süre Ve İlerleme Hızına Etkisi

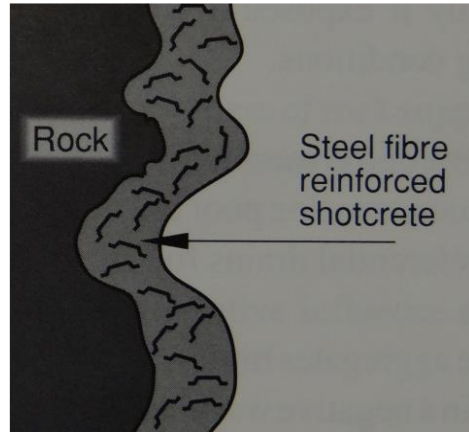
Kilometre		Klas	Ara Mesafe (m)	Sentetik Lif Katkılı Püskürtme Beton			Hasır Çelik		Sentetik Lif Katkılı Püskürtme Beton ile Aynı Sürede Hasır Çelik ile Yapılabilen İlerleme (m)
				Günlük Ortalama İlerleme (m)	İmalatın Tamamlanması İçin Gerekli Süre (Gün) (A)	Toplam İlerleme (m) (B)	Günlük Ortalama İlerleme (m)	İmalatın Tamamlanması İçin Gerekli Süre (Gün) (C)	
61+522,2	62+870,0	B1	1.347,82	9,10	148	1.347,8	7,00	193	1.347,8
62+870,0	62+900,0	B2	30,00	5,75	5	30,0	5,00	6	30,0
62+900,0	62+930,0	B3	30,00	5,00	6	30,0	5,00	6	30,0
62+930,0	63+050,0	C2	120,00	2,00	60	120,0	2,00	60	120,0
63+050,0	63+080,0	B3	30,00	5,00	6	30,0	5,00	6	30,0
63+080,0	63+110,0	B2	30,00	5,75	5	30,0	5,00	6	30,0
63+110,0	63+140,0	B1	30,00	9,10	3	30,0	7,00	4	30,0
63+140,0	65+660,0	A2	2.520,00	10,00	252	2.520,0	10,00	252	2.520,0
65+660,0	65+690,0	B1	30,00	9,10	3	30,0	7,00	4	30,0
65+690,0	65+720,0	B2	30,00	5,75	5	30,0	5,00	6	30,0
65+720,0	65+750,0	B3	30,00	5,00	6	30,0	5,00	6	30,0
65+750,0	65+920,0	C2	170,00	2,00	85	170,0	2,00	85	170,0
65+920,0	65+950,0	B3	30,00	5,00	6	30,0	5,00	6	30,0
65+950,0	65+980,0	B2	30,00	5,75	5	30,0	5,00	6	30,0
65+980,0	67+930,0	B1	1.950,00	9,10	214	1.950,0	7,00	279	1.082,7
67+930,0	69+090,0	B2	1.160,00	5,75	202	1.160,0	5,00	232	718,6
69+090,0	69+180,0	B3	90,00	5,00	18	90,0	5,00	18	90,0
69+180,0	69+390,0	C2	210,00	2,00	105	210,0	2,00	105	210,0
69+390,0	69+450,0	B3	60,00	5,00	12	60,0	5,00	12	60,0
69+450,0	72+060,4	B2	2.610,38	5,75	454	2.610,4	5,00	522	2.610,4
TOPLAM					1.602	10.538,2		1.814	9.229,5
Süre Farkı ((C A)/2)					106				
Mesafe Farkı ((D-B)x2)					2.617,5				

Çizelge 2’de Türkiye’nin en uzun karayolu tüneli olan Ovit Tünelinde farklı zemin sınıfında uygulanan tünel kaplama süreleri verilmektedir. 61+522,2~72+060,4 km’leri arası tünel kaplamasında sentetik lif katkılı püskürtme beton ile hasır çelik kullanılmasının süre ve ilerleme hızına etkisi gösterilmektedir. 10.5 km’lik mesafede hasır çelik ile lif takviyeli püskürtme beton arasındaki süre farkı 106 gündür. Bu da hasır çelik uygulamasına nazaran, lif takviyeli püskürtme beton ile her 1 km de yaklaşık 10 günlük bir zaman kazanımı sağlanmış olmaktadır.

Ek-5 Tünellerde Kaplama İmalatları



Şekil 6. Çelik hasır üzerine püskürtme beton uygulaması ile birinci kaplama yapılması (Vandevall, M. 1990. Çelik tel - Tunnelling the World. NV Bækert S.A, 1991 edition)



Şekil 7. Çelik lifli püskürtme beton uygulaması ile birinci kaplama yapılması (Vandevall, M. 1990. Çelik tel - Tunnelling the World. NV Bækert S.A, 1991 edition)

Şekil 6 ve Şekil 7’de çelik hasır üzerine püskürtme beton uygulaması ile çelik lifli püskürtme beton uygulaması arasındaki fark ve arzu edilen neticenin hangisi ile elde edilebileceği teknik gözle bakıldığında görülmektedir. Şekil 7’de görüldüğü gibi çelik lifle püskürtme yapılması durumunda kaya yüzeyinin girinti ve çıkıntılı kısımları boşluk kalmayacak şekilde dolmaktadır. Ancak çelik hasırda bu çoğu kez mümkün olmamaktadır. Ayrıca geri sıçrama miktarı konusunda da hasır, tel’e göre dezavantajlı konumdadır. Bu da maliyette artışa sebep olmaktadır. Şekil 8’de Uzundere HES Tüneli’nin çelik lifli püskürtme beton ile kaplama yapıldığını gösteren bir fotoğraf yer almaktadır.



Şekil 8. Uzundere HES Tüneli'nin Çelik lifli püskürtme beton ile kaplama yapılması

Aşağıda Şekil 9'da İngiltere'de devam etmekte olan Crossrail projesine ait çelik lifle nihai kaplaması başarılı bir şekilde yapılmış olan farklı kesitlerde tüneller yer almaktadır. Bu tünelde kazı-destek sonrası nihai kaplamaya geçilmeden önce yalıtımı püskürtme membran ile sağlanmış ve ardından redüksiyon bölgelerine de sahip tünellerde çelik lifle nihai kaplama yapılmıştır.



Şekil 9. Çelik lifli püskürtme beton ile kaplaması yapılan tüneller (Crossrail Projesi)



Şekil 10. Çelik lifli püskürtme beton uygulaması ile nihai kaplama yapılması (Fotoğraf: Shani Wallace, Tunnel Talk, Temmuz 2011).

Ek-6 Tünellerde Su Yalıtımı



Şekil 11. Püskürtme membran uygulaması ile yalıtım yapılması (normet.com)

Tünellerde su yalıtımının sağlanması için genelde kazı-destek sonrasında nihai kaplamadan önce bitümlü membran uygulanır. Son zamanlarda ise Crossrail v.b metro projelerinde püskürtme membran kullanılmaya başlandı. Püskürtme membran ise püskürtme beton ve kaplama beton arasında çift taraflı yapışır ve kompozit kabuk yapısı oluşturarak sistemin birlikte hareket etmesini sağlamaktadır. Esnek ve iki beton yüzeyine de yüksek yapışma mukavemetiyle bağlanır. Diğer püskürtülerek uygulanan su yalıtım membranları gibi, su girişlerinin olduğu bölgelerde yalıtım uygulaması yapmak mümkün değildir. Püskürtme membrane ile başarılı bir yalıtım sağlanması için ise drenaj sistemi ya da drenaj hortumları kullanılarak bölgeden suyun uzaklaştırılması gerekmektedir. Ancak yoğun su girişi olmadığı sürece nemli bölgelerde uygulama yapılabilir. Şekil 11’de püskürtme membran ile tünelde su yalıtımı uygulaması yer almaktadır.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLERİ

Adı Soyadı: İdris ARAZ
Doğum Tarihi ve Yeri: 1991, Siirt
Elektronik Posta: idris.araz@outlook.com

EĞİTİM BİLGİLERİ

Derece	Kurum-Bölüm	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	İMU, Fen Bilimler Enstitüsü, Mühendislik Yönetimi Anabilim Dalı Mühendislik Yönetimi Bölümü	Devam ediyor.
Lisans	FSMVÜ, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü	2016
Lise	Ümraniye Merkez Anadolu Lisesi	2009

İŞ TECRÜBESİ

Tarih	Kurum-Proje	Görev
2018~	Arcadis&Tümaş,Dudullu-Bostancı Metro Projesi	İnşaat Saha Mühendisi
2017-2018	Haldız İnşaat,Teknopark İstanbul Projesi	Hakediş Mühendisi
2016-2017	Metot Construction,KOZ Mesa Projesi	İnşaat Saha Mühendisi

YABANCI DİLLER

İleri düzeyde İngilizce,
Orta düzeyde Arapça

ONAY

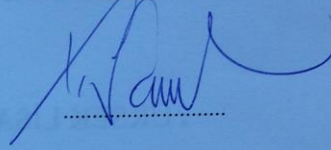
İstanbul Medeniyet Üniversitesi, Fen Bilimler Enstitüsü'nde Yüksek Lisans öğrencisi olan İdris ARAZ'ın hazırladığı ve jüri önünde savunduğu "Metro projelerindeki tünellerde ikinci kaplama betonu olarak donatılı püskürtme beton kullanımının proje maliyetine ve süresine etkisinin analizi" başlıklı tez başarılı kabul edilmiştir.

JÜRİ ÜYELERİ

İMZA

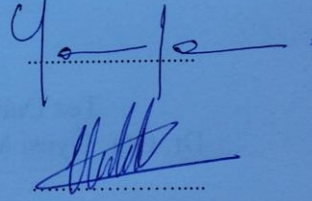
Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Mucahit NAMLI
İstanbul Medeniyet Üniversitesi



Üyeler:

Dr. Öğr. Üyesi Yavuz Selim GÜÇLÜ
İstanbul Medeniyet Üniversitesi



Dr. Öğr. Üyesi Hakkı Oral ÖZHAN
İstanbul Altınbaş Üniversitesi

Tez Savunma Tarihi: 2 Ocak 2019