

KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

TÜNEL KAZI - DESTEKLEMELERİ VE HASIR ÇELİK YERİNE
SENTETİK FİBER DONATI KULLANIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Alican BİRİNCİOĞLU

HAZİRAN 2017
TRABZON



**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**TÜNEL KAZI - DESTEKLEMELERİ VE HASIR ÇELİK YERİNE
SENTETİK FİBER DONATI KULLANIMI**

Alican BİRİNCİOĞLU

**Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsünde
“İNŞAAT YÜKSEK MÜHENDİSİ”
Unvanı Verilmesi İçin Kabul Edilen Tezdir.**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 30.05.2017
Tezin Savunma Tarihi : 23.06.2017**

Tez Danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN

Trabzon 2017

**KARADENİZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

başlıklı bu çalışma, Enstitü Yönetim Kurulunun / / gün ve sayılı
kararıyla oluşturulan jüri tarafından yapılan sınavda
YÜKSEK LİSANS TEZİ
olarak kabul edilmiştir.

Jüri Üyeleri

Başkan :

Üye :

Üye :

Prof. Dr. Sadettin KORKMAZ

Enstitü Müdürü

ÖNSÖZ

Tüneller geçmişten bu güne bir çok alanda kullanılmıştır. Farklı yapım teknikleri, gelişen teknolojiyle birlikte yol yapım çalışmalarında yolların geometrik standartlarının artırılması, yapım avantajlarıyla vazgeçilmez imalatlarda yerini almıştır. Tünel yapım aşamasında karşılaşmış olduğumuz güçlükleri gelişen teknolojiyle birlikte yenmekteyiz. Bu çalışmada da uygulama sırasında uzun ve yorucu bir imalat olan hasır çelik yerine sentetik fiber donatının kullanılması incelenmiştir.

Çalışmalarım süresince bana her zaman destek olan, benden yardımını esirgemeyen çok değerli saygıdeğer danışman Hocam Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN'a teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca, tez çalışmam boyunca bana yol gösteren hocam Doç. Dr. Sabriye Banu İKİZLER'e ve diğer tüm hocalarıma teşekkür ediyorum.

Bugünlere gelmemde önemli rol oynayan, hayatımı anlamlı kılan ve her zaman yol gösteren sevgili babam S. Hikmet BİRİNCİOĞLU'na, annem F. Ayşen BİRİNCİOĞLU'na, kardeşlerim Yrd. Doç. Dr. Bahar ÇELEN'e ve Buket BİRİNCİOĞLU CAN'a ve ayrıca tüm sevdiklerime teşekkür ediyorum.

Son olarak, çalışmalarım ve hayatım boyunca her zaman tüm desteğiyle yanımda olan hayat arkadaşım sevgili eşim Yrd. Doç. Dr. Nihan BİRİNCİOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Alican BİRİNCİOĞLU
Trabzon, 2017

TEZ ETİK BEYANNAMESİ

Yüksek Lisans Tezi olarak sunduğum “Tünel Kazı - Desteklemeleri ve Hasır Çelik Yerine Sentetik Fiber Donatı Kullanımı” başlıklı bu çalışmayı baştan sona kadar danışmanım Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN’ın sorumluluğunda tamamladığımı, verileri kendim topladığımı, analizleri ilgili laboratuvarlarda yaptığımı, başka kaynaklardan aldığım bilgileri metinde ve kaynakçada eksiksiz olarak gösterdiğimi, çalışma sürecinde bilimsel araştırma ve etik kurallara uygun olarak davrandığımı ve aksinin ortaya çıkması durumunda her türlü yasal sonucu kabul ettiğimi beyan ederim. 23/06/2017

Alican BİRİNCİOĞLU

İÇİNDEKİLER

	<u>Sayfa No</u>
ÖNSÖZ.....	III
TEZ ETİK BEYANNAMESİ.....	IV
İÇİNDEKİLER.....	V
ÖZET	VIII
SUMMARY	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	X
TABLolar DİZİNİ.....	XIII
1. GENEL BİLGİLER	1
1.1. Giriş.....	1
1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı.....	1
1.3. Literatür Özeti	2
1.4. Tüneller	5
1.4.1. Tünel Çeşitleri.....	6
1.4.1.1. Hizmet Tünelleri	6
1.4.1.2. Kanalizasyon Tünelleri	6
1.4.1.3. Altyapı Tünelleri.....	6
1.4.1.4. Enerji ve Su Tünelleri	6
1.4.1.5. Maden Tünelleri.....	7
1.4.1.6. Barınak ve Tapınak Tünelleri	7
1.4.1.7. Stokaj Tünelleri.....	8
1.4.1.8. Ulaştırma Tünelleri	8
1.4.1.8.1. Karayolu Tünelleri	8
1.4.1.8.2. Demiryolu Tünelleri.....	9
1.4.1.8.3. Yaya Yolu Tünelleri	9
1.4.1.8.4. Metro Tünelleri	10
1.4.2. Tünel Kazı Yöntemleri	10
1.4.2.1. Delme-Patlatma.....	10
1.4.2.2. Mekanik Kazı.....	11
1.4.2.2.1. Parçalı Kesit Kazısı.....	11
1.4.2.2.1.1. Kollu (Bumlu) Tünel Açma Makinesi (Roadheader)	11
1.4.2.2.1.2. Darbeli Tünel Açma Makinesi (Hammer)	12
1.4.2.2.1.3. Ekskavatörle Kazı	13

1.4.2.2.2.	Tam Kesit Kazısı-Tünel Delme Makinası TDM (Tunnel Boring Machine TBM).....	13
1.4.2.2.2.1.	Kalkansız (Açık) TBM	14
1.4.2.2.2.2.	Tek Kalkanlı (Shield) TBM	14
1.4.2.2.2.3.	Çift Kalkanlı (Shield) TBM	15
1.4.2.2.2.4.	Zemin (Pasa) Basınç Dengeleyicili TBM (Earth Pressure Balance-EPB).....	16
1.4.2.2.2.5.	Çamur Basıncılı TBM (Slurry Type)	17
1.4.2.2.2.6.	Karışık Tip (Mixshield) TBM.....	18
1.4.2.2.2.7.	Mikro Yöntem.....	19
1.4.2.3.	Aç-Kapa Yöntemi	19
1.4.3.	Tünel Açma Yöntemleri (Uygulanan Bazı Yöntemler).....	20
1.4.3.1.	Alman Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı).....	20
1.4.3.2.	Belçika Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı).....	20
1.4.3.3.	Eski Avusturya Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı).....	21
1.4.3.4.	İngiliz Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı)	22
1.4.3.5.	İsviçre Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı).....	22
1.4.3.6.	İtalyan Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı).....	23
1.4.3.7.	Ön Sağlamlaştırma Yöntemi (Tam Kesit)	24
1.4.3.8.	Tam Mekanizma Yöntemi (Tam Kesit).....	25
1.4.3.9.	Kalkan Yöntemi (Tam Kesit).....	25
1.4.4.	Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile Yapılan Tünel İşleri	25
1.4.4.1.	NATM'a Göre Kaya Sınıfları ve Özellikleri	26
1.4.4.1.1.	A Kaya Sınıfı ve Özellikleri (Stabil-Hafif Aşırı Sökülen Kaya Kütleleri).....	27
1.4.4.1.1.1.	A1 Kaya Sınıfı ve Özellikleri	27
1.4.4.1.1.2.	A2 Kaya Sınıfı ve Özellikleri	27
1.4.4.1.2.	B Kaya Sınıfı ve Özellikleri (Gevrek Kaya Kütleleri).....	27
1.4.4.1.2.1.	B1 Kaya Sınıfı ve Özellikleri.....	28
1.4.4.1.2.2.	B2 Kaya Sınıfı ve Özellikleri.....	28
1.4.4.1.2.3.	B3 Kaya Sınıfı ve Özellikleri.....	29
1.4.4.1.3.	C Kaya Sınıfı ve Özellikleri (Baskılı Kaya Kütleleri).....	29
1.4.4.1.3.1.	C1 Kaya Sınıfı ve Özellikleri.....	30
1.4.4.1.3.2.	C2 Kaya Sınıfı ve Özellikleri.....	30
1.4.4.1.3.3.	C3 Kaya Sınıfı ve Özellikleri.....	31

1.4.4.1.3.4.	C4 Kaya Sınıfı ve Özellikleri.....	32
1.4.4.1.3.5.	C5 Kaya Sınıfı ve Özellikleri.....	33
1.4.5.	Kaya Sınıflandırma Sistemi (Kaya Kütle Sınıflaması)	33
1.4.5.1.	Q Sistemi.....	34
1.4.5.2.	RMR (Jeomekanik Kaya Sınıflandırma Sistemi)	40
1.4.5.3.	RQD (Kaya Kalite Katsayısı)	42
1.4.6.	Tünel Desteklemesi.....	44
1.4.6.1.	Süren	44
1.4.6.2.	Çelik İksa	45
1.4.6.3.	Kaya Bulonları	45
1.4.6.3.1.	SN Bulonlar	46
1.4.6.3.2.	PG Bulonlar	46
1.4.6.3.3.	IBO Bulonlar.....	47
1.4.6.3.4.	SWELLEX Bulonlar	48
1.4.6.4.	Hasır Çelik	48
1.4.7.	Profil Kontrolü ve Toleranslar	49
1.4.8.	Püskürtme Beton.....	50
1.4.8.1.	Püskürtme Betonun Uygulama Yöntemleri	50
1.4.8.1.1.	Kuru Yöntem	51
1.4.8.1.2.	Yaş Yöntem	51
1.4.8.2.	Kuru ve Yaş Püskürtme Betonu Karşılaştırmaları.....	52
1.4.8.3.	Tünel Kaplamalarında Püskürtme Betonunun İşlevsel Özellikleri.....	52
1.4.8.4.	Püskürtme Betonun Uygulama Avantajları ve Dezavantajları	53
2.	YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR	54
2.1.	İnceleme Alanının Tanıtılması.....	54
2.1.1.	İnceleme Alanının Coğrafi Konumu.....	54
2.1.2.	İnceleme Alanının Jeolojik Yapısı.....	59
2.2.	Sentetik Lifli Fiber Donatı	59
2.3.	Tokluk İndeksi Sınıfının Belirlenmesi.....	60
2.4.	Sentetik Lifli Fiber Donatı Kullanımının Avantajları.....	61
2.5.	Yapısal Tasarım	62
3.	İRDELEME	88
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	94
5.	KAYNAKLAR	97
ÖZGEÇMİŞ		

Yüksek Lisans Tezi

ÖZET

Tünel Kazı - Desteklemeleri ve Hasır Çelik Yerine Sentetik Fiber Donatı Kullanımı

Alican BİRİNCİOĞLU

Karadeniz Teknik Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı
Danışman: Yrd. Doç. Dr. Zekai ANGIN
2017, 101 Sayfa

Tüneller, dünyada olduğu gibi ülkemizde de karayolu ulaşımının iyileştirilmesi ve geliştirilmesini sağlamakta ve birçok alanda bizlere çözüm üretmektedir. Tünelcilik geçmişten bugüne uygulanan yapım metodu olmakla birlikte gelişen teknolojiye ve geliştirilen yapım metodlarıyla birlikte vazgeçilmez sanat yapıları haline gelmiştir.

Bu tez çalışmasında, ilk olarak tünelcilikle ilgili literatür çalışması yapılmış olup Tünel Çeşitleri, Tünel Kazı Tipleri, Tünel Açma Yöntemleri, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi(NATM), Püskürtme Beton, Kaya Sınıflandırma Sistemi, Tünel Desteklemesi, Profil Kontrolü ve Toleranslar konuları anlatılmıştır. Bu çalışma kapsamında jeolojik ve jeoteknik yapısı incelenmiş ve tünel açımı için gerekli kaya kütle sınıflaması, iksa metodu belirlenmiş B1, B2, B3 zemin sınıflarında belirlenen hasır çelik yerine sentetik fiber kullanımı için yapısal tasarım yapılmış ve uygulaması gerçekleştirilmiştir. Yapılan yapısal tasarım sonucunda B1, B2, B3 zemin sınıflarında oluşabilecek gerilmeler sentetik fiber kullanılarak karşılanmıştır.

Tünelin destekleme sistemleri kritik kesimlerde oluşacak olan maksimum ve minimum kuvvetler, momentler düşünülerek tasarlanmıştır. Bu değerler jeolojik ve jeoteknik raporlardan alınarak kullanılmıştır. Burada hasır çelik takviyeli püskürtme beton ile bu gerilmelere karşı gelinmiştir. Bu çalışma içinde hasır çelik yerine sentetik fiber kullanılarak bu gerilmeler karşılanmış ve hasır çelik yerine kullanılacak sentetik fiber incelenmiştir. Güzergah boyunca farklı kuvvet ve momentler olduğundan kritik kesimler incelenerek optimum miktarlarda sentetik fiberle B1, B2, B3 zemin sınıflarında uygulama gerçekleştirilerek gerilmelere karşı yeterli dayanım elde edilmiştir. Uygun zemin sınıflarında püskürtme betonunda oluşacak kesit tesirlerini karşılayabilecek sentetik lifli fiber donatı dozajının belirlenmesi halinde hasır çelik olmadan püskürtme betonunda oluşabilecek kesit tesirlerini sentetik lifli fiber donatının karşılayabileceği sonucuna varılmıştır.

Sentetik fiber donatının uygulama aşamasında karşılaşılan problemler, çözümleri, avantaj ve dezavantajları incelenmiş olup maliyet karşılaştırılması yapılmıştır. Yapılan uygulama ve testlerle bu öngörülmenin yerinde oluşu ve istenilen proje değerlerine ulaşıldığı tespit edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Tünel, Tünel Kazısı, Tünel Destek Sistemleri, NATM (Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM), Püskürtme Beton.

Master Thesis

SUMMARY

Supporting Systems of Tunnel Excavation and Using Synthetic Fibre Instead of Mesh Reinforcement

Alican BİRİNCİOĞLU

Karadeniz Technical University
The Graduate School of Natural and Applied Sciences
Civil Engineering Graduate Program
Supervisor: Assoc Prof. Dr.Zekai ANGIN
2017, 101 Pages

Tunnels which improve road transport in our country, as in the whole world work out for us in numerous fields. Tunneling method is one of the construction method applied to the present from the past. It has also become an indispensable engineering structure with the developing technology and advanced construction method.

In this thesis, firstly a literature study on tunneling has been done and the topics of Tunnel Excavation Trenches, Tunneling Methods, New Austrian Tunneling Method (NATM), Shotcrete and Tunnel Types have been explained. Moreover, in this study geological and geotechnical structures were investigated. According to these structures, rock mass classification required to tunnel excavation and support systems are determined. Structural design has been made for using synthetic fiber instead of mesh reinforcement in B1, B2 and B3 soil classification and the application were carried out. As a result of the structural design made, the stresses which may occur in the B1, B2 and B3 soil classes are met by using synthetic fiber.

Supporting systems of the tunnel are designed by considering the maximum and minimum forces and moments that will occur in the critical sections. These values are taken from the geological and geotechnical reports. These stresses have been met with steel reinforced shotcrete. In this study, these stresses were met by using synthetic fiber instead of mesh reinforcement and synthetic fiber to be used instead of steel mesh has been investigated. Since there are different forces and moments along the route, critical sections were examined and adequate strength was obtained by applying the optimum amounts of synthetic fibers to B1, B2, B3 soil classes. In case of determining the dosage of synthetic fiber reinforcement which can meet the cross-sectional effects in shotcrete in suitable ground classes, it is concluded that cross-sectional effects which may occur in shotcrete without mesh reinforcement are met by synthetic fiber reinforcement.

Key Words: Tunnel, Tunnel Excavation, Tunnel Support System, NATM (New Austrian Tunneling Method), Shotcrete.

ŞEKİLLER DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.	Kanalizasyon ve altyapı tünellerine ait enkesit örnekleri..... 6
Şekil 2.	Enerji ve su tünelleri 7
Şekil 3.	Maden tünelleri 7
Şekil 4.	Barınak ve tapınak tünelleri 8
Şekil 5.	Stokaj tünelleri 8
Şekil 6.	Karayolu tünelleri..... 9
Şekil 7.	Demiryolu tünelleri 9
Şekil 8.	Metro tünelleri..... 10
Şekil 9.	Aksiyal tip kollu tünel açma makinesi 11
Şekil 10.	Yanal tip kollu tünel açma makinesi 12
Şekil 11.	Kollu tünel açma makinesi 12
Şekil 12.	Darbeli tünel açma makinesi 13
Şekil 13.	Kalkansın tünel açma makinesinin şematik görünümü..... 14
Şekil 14.	Tek kalkanlı tünel delme makinesi..... 15
Şekil 15.	Çift kalkanlı tünel delme makinesi..... 16
Şekil 16.	Zemin (Pasa) basınç dengeleyicili tünel delme makinesi 17
Şekil 17.	Çamur basınçlı TBM 18
Şekil 18.	Karışık tip tünel delme makinesi..... 19
Şekil 19.	Mikro TBM 19
Şekil 20.	Alman yöntemi 20
Şekil 21.	Belçika yöntemi..... 21
Şekil 22.	Eski Avusturya yöntemi 21
Şekil 23.	İngiliz yöntemi 22
Şekil 24.	İsviçre yöntemi 23
Şekil 25.	İtalyan yöntemi..... 24
Şekil 26.	Ön sağlama yöntemi..... 24
Şekil 27.	Tüneller ve yeraltı açıklıkları için kalıcı destek ve güçlendirme sistemlerini tespit için Qdestek grafiği..... 39
Şekil 28.	Tünelcilik ve madencilikte jeomekanik sınıflamaya göre kazı açıklığı ile iksasız durma süresi arasındaki ilişki 41
Şekil 29.	RQD tanımı ve hesaplaması 43
Şekil 30.	Süren uygulaması 44

Şekil 31.	Çelik iksa Profil.....	45
Şekil 32.	SN bulon detayı.....	46
Şekil 33.	PG bulon detayı.....	47
Şekil 34.	İBO bulon detayı.....	47
Şekil 35.	Swellex bulon detayı.....	48
Şekil 36.	Hasır çelik uygulaması.....	49
Şekil 37.	Kuru ve yaş karışım püskürtme beton uygulama yöntemleri.....	51
Şekil 38.	Püskürtme betonun işlevsel özellikleri.....	52
Şekil 39.	Eğribel tünelinin konumu.....	55
Şekil 40.	Eğribel tüneli güzergahı.....	56
Şekil 41.	Eğribel tünelinin yolu ne kadar kısalttığıнын gösterimi.....	56
Şekil 42.	Karlar altındaki coğrafi konum.....	57
Şekil 43.	Karla mücadele.....	57
Şekil 44.	Karla kapanmış yol.....	58
Şekil 45.	Karla kaplı yolda zorlu ulaşım şartları.....	58
Şekil 46.	Plaka test düzeni.....	61
Şekil 47.	1. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı.....	63
Şekil 48.	1. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	64
Şekil 49.	1. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı.....	65
Şekil 50.	1. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	65
Şekil 51.	2. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı.....	66
Şekil 52.	2. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	66
Şekil 53.	2. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı.....	67
Şekil 54.	2. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	67
Şekil 55.	3. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı.....	68
Şekil 56.	3. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	69
Şekil 57.	3. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı.....	69
Şekil 58.	3. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	70
Şekil 59.	4. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı.....	71
Şekil 60.	4. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	71
Şekil 61.	4. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı.....	72
Şekil 62.	4. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	72
Şekil 63.	5. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı.....	73
Şekil 64.	5. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	73

Şekil 65.	5. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı	74
Şekil 66.	5. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü.....	74
Şekil 67.	40 mm ve 25 mm deplasman durumları.....	75
Şekil 68.	İstanbul Teknik Üniversitesi enerji-sehim sonuçları ve numune örneği.....	76
Şekil 69.	İstanbul Teknik Üniversitesi tokluk sınıfların gösteren raporu.....	77
Şekil 70.	Enerji yutma kapasitesini gösteren rapor	78
Şekil 71.	İstanbul Teknik Üniversitesi raporu	80
Şekil 72.	3 kilogramlık paketlenmiş sentetik fiber donatı	81
Şekil 73.	Sentetik fiber malzemenin şantiyeye geliş şekli	82
Şekil 74.	Bir miktar sentetik fiber malzemenin gösterimi.....	82
Şekil 75.	Sentetik fiber donatı malzemesinin beton üretimine karışımı.....	83
Şekil 76.	Sentetik fiberli püskürtme betonunun pompaya iletim şekli.....	83
Şekil 77.	Sentetik fiberli püskürtme betonunun pompaya iletim anı	84
Şekil 78.	Sentetik fiber donatılı püskürtme beton örneği	84
Şekil 79.	Panellerin ortalama yük-sehim ve çatlak durumu	85
Şekil 80.	25 mm deplasmanda enerji depolama kapasitesi deney sonucu sol tüp.....	86
Şekil 81.	25 mm deplasmanda enerji depolama kapasitesi deney sonucu sağ tüp	87

TABLolar DİZİNİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 1. KTŞ-tablo-350-1 kaya sınıflandırma sistemi	26
Tablo 2. Kaya sınıflama sistemleri ve uygulama alanları	34
Tablo 3. Q sistemi değer aralıkları ve anlamları	35
Tablo 4. RQD kaya niteliği sınıflaması	35
Tablo 5. Çatlak pürüzlük değeri (Jr).....	35
Tablo 6. Çatlak sistemi değeri (Jn).....	36
Tablo 7. Çatlak suyu azaltma faktörü (Jw).....	36
Tablo 8. Çatlak ayrışma değeri (Ja).....	36
Tablo 9. Gerilim indirgeme faktörü (SRF).....	37
Tablo 10. Kazı destek oranları faktörü (ESR)	38
Tablo 11. Sınıflandırma değişkenleri ve sayısal değerler.....	40
Tablo 12. Süreksizlik yönelimine göre yapılacak sayısal düzeltmeler.....	41
Tablo 13. Toplam sayısal değerlendirmelere göre kaya kütesinin sınıflanması	41
Tablo 14. Kaya kütesi sınıflarının ifade ettiği anlamlar	41
Tablo 15. RMR Sistemine göre kaya tünellerindeki kazı sistemi ve iksa sistemleri	42
Tablo 16. Kaya kalite katsayısı RQD	43
Tablo 17. Enerji depolama kapasitesi.....	61
Tablo 18. Kullanılan sentetik lifli fiber donatının mühendislik özellikleri	62
Tablo 19. Numunelerin sehim durumlarına göre enerji yutma kapasiteleri	79
Tablo 20. Sentetik fiberli püskürtme beton uygulaması.....	90
Tablo 21. Çelik hasır uygulaması	91
Tablo 22. Fiberli püskürtme beton uygulaması	92
Tablo 23. Çelik hasırlı püskürtme beton uygulaması	93

1. GENEL BİLGİLER

1.1. Giriş

Tünel, uluslararası literatürde mutabakat sağlanmış bir tanımı olmamakla birlikte; genel anlamıyla yer altından kazı yapılmak suretiyle oluşturulan geçitlerdir. Ana kullanım amaçları motorlu taşıt ulaşımı, metro ve demiryolu ulaşımı ve su taşımaktır. Bunların yanı sıra yaya–bisiklet geçişleri, vahşi hayvan geçişleri ya da derivasyon amaçlı daha spesifik amaçlara hizmet eden tünellere de rastlanmaktadır (Wikipedia). Karayolu Teknik Şartnamesinde Tünel; yeraltında yapılacak kazı ile istenilen kesitte boşluk oluşturulması ve desteklenmesi ile inşa edilen yer altı yapısı olarak tanımlanmıştır.

Tüneli başka bir ifadeyle tanımlamak gerekirse; demiryolu, karayolu, yaya yolu, kanal vb. gibi taşıma yollarının bir kısmının, yeryüzünden geçirilmesinin teknik bakımdan olanaksız olduğu topografik koşullar, jeolojik yapı, kaçınılmak istenen heyelan, çığ ya da ekonomik bakımdan uygun bulunmadığı yerlerde, bu kısmın yeraltından geçirilmesine başvurularak enerji, madencilik, ulaşım, sulama vb. gibi konuların çözülmesini sağlayan mühendislik yapılarıdır.

İnsanoğlu tarih boyunca tünelciliğe çeşitli ihtiyaçlarını karşılamak amacıyla başvurmuştur. İlk zamanlar daha zor olan tünelcilik gelişen teknoloji ve yapım yöntemleri ile birlikte gereksinimlerini karşılanmasında sık sık tünelciliğin karşımıza çıktığı görülmektedir. Tünelciliğin kullanım alanlarına dikkat ettiğimiz zaman önemini ve günümüzde bizler için ne kadar vazgeçilmez bir sanat yapısı olduğunu anlayabiliriz. Her mühendislik çözümünde olduğu gibi tünelciliğin maliyet, emniyet, zaman, estetik, çevre etkilerinin de günümüz şartlarında göz önünde tutulduğunda geçerli bir sanat yapısı olduğu görülmektedir.

1.2. Tezin Amacı ve Kapsamı

Bu çalışma Karadeniz Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalında Yüksek Lisans Tezi olarak hazırlanmıştır.

Eğribel Tünel Projesi kapsamında çift tüp olarak 5900m. kazı-destekleme çalışmaları yapılan Eğribel Tüneli inşaatında kaya sınıflandırması yapılarak belirlenen destek sınıfının uygulanması ve B1, B2, B3 zemin sınıflarında belirlenen hasır çelik imalatı yerine sentetik fiber donatı kullanılması için gerekli yapısal tasarımın yapılması ve uygulamanın gerçekleştirilmesini amaçlamaktadır. Burada şantiye kriterleri, üretilen beton kalitesi ve diğer parametreler düşünülerek uygun zemin sınıfında kesit tesirlerini karşılayabilecek sentetik lifli fiber dozajının belirlenmesi halinde hasır çelik yerine sentetik lifli fiber donatı kullanılabilir.

Bu tez kapsamında, tünelleme ile ilgili literatür çalışması yapılmış olup Tünel Çeşitleri, Tünel Kazı Tipleri, Tünel Açma Yöntemleri, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi(NATM), Püskürtme Beton, Kaya Sınıflandırma Sistemi, Tünel Desteklemesi, Profil Kontrolü ve Toleranslar konuları ayrıntılı şekilde anlatılmıştır.

1.3. Literatür Özeti

Karahan (2010), Farklı zemin sınıflarında kaya kütlesi sınıflandırma sistemleri kullanılmıştır. Tünel boyunca RMR, Q, GSI ve NATM sınıflandırma sistemlerine göre incelenmiş olup kazı ve destekleme sistemlerine karar verilmiştir.

Çelik (2011), Kılıçlar Tünelinin kaya kütlesi RMR, Q, NATM kullanılarak sınıflandırılmış ve bu sınıflamaya göre destek sistemleri belirlenmiştir. Ampirik yaklaşımların nümerik modelleme sonucu önerilen desteklemelerle uyumlu olduğu görülmüştür.

Şeker (2008), Cezayirde bulunan Doğu Batı Otoyolu Projesi kapsamında açılan Bouira Karayolu Tüneli uygulaması incelenmiştir. Yeni Avusturya tünel inşa yöntemi prensiplerine göre tünel inşası gerçekleştirilen tünelde deformasyonlar kontrol edilmiş ve uygun kademeli kazı yöntemlerinin uygulanmasıyla oluşabilecek deplasman değerlerinin azaldığı görülmüştür.

Koçbayı, A. ve Doğan E., (2015) Tünel projelendirme aşamasında proje güzergahının jeolojisine, geçilecek formasyonların jeoteknik özelliklerine, bölgenin tektonizmasına, yeraltı suyu durumuna, topografik özellikleri dikkate alınarak uygun tünel delme makinesi seçimi belirlenmiştir. Tünel delme makinesinin hangi koşullarda uygun olduğu tünel çapı ve uzunluğu, tünel açılacak güzergahtaki formasyonların jeolojik ve

jeoteknik özellikleri, patlayıcı madde ile kazıyı engelleyen sebepler, del-pat sonrası ayna pasasının yüklenmesi ve taşınması, işin süresi dikkate alınarak belirlenir.

Polat (2010) NATM yöntemi kullanılarak bu çalışmada tünel zemin ilişkilerini, tünel cidarına gelen gerilme dağılımları, tünel deformasyonları ve kazıdan kaynaklanan yatay oturmaları incelenmiştir. Yapılan çalışmalar değerlendirilerek tünellerin güvenli bir şekilde açılmasında önemli bir yer tutan parametreler belirlenmiştir.

Yalçın ve ark. (2015) Kaya Sınıflandırma Sistemi (RMR) Kaya Kütle İndeksi (RMİ) irdelenen sonuçlar yazılım kullanılarak analiz edildi. Yalnızca RMR ve RMİ ye göre belirlenen desteklerin stabilite açısından yetersiz olduğu belirlendi. Bu çalışma ampirik yaklaşımlarla elde edilen sonuçların sayısal yöntemlerle değerlendirilmesi ve doğrulanmasının önemli olduğunu göstermiştir.

Feng Huang ve ark. (2016) bu çalışma Çin deki uzun bir tünelde tünel açma makineleriyle (TBM) ve yumuşak ve zayıf kaya zeminde NATM yöntemiyle açılan tünellerde üç boyutlu sayısal simgelerle incelendi. Kaya kütlesi içinde artan serbestleşme oranının (RRD) tünel kazısı sırasında hasar gören bölgeyi etkilediği belirlenmiştir.

Feng ve ark. (2016) Tünel inşası sırasında ölçümlerin çatlak, göçük ve çöküntüleri önlemede son derece önemli olduğu belirtilmiştir. Kazı sırasında izin verilebilecek hasarlı bölgenin derinliği ve hasarlı bölgedeki kaya kütlesi boyutu çok önemli olan iki endekstir. Bu tünelde kayadaki çatlama evrimini sınırlamaktadır. uygun destek sistemi seçimi ve destek sisteminin zamanında uygulanması kaya kütlelerini muhafaza ettiği Çinde yapılan tünelde belirlenmiştir.

Moffat ve ark. (2002) Tünellerde yaygın olarak kullanılan stabilizasyon sistemlerinden olan püskürtme betonunun çekme ve kayma dayanımını arttırmak için çelik, polipropilen ve jeotekstil takviye malzemeleri kullanılarak püskürtme betonunun enerji emme kapasitelerinin arttığı belirlenmiştir.

Goel ve ark. (1995) Bartonun Q sistemi ve Bieniawskinin 1973 RMR sistemi 26 farklı tünel kesitinde değerlendirildi. RMR ve Q arasındaki korelasyonun yeterli olmadığı belirlendi.

Koçkar ve Akgün (2004) İki karayolu tünel projesi boyunca uygun destek sistemleri ve duraylılık yöntemlerinin önerilmiştir. Tünellerin zemin sınıfları Q, RMR, NATM sistemine göre sınıflandırılmıştır. Buna uygun olarak destek sistemleri ve duraylılık teknikleri belirlenmiştir. Kaya kütleleriyle örtüşen uygun destek sistemleri sonlu elemanlar yöntemiyle incelenmiştir.

Noithani ve ark. (2009) proje alanı Bhagirathi vadisinde olan Himalaya kristalleri olarak sınıflandırılan alanda kaya kütlesi sınıflaması Bieniawskiyöntemiyle denendi. barton ve arkadaşların kaya kütle değerlendirme sistemi (RMR), Q sistemi, süreksizlerin aralığı, süreksizliğin durumu ve yeraltı suyu koşulları dikkate alınarak kaya kalite katsayısı(RQD%), çatlak sistemi değeri(J_n), çatlak pürüzlülük değeri(J_r), çatlak ayrışma değeri(J_a), çatlak suyu azaltma faktörü(J_w), gerilme indirgeme föktörü(SRF) parametreleri irdelenerek kaya kütlesi değerlendirildi. proje bileşenlerinin doğru ve güvenli oluşması sağlandı.

Özçelik (2015) 14700m uzunluğu olan tünelde kaya sınıflandırması için 1116.5 m delgi yapıldı. Mekanik test için 75 numune kaya örneği alındı.Ön tasarımda TBM yöntemi belirlenmesine karşın bu tünel kazısı NATM ilkeleriyle yapıldı. Bu seçimde morfolojik saha koşulları, jeolojik, jeoteknik alan koşulları, zaman ve ekonomik parametreler etkili oldu.

Li (2016) Yer değiştirmelerin sınırlı olması nedeniyle tünel inşaatı sırasında zeminin kemerleşme etkisi sınırlı etki yapmaktadır. Zeminin kayma gerilmesinin kesme mukavmetine göre beklenenden düşük olduğunda zemin kemerleşmesinde oluşan dikey gerilme makul karşılanmamıştır. Sonuçlar göstermiştir ki yanal zemin basıncı katsayısı aktif ve pasif zemin basıncı arasında değişmektedir. Daha sonra zemindeki kemerleşme etkisindeki dikey gerilmeler dikkate alınarak tünelin kemerleşme etkisi kemer yüksekliğiyle ilişkilendirildi. Son olarak zeminin durumuna göre yer değiştirme ve destekleme için analitik bir yöntem geliştirildi.

Haruyama ve ark. (2004) OME Tünelinin kazı kesiti 220-260 m² olmakla birlikte günümüzde alışlagelmiş tünel kesitinin çok üstündedir. Bir otoyol tüneli olan bu tünelin inşası NATM yöntemiyle yapılmıştır. Kazı sırasında tünelin yerleşim yerlerinin altından geçmesi oluşacak göçük, oturma, deformasyonlar önem arz etmektedir. Bu nedenle tünel kazısı sırasında ön kazma gibi inşaat metotlarından yararlanılmıştır. Kazı işlemi enjeksiyonlu çelik borular yardımıyla devam etmiştir. Bu çalışmalar sırasında zemin davranışları sürekli takip edilmiş olup tünel kazısı kesintiye uğramamış ve herhangi bir hasar meydana gelmemiştir.

Unlutepe ve Ozener (2008) İZMİR LRTS nin inşası sırasında geoteknik izlemeler yapılmıştır. Burada İZMİR LRTS tünelin inşaatında oluşan deformasyon ölçümleri ve sonuçları gözlemlenmiştir. Üçyol-Konak tünelinin kazısında NATM yöntemiyle inşa edilmiştir. Burada zemin basınç dengesi metodu (EPBM) konsepti tünel inşası sırasında

kullanıldı. Her iki tünelde de inşaat kazı-destek sırasında ve kazı tamamlandıktan sonraki süreçte deformasyonların izlenmesi gereklidir.

Nguyen ve Nguyen (2014) Kaya kütlesi sınıflandırmasında Lauffurh ilk kez ayakta durma sürensi terimini kullandı. Daha sonra Barton ve ark. ve Bieniawski etkili desteksiz alan terimini kullandılar. Bu terim kazı yöntemi, kazı döngüsü, destek seçimini etkilemektedir. Ayakta durma süresi kısacası sadece kaya kütlesi özelliği değildir. Aynı zamanda kazı-destek çalışmalarını doğrudan etkilemektedir. Tünel içerisinde bekleme süresini bilmek çok anlamlıdır. Bunun için analitik bir çözüm geliştirilmiştir. Tünel duvarlarındaki yerdeğiştirme ve Abelin sürünme çekirdeği kullanılarak reolojik deformasyon modeline dayalı bir analitik çözüm geliştirilmiştir.

Sapigni ve ark. (2002) İtalyanın kuzeyinde genel olarak sert metamorfik kayalardaki tünel TBM ile kazılmıştır. TBM performansı ve özellikleri için kaya kütlesi sürekli araştırılarak 700 den fazla veri seti elde edilmiştir. Kaya kütlesi oroni ile penetrasyon oranı arasındaki ilişkiler açıkça göstermiştir ki çok kötü ve çok iyi kaya kütlelerinin her ikisinde de yavaş penetrasyon yaşanırken, kaya kütlesi dercesinin 40-70 olduğunda TBM performansı maksimuma ulaşmıştır. Bununla birlikte farklı kayalar aynı kaya kütlesi dercesi (RMR) için farklı penetrasyon vermektedir. Bu durum TBM performansı tahmininde karşılaşılan zorlukları göstermektedir.

Nurnur (2016) Tünel kazısı sırasında çevre yapılar da meydana gelen oturmaların sayısal modelleme ile analizi yapılmıştır. Kazı aşamasında NATM yöntemi kullanılmış olup kaya dayanım parametreleri hesaplanarak kazı-destek tip kesitleri oluşturulmuştur. Daha sonra sonlu elemanlar yöntemi ile çalışan Plaxis 2D programı kullanarak stabilite analizleri yapılmıştır. Kazı-destek çalışmaları sırasında arazide jeomekanik ölçümlere ait sonuçlar değerlendirilmiştir.

Selman (2014) NATM yöntemiyle yapılmış tünel kazısı sırasında mevcut yapılara etkisi incelenmiş ve Burland yöntemiyle bu değerlendirme yapılmıştır.

1.4. Tüneller

Genel anlamıyla yer altından kazı yapılmak suretiyle oluşturulan geçitlerdir.

1.4.1. Tünel Çeşitleri

Tünellerin uygulandığı alanlar en çok karayolları, demiryolları,metrolar,barajlar,su kanallarıdır.

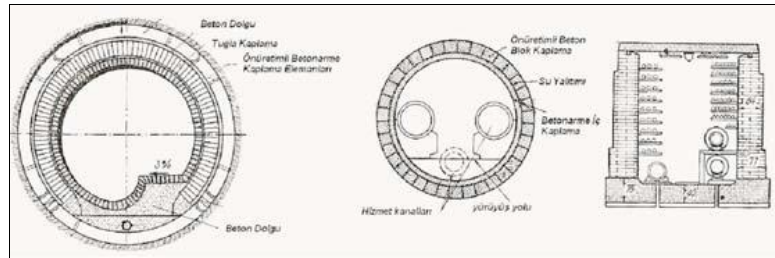
1.4.1.1. Hizmet Tünelleri

1.4.1.2. Kanalizasyon Tünelleri

Bu tünellerde geçirimsizliğin sağlanması için gerekli olan iç yalıtımın yapılması son derece önemli olup atıkların uzaklaştırılması sağlayan tünellerdir.

1.4.1.3. Altyapı Tünelleri

Şehirleşmenin yoğun olduğu bölgelerde elektirik,telefon,fiber,enerji kablolarının geçirilmesi,gaz,su gibi hizmetlerin iletilmesi için yapılırlar. Bu tüneller sayesinde arıza tespiti ve tamiri kolaylıkla yapılır. Kanalizasyon ve altyapı tünellerine ait enkesit örnekleri Şekil 1. de gösterilmiştir.

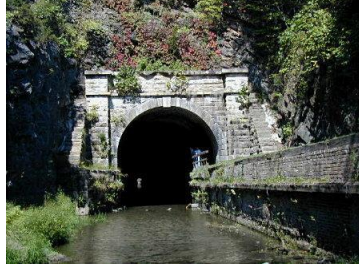


Şekil 1. Kanalizasyon ve altyapı tünellerine ait enkesit örnekleri (Szechy, 1970).

1.4.1.4. Enerji ve Su Tünelleri

Hidroelektrik santrallerinde suyun debisi ve düşüşünü düzenlemek adına suyun bir tünel yardımıyla yolunun değiştirilmesinde kullanılır. Kaynaktan elde edilen suyun şehirlere,ihtiyaç olan bölgelere ulaşmasını sağlamak için yapılan tünellerdir. Bu tüneller

yapılırken oluşabilecek yüksek iç basınç düşünülerek yapılmalıdır. en uzun su taşıma tüneli ABD de Pensilvanie eyaletinde ki 137 Km. uzunluğunda Delaware tünelidir. Türkiyede en uzun Urfa İkiz tüneli olup 28 Km.dir. Enerji ve su tünellerine ait örnek Şekilde 2. de gösterilmiştir.



Şekil 2. Enerji ve su tünelleri

1.4.1.5. Maden Tünelleri

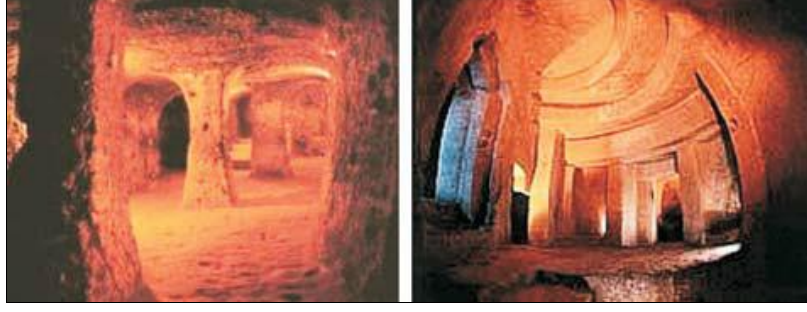
Bu tüneller yer altındaki madeni çıkarmak amaçlı yapılırlar. İmalat ve destekleme bakımından diğer tünellere oranla daha geçici çözümler kullanılır. Şekil 3. de maden tünellerine ait örnek gösterilmiştir.



Şekil 3. Maden tünelleri (URL-10, 2007).

1.4.1.6. Barınak ve Tapınak Tünelleri

Geçmiş yıllarda yapılmış barınak ve tapınak amaçlı kullanılan tünellerdir. Barınak ve tapınak tünellere ait örnek Şekil 4'te gösterilmiştir.



Şekil 4. Barınak ve tapınak tünelleri (URL-5,2007; URL-6,2007).

1.4.1.7. Stokaj Tünelleri

Çeşitli malzemelerin stok edilmesi için kullanılır(patlayıcı madde, radyoaktif madde). Şekil 5’de stikaj tünelleri gösterilmiştir.

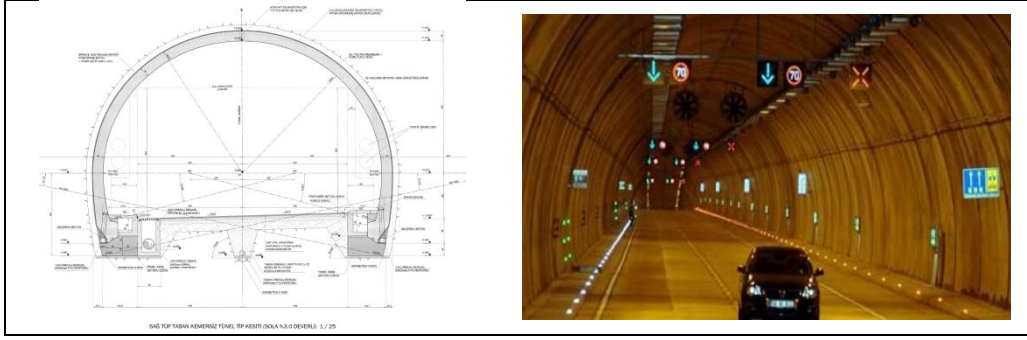


Şekil 5. Stokaj tünelleri

1.4.1.8. Ulaştırma Tünelleri

1.4.1.8.1. Karayolu Tünelleri

Karayolu ulaşımında kullanılmak üzere istenilen kesitte boşluk oluşturmak için yeraltında kazı yapılarak elde edilen geçitlere karayolu tünelleri denir. Karayolu tüneli için enkesit Şekil 6’da gösterilmiştir.



Şekil 6. Karayolu tünelleri

1.4.1.8.2. Demiryolu Tünelleri

Ulaştırma tünellerinden olan demiryolu tünelleri karayolu tünellerine benzerlik gösterirler. Dünyanın en uzun demiryolu tüneli 54100 m. uzunluğuyla Japonya'daki Seikan tünelidir.

Demiryolu tüneli için enkesit Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Demiryolu tünelleri

1.4.1.8.3. Yaya Yolu Tünelleri

Yerleşimin yoğun olduğu bölgelerde yaya geçişinin sağlanabilmesi için gerekli duyulan küçük kesitli tünellerdir.

1.4.1.8.4. Metro Tünelleri

Metro tünelleri metro çalışmalarının şehir merkezlerinin içinden geçildiği yerlerde, yollarla kesiştiği bölümlerde tercih edilirler. Demiryolu tünelleriyle benzerlik göstermekle birlikte kesit farklılıkları vardır.

Metro tüneli için enkesit Şekil 8’de gösterilmiştir.



Şekil 8. Metro tünelleri

1.4.2. Tünel Kazı Yöntemleri

1.4.2.1. Delme-Patlatma

Uzun yıllardan beri kullanılan bu yöntemle tünel çeperine zarar vermeden en uygun patlatma paterniyle hızlı ve ekonomik şekilde kazı işlemi gerçekleştirilir. Bu yöntemle her kesitte kısmı veya tam kesitte tünel açılabilir. Tüm kaya şartlarında uygulanabilir bir yöntem olması, gerekli ekipmanın kolay ve ucuz temin edilmesi tünelcilikte yaygın kullanılan bir yöntem olarak tercih edilmesine sebep olmuştur. Bu yöntemin yerleşim merkezlerinde titreşim, gürültü, göçük etkisi gibi sebeplerden dolayı kullanılması zordur. Bu yöntemde kurp yarıçapları, eğim uygulamada bizler için çok kısıtlayıcı faktörler değildir.

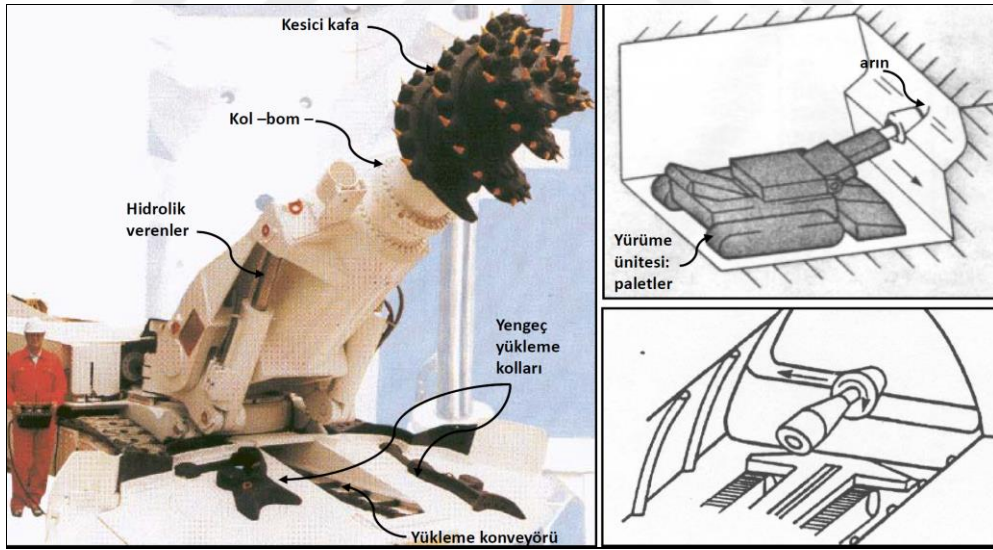
1.4.2.2. Mekanik Kazı

Tünel kazı makinaları kullanılarak gerçekleştirilen tünel kazılarıdır. Delme-Patlatma yöntemine göre tesirinin az olması sebebiyle gerek zemin sınıfından ötürü gerek hassasiyet isteyen tünel kazılarında kullanılır.

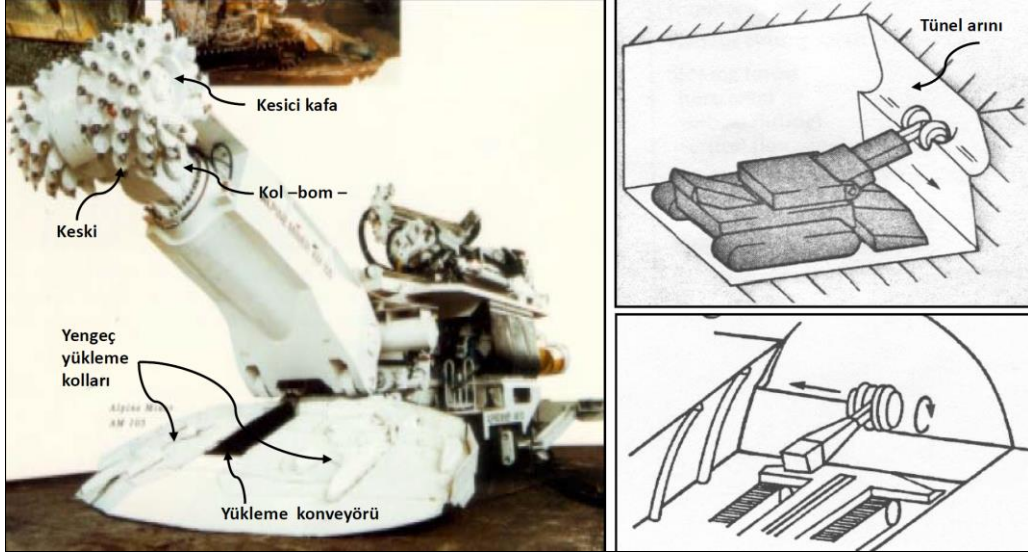
1.4.2.2.1. Parçalı Kesit Kazısı

1.4.2.2.1.1. Kollu (Bumlu) Tünel Açma Makinesi (Roadheader)

Boom ucunda kesici bir kafa bulunur. Yükleme yapabilen elektirkle çalışan kazı makinalarıdır. Parçalı kesit kazısında kullanılan aksiyal tip kollu tünel açma makinesi Şekil 9'da, yanal tip kollu tünel açma makinesi Şekil 10'da, kollu tünel açma makinesi Şekil 11'de gösterilmiştir.



Şekil 9. Aksiyal tip kollu tünel açma makinesi (Arioğlu, 2009).



Şekil 10. Yanal tip kollu tünel açma makinesi (Arıoğlu, 2009).



Şekil 11. Kollu tünel açma makinesi (Arıoğlu, 2009).

1.4.2.2.1.2. Darbeli Tünel Açma Makinesi (Hammer)

Burada tünel açma makinası olarak ekskavatörün ucuna kırıcı takılmış şekilde bir çekiç gibi çalıştırılmasıyla kazı işlemi yapılır. Darbeli tünel açma makinesi çalışması Şekil 12’de gösterilmiştir.



Şekil 12. Darbeli tünel açma makinesi (Hammer)

1.4.2.2.1.3. Ekskavatörle Kazı

Zayıf zeminlerde kullanılır. Kazı işleminin direk ekskavatörlerle yapılır. Zeminin kötü olması günlük ilerleme hızının çok düşük olmasına sebep olur.

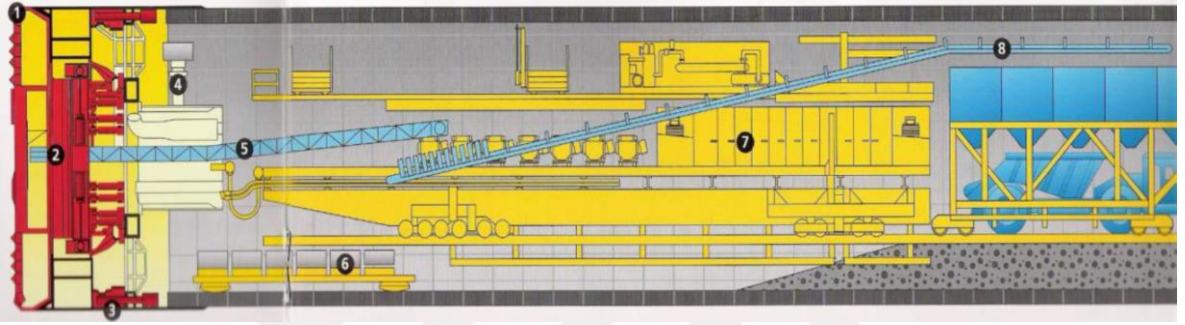
1.4.2.2.2. Tam Kesit Kazısı-Tünel Delme Makinası TDM (Tunnel Boring Machine TBM)

Bu yöntemle yapılacak kazılarda ilk yatırım maliyetinin pahalı olması, kazıyı yapacak olan makinelerin temini aşamasında geçen süre ve kurulum aşamaları düşünüldüğünde Delme –Patlatma yöntemine göre daha meşakkatli bir süreçtir. Ayrıca bu yöntemle yapılacak kazılarda tünel uzunluğu ve yapılmış olan sondaj miktarı son derece önemlidir.

Genelde dairesel kesit olarak tünel kazısını tek seferde yapan Dev Köstebek olarakta bilinen kazı aracıdır. En büyük dezavantajı ilk yatırım maliyetinin yüksek olması ve farklı jeolejik durumlarda, farklı kesitli projelerde kullanılamıyor olmasıdır. Zeminin jeoteknik ve jeojik özellikleri iyi analiz edildiği durumlarda yüksek verim alınmaktadır. TBM le yapılan kazı çalışmalarında çevredeki alanlara etkisinin az olması ve çalışmalar sırasındaki güvenli ortam TBM in en önemli avantajlarıdır.

1.4.2.2.1. Kalkansız (Açık) TBM

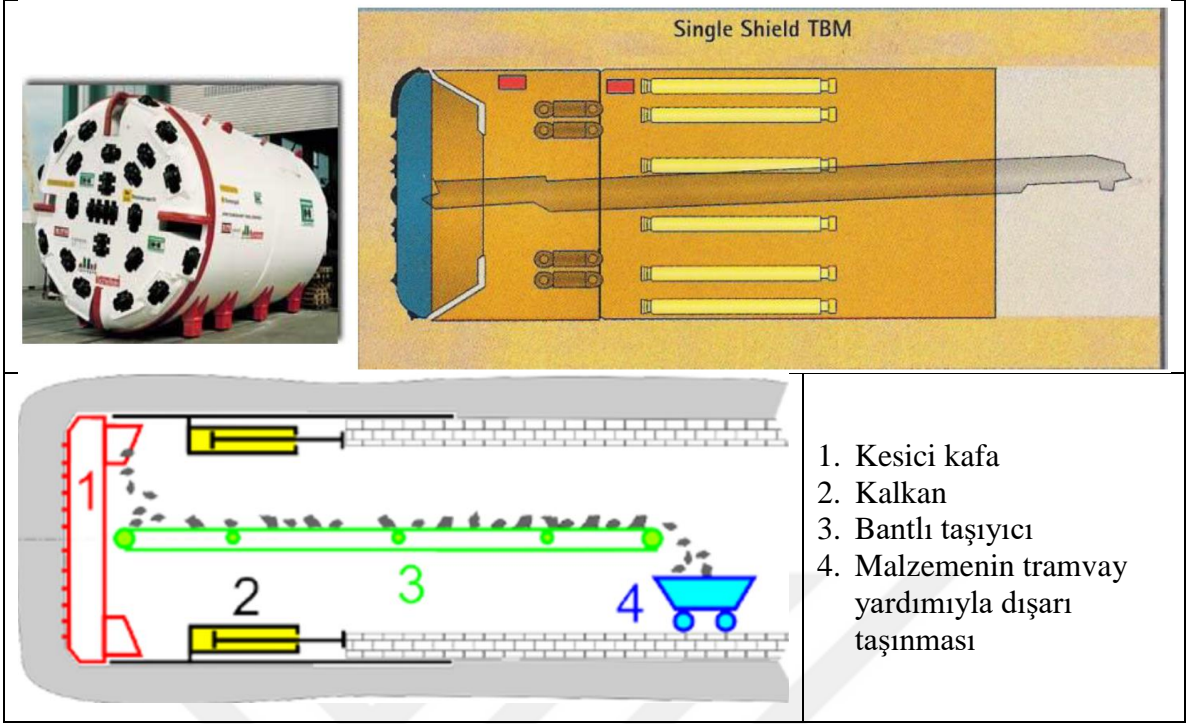
Sert kayaçlı zeminler için uygun TBM'lerdir. Bu tür TBM ler kendini tutabilen zeminlerde kullanılırlar. Şekil 13. de kalkansız tünel açma makinesinin şematik görünümü gösterilmektedir. Sürekli açık şekilde çalışan makineler olup sadece kesici kafanın üstünde bir koruyucu bulunur. Olası bir su ve askıda olan malzemenin düşmesine karşı korunmasızdır.



Şekil 13. Kalkansız tünel açma makinesinin şematik görünümü

1.4.2.2.2. Tek Kalkanlı (Shield) TBM

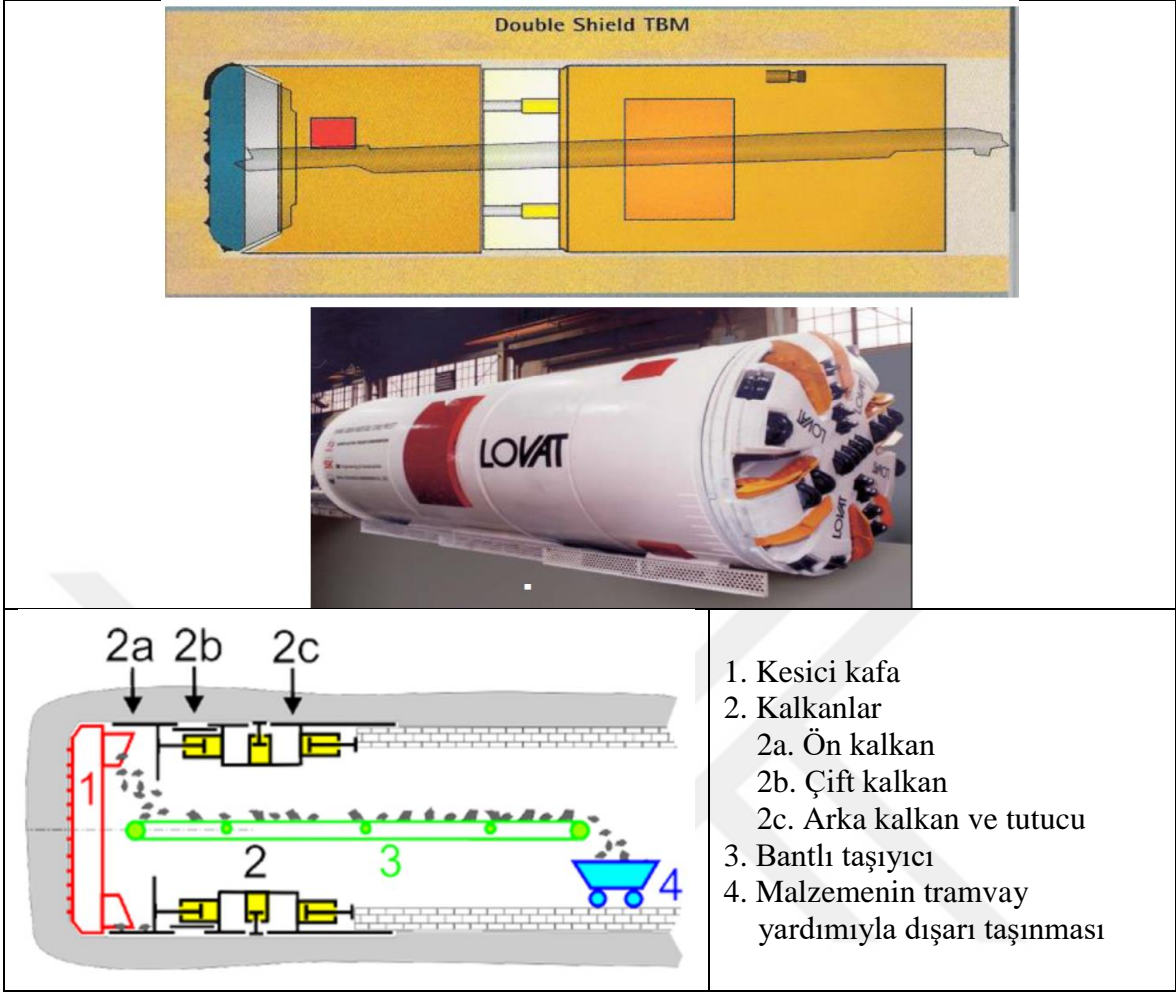
Kesici kafanın arkasındada çalışanları ve ekipmanı korumak için tek kalkan bulunur. Tek kalkanlı tünel delme makinesi Şekil 14'de gösterilmektedir. Bu makineler çok sağlam olmasada kendini belli bir süre tutabilen zeminlerde kullanılır. Pistonların segmanlara basmasıyla kesici kafanın ileri hareket etmesiyle ilerleme sağlanır.



Şekil 14. Tek kalkanlı tünel delme makinesi

1.4.2.2.3. Çift Kalkanlı (Shield) TBM

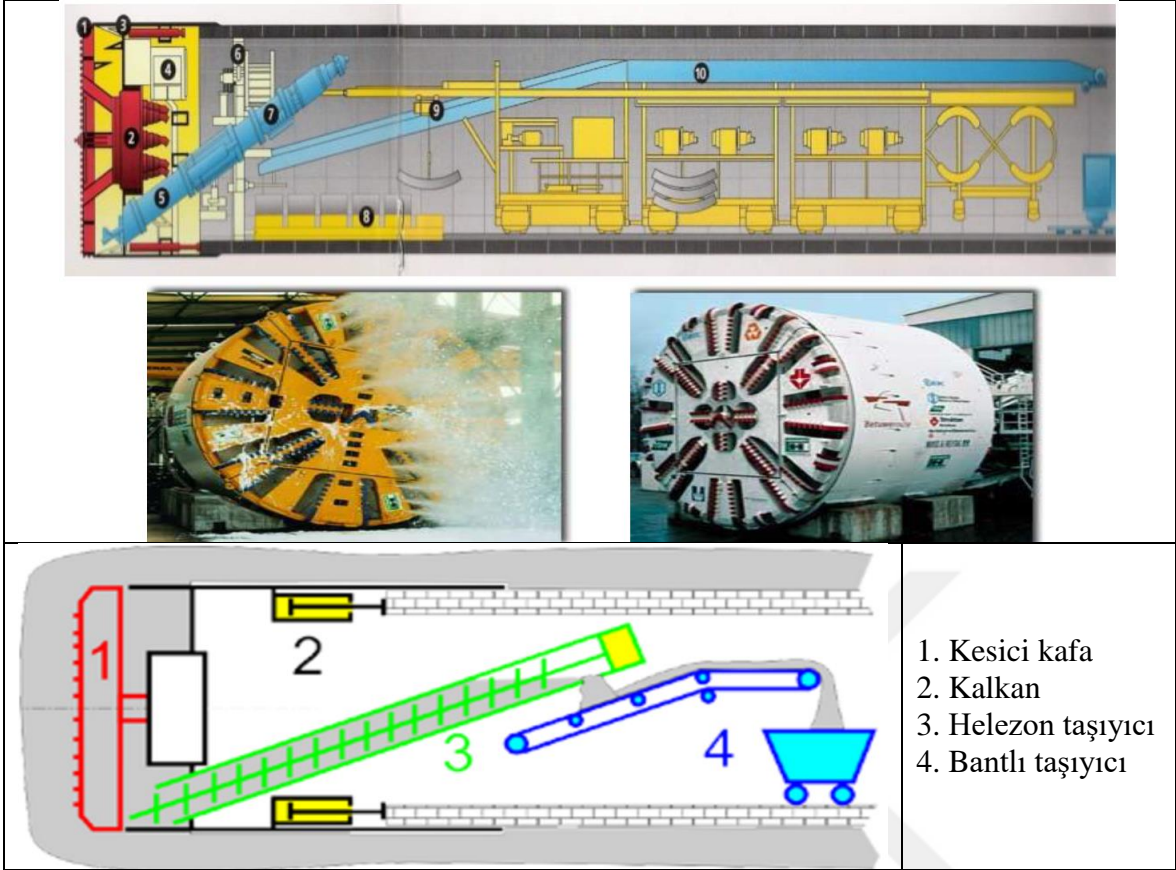
Genellikle sert kayalarda, kendini tutabilen zemin şartlarında kullanılmakla birlikte çoğu zemin koşullarında kullanılabilirler. Bu makinalarda ilerleme iki şekilde olur ya tek kalkanlı TBM mantığıyla çalışır yada daha çok tercih edilen pabuçların tünel duvarına (anakaya) basarak ilerler. Bu sistemde iki kalkanın ayrı ayrı çalışmasından faydalanılarak ilerleme sağlanır. Çift kalkanlı tünel delme makinesi Şekil 15’de gösterilmiştir.



Şekil 15. Çift kalkanlı tünel delme makinesi

1.4.2.2.4. Zemin (Pasa) Basınç Dengeleyicili TBM (Earth Pressure Balance-EPB)

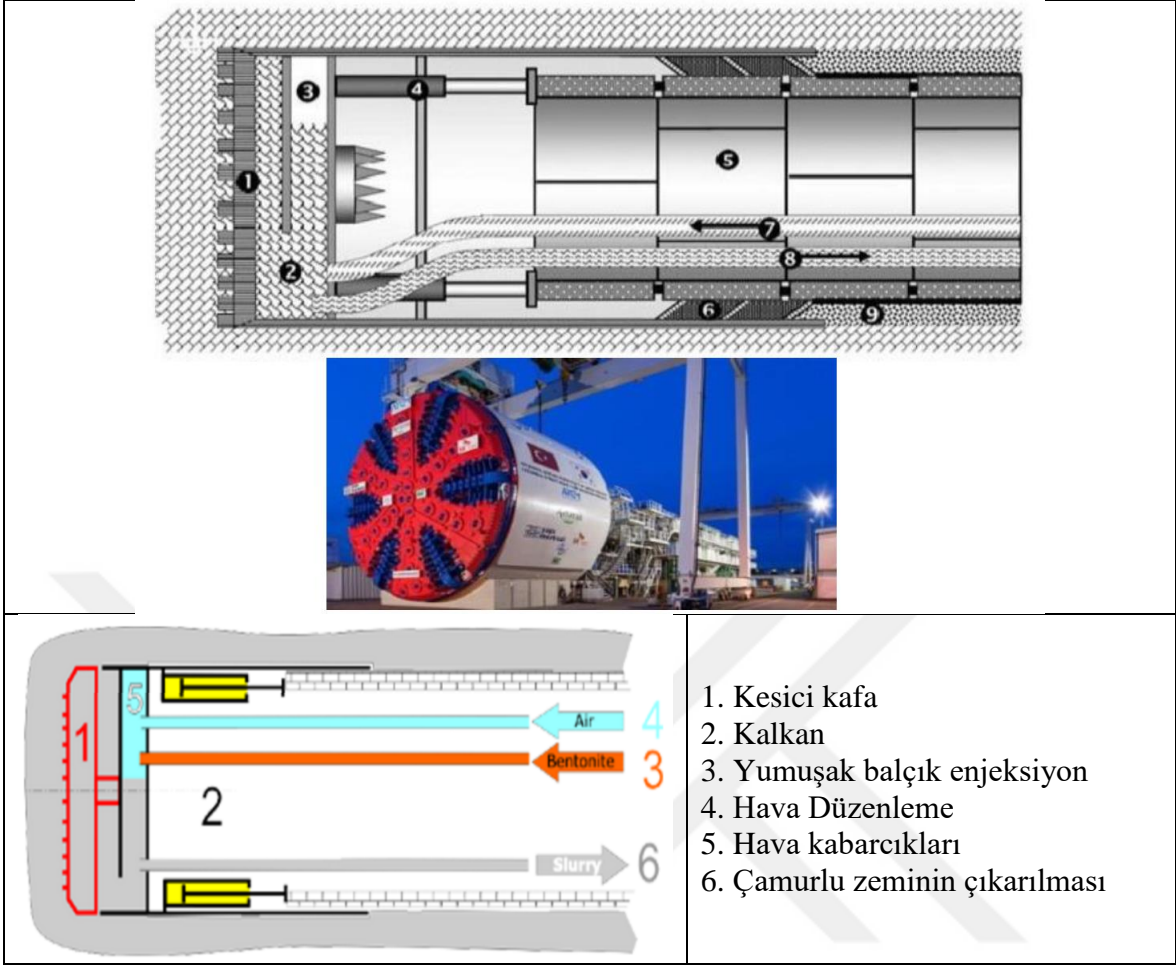
Genellikle silt ve kil bulunan zeminlerde kullanılır. Şekil 16'da zemin basınç dengeleyicili tünel delme makinesi gösterilmiştir. Burada kazılan malzeme (pasa) yardımıyla aynadaki basınç dengelenir. Çalışmasını kolaylaştırmak ve tıkanmaların önüne geçmek için zemin durumuna göre bazı kimyasallar kullanılır.



Şekil 16. Zemin (Pasa) basınç dengeleyicili tünел delme makinesi

1.4.2.2.2.5. Çamur Basıncılı TBM (Slurry Type)

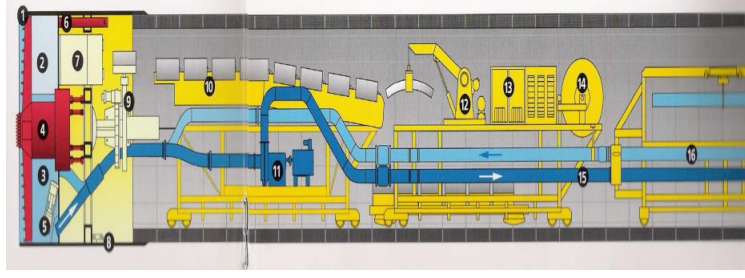
Bu TBM ler kumlu ve çakıllı zeminlerde tercih edilirler. Zemin basınç dengeleyici TBM lere göre daha yüksek ayna basınçlı zeminlerde de kullanılabilir olmasıdır. Ancak aynada basıncı dengelemek için kullanılan çamuru hazırlamak için kurulan tesisin getirdiği ekstra maliyet bir dezavantaj oluşturmaktadır. Çamur basınçlı TBM Şekil 17’de gösterilmiştir.



Şekil 17. Çamur basınçlı TBM

1.4.2.2.2.6. Karışık Tip (Mixshield) TBM

Hertürlü zemin ve yeraltı suyu koşullarında kullanılabilen karışık tip tünel delme makinesi Şekil 18’de gösterilmiştir. Genellikle farklı zeminlerin olduğu, su gelişi bulunan ve zayıf zemin koşullarında tercih edilirler. Sert kayalarda tek kalkanlı TBM gibi, zayıf zeminlerde dezemin basınç dengeleyici TBM gibi çalışır. Ekonomik açıdan pahalı bir sistem olup çalışmalar sırasında bu geçişler zaman almaktadır.



Şekil 18. Karışık tip tünel delme makinesi

1.4.2.2.7. Mikro Yöntem

Bu makinalar daha çok kanalizasyon, sulama, yol geçişleri için tercih ederler çapları 3-4 metreye kadar olan makinalardır. Mikro TBM Şekil 19'da gösterilmiştir.



Şekil 19. Mikro TBM

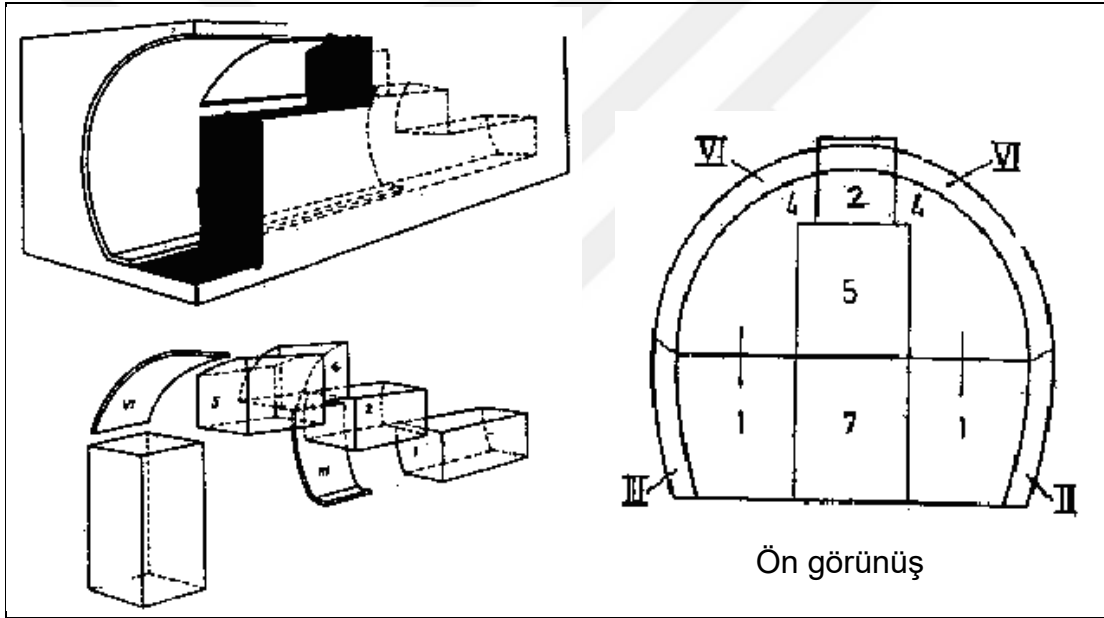
1.4.2.3. Aç-Kapa Yöntemi

Kullanım alanları metro tünellerinin yol güzergahlarıyla kesiştiği yerlerde, yol güzergahlarında çığ ve kaya düşme tehlikesi olabilecek yerlerde, tünel girişlerinde, kanalizasyon tünelleri, içme suyu tünelleridir. Bu yöntemde Aç-Kapa yapısının önce yan imatları yapılır (betonarme duvar, betonarme kazık) sonra proje kriterleri göz önünde bulundurularak imalatın üstü kapatılır. Bu yapılar açık hava imalatı olduğundan hem yapım aşamasında kolaylık sağlar hemde tasman oluşturmazlar.

1.4.3. Tünel Açma Yöntemleri (Uygulanan Bazı Yöntemler)

1.4.3.1. Alman Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı)

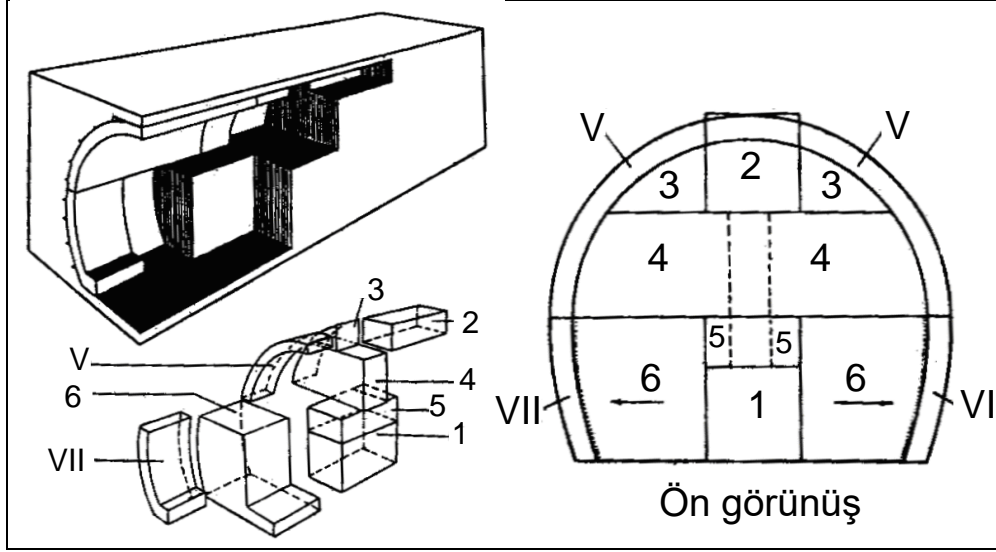
Günümüzde çok tercih edilmeyen bir yöntem olmasına rağmen büyük kesitli yapıların kalot kazılarında kullanılır. Bu yöntemde Şekil 20’de gösterildiği gibi önce yan kısımlar ve tavan kısmı kazılır. Tünelin ilerlemesine paralel olarak yan duvarlar desteklenirken tavanla yan kısım birleştirilir. Çalışma alanlarının çok bölmeli ve dar oluşu, zaman kaybının fazla olması, farklı yön ve şiddette gerilmeler oluşması bu yöntemin önemli dezavantajlarıdır.



Şekil 20. Alman yöntemi (Köse vd., 1992).

1.4.3.2. Belçika Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı)

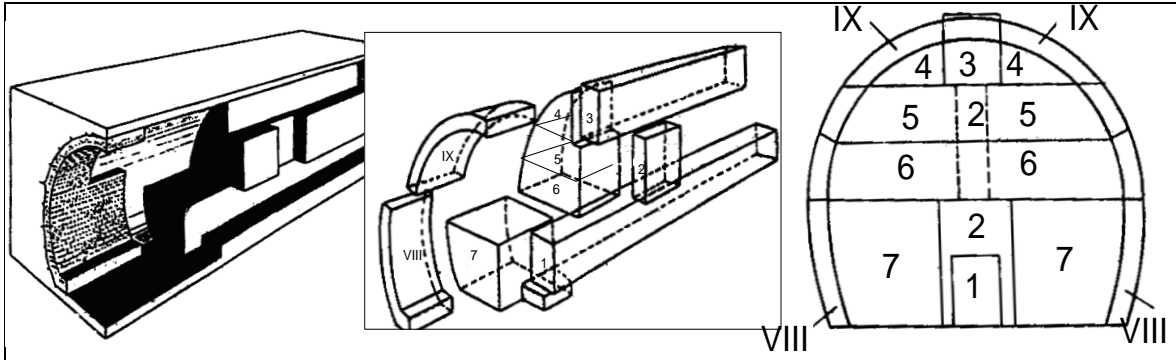
Bu yöntemde Şekil 21’de gösterildiği gibi tavan kayacının dengesini korumak adına yapılan tavan kazısının peşine hemen kaplaması yapılır. Kaplama işleminden sonra kısım kısım kazılar yapılır. Ağaç sarfiyatının az olması, orta ve az sağlam plastik deformasyon yapabilecek kayalar için uygun bir yöntem olması Belçika yönteminin pozitif taraflarıdır.



Şekil 21. Belçika yöntemi (Köse vd., 1992).

1.4.3.3. Eski Avusturya Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı)

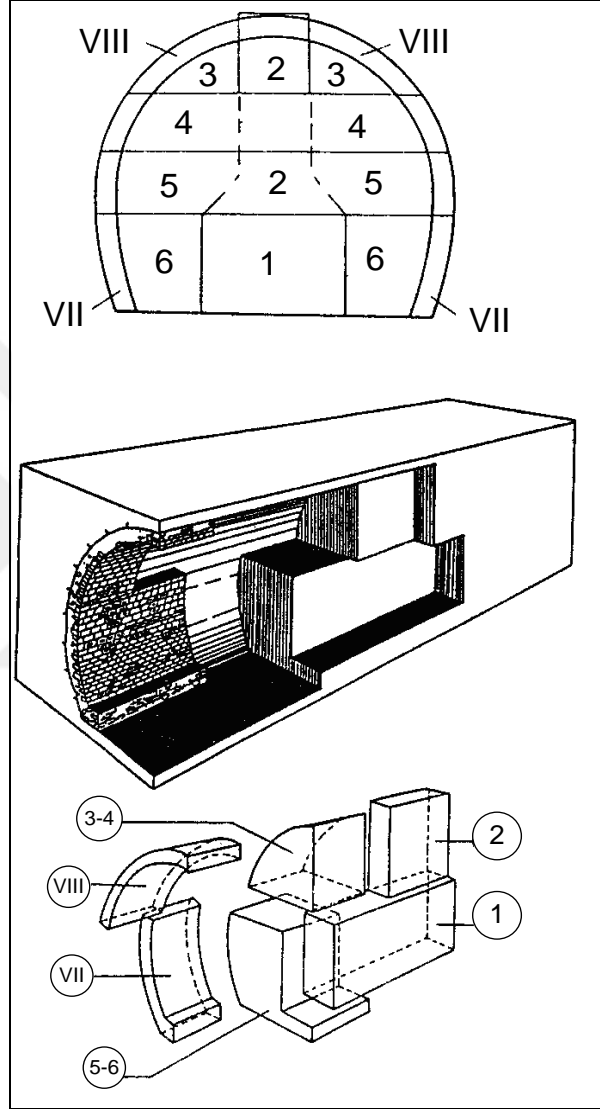
Kazı işleminin yukarıdan aşağı kaplamanın da kazı işlemi bittikten sonra aşağıdan yukarı yapıldığı yöntemdir. Daha çok uzunluğu kısa genişliği fazla olan tünellerde kullanılmasına karşın ağaç tüketimi ve duvar maliyetleri sebebiyle tercih edilmemektedir. Şekil 22’de Eski Avusturya yöntemine ait kazı işlemleri gösterilmiştir.



Şekil 22. Eski Avusturya yöntemi (Köse vd., 1992).

1.4.3.4. İngiliz Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı)

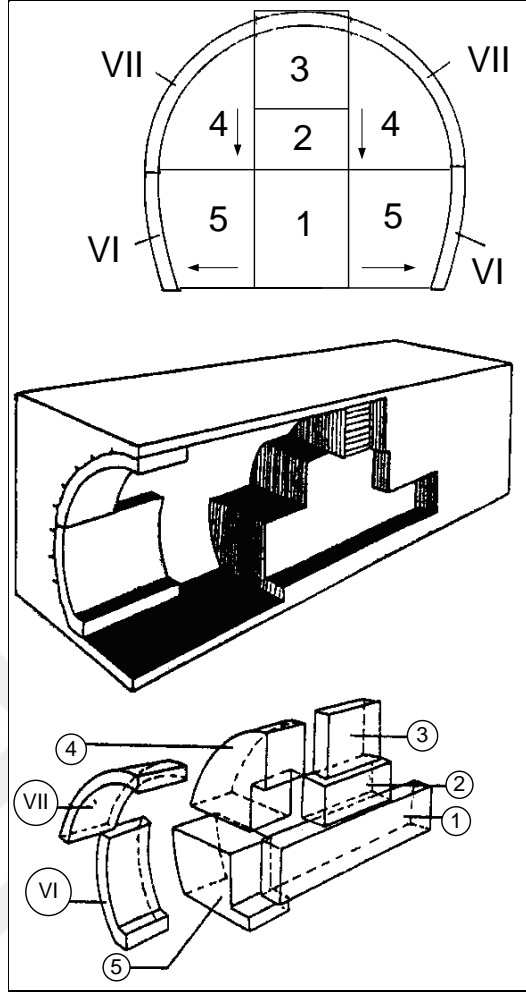
Eski Avusturya Yöntemine çok benzeyen bu yöntem Şekil 23’de gösterildiği gibi daha az parçalı olarak inşa edilir.



Şekil 23. İngiliz yöntemi (Köse vd., 1992).

1.4.3.5. İsviçre Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı)

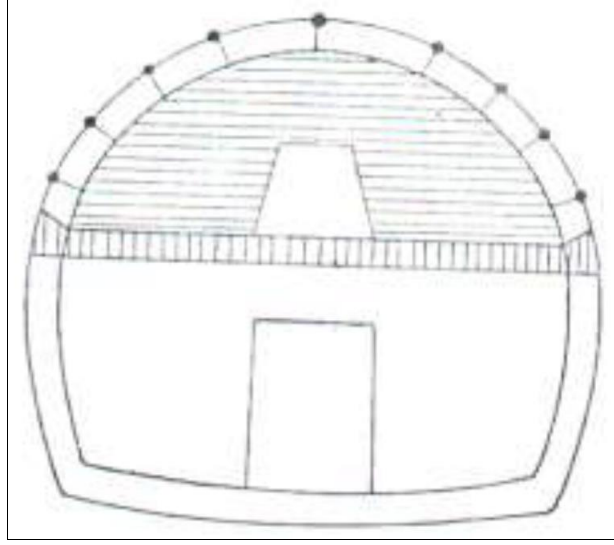
Şekil 24’de gösterildiği gibi önce taban kısmında kazı çalışmaları yapılır. Tabandan tavana ilerleyen kazı işlemi yan kısımlarında aşağı doğru alınarak tamamlanması ve kaplama işleminin aşağıdan yukarı doğru yapılmasıyla tamamlanır.



Şekil 24. İsviçre yöntemi (Köse vd., 1992).

1.4.3.6. İtalyan Yöntemi (Parçalı Kesit Kazı)

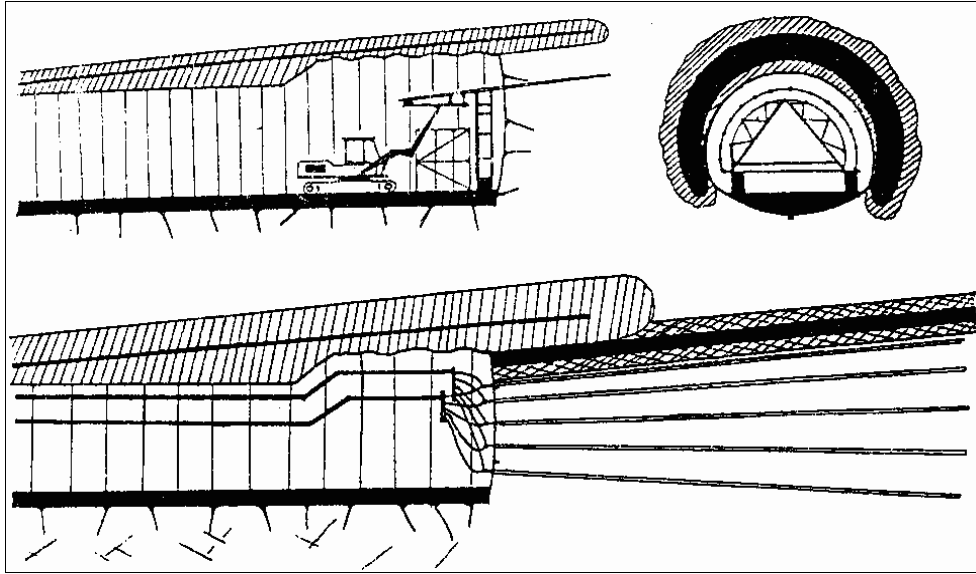
Zayıf zeminlerde kullanılan bir yöntemdir. Şekil 25’de gösterildiği gibi rijit plakalarla kaplanmış olan arın ve tünel cidarı ilerleme sırasında kısım kısım plakalar kaldırılıp kazı işlemi yapılır ve kazı sonrasında tekrar yeniden plakalarla desteklenir.



Şekil 25. İtalyan yöntemi (Köse vd., 1992).

1.4.3.7. Ön Sağlama Yöntemi (Tam Kesit)

Bu yöntemde kayanın mekanik sağlamlığı kazıdan önce dondurma, enjeksiyon yöntemleriyle artırıldıktan sonra kazı işlemine başlanır. Ön sağlama yöntemi Şekil 26'da gösterilmiştir. Maliyetli ve zaman alan bir yöntemdir. Kaya patlaması olan, akıcı ve su içeren kesimlerde kullanılır. İlerleme hızı oldukça düşük olan bir yöntemdir.



Şekil 26. Ön sağlama yöntemi (Bell, 1994).

1.4.3.8. Tam Mekanizma Yöntemi (Tam Kesit)

Bu yöntemde kazı ve nakliye işlemi mekanize olarak yapılır. Destekleme işlemi kazıyı takiben yapılır. İlk yatırım maliyetinin yüksek olmasından dolayı her tünel için ekonomik bir çözüm olmamaktadır. Kolay kazılabilen ancak akma özellik göstermeyen kayalarda kullanılsada gelişen teknolojiyle sert kayalarda da kullanılabilmeye başlanmıştır.

1.4.3.9. Kalkan Yöntemi (Tam Kesit)

Bu yöntem çok plastik ve akıcı kayalarda kullanılmaktadır. Yerleşim merkezlerine yakın yerlerden geçilmesinde deformasyonları önlediği için avantaj sağlamaktadır.

1.4.4. Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile Yapılan Tünel İşleri

Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminde (NATM) çalışmalar birebir takip edilmeli, deformasyonlar okumalar sürekli değerlendirilmeli, oluşan gerilmeler irdelenmelidir. Aynanın jeolejik yapısı değerlendirilirken tecrübeli personelin bulunması, kaya sınıflandırma sistemlerinin hassasiyetle yapılması kaya sınıfının belirlenmesi ve gerekli olan desteklemenin yapılmasında son derece önemlidir. Aksi takdirde bu yöntemdeyetersiz destekleme yapılması yada gereğinden fazla destekleme yapılması kaçınılmazdır. Kazı ve destekleme sırasında tüneli yaşayan bir canlı gibi düşünüp sürekli gözlemlemek gerekir. Tüm bunların kontrollü bir şekilde yapılması halinde kazı işlemi gerçekleştirdiğimiz kayaç ortamı yük oluşturan ortamdan yük taşıyan ortama dönüşmüş olacaktır. Böylece tüneli kendi kendine taşıtmış oluruz.

Bunların yanında süreklilik arz eden tünel imalatında tecrübeli teknik personelin imalat aşamasında kaya stabilitesini etkileyebilecek tüm faktörleri (örtü yükü, kazı kesiti büyüklüğü, süreksizlik durumu, yer altı suyu, ilerleme adımı, deformasyon okumaları) dikkate alarak kaya sınıfına uygun destek sistemi belirlenerek daha etkin, emniyetli ve ekonomik çözüm üretmiş oluruz.

1.4.4.1. NATM'a Göre Kaya Sınıfları ve Özellikleri

Genel olarak kullanılan sınıflandırma sistemleri Avusturyada ve Avrupada kullanılan sistemlerdir. Yapım aşamasında değişkenlik gösteren zemin şartları buna bağlı olarak tünel destekleme sistemlerinin değişimine sebep olmaktadır. Tünel destek sistemlerinden olan kaya bulon tipleri, adetleri, pozisyonu, eğimi, çelik iksa aralığı, türü, püskürtme betonu kalınlığı, süren, hasır çelik gibi tüm tünel destek imalatlarının uygulama aşamasında kullanılması için öncelikli olarak hangi kaya sınıfında ilerlediğimize karar vermemiz gerekir. Bu aşamada tünel dizayncısının öngörüşleri, onaylı paftalarda belirtilen parametreler, tünel kazı aynasındaki kaya kütle ortamı ve kayanın mühendislik özellikleri dikkate alınarak sınıflandırma yapılacaktır. Tablo 1'de KTŞ deki kaya sınıflandırma sistemi gösterilmiştir.

Bunların yanında süreklilik arz eden tünel imalatında tecrübeli teknik personelin imalat aşamasında kaya stabilitesini etkileyebilecek tüm faktörleri (örtü yükü, kazı kesiti büyüklüğü, süreksizlik durumu, yer altı suyu, ilerleme adımı, deformasyon okumaları) dikkate alarak kaya sınıfına uygun destek sistemi belirlenerek daha emniyetli ve ekonomik çözüm üretmiş oluruz.

Tablo 1. KTŞ-tablo-350-1 kaya sınıflandırma sistemi

KAYA SINIFI	ÖNORM B2203 Ekim 1994 ve Sonrası		ÖNORM B2203 Ekim 1994 Öncesi	
	A	A1	Stabil	A1
A2		Sonradan Az Sökülen	A2	Hafif Aşırı Sökülen
B	B1	Gevrek	B1	Gevrek
	B2	Çok Gevrek	B2	Çok Gevrek
	B3	Daneli		
C	C1	Dağ Atma	C1	Baskılı
	C2	Baskılı		
	C3	Çok Baskılı	C2	Çok Baskılı
	C4	Akıcı	L2	Gevşek Zemin Düşük Kohezyon
	C5	Şişen	L1	Gevşek Zemin Yüksek Kohezyon

1.4.4.1.1. A Kaya Sınıfı ve Özellikleri (Stabil-Hafif Aşırı Sökülen Kaya Kütleleri)

“A” olarak gösterilen 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 (NATM).

1.4.4.1.1.1. A1 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

“Stabil” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Kaya kütlesi elastik davranış gösterir. Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Serbest kaya parçaları temizlendikten sonra sökülme eğilimi yoktur. Su etkisi yoktur. Kazı teorik olarak “tam ayna” olarak yapılabilir. Büyük kazı profili hallerinde, kazı genellikle üst yarı ve alt yarı kazısı şeklinde sürdürülür. Delme-patlatma kazı için gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu yumuşak patlatma şartları veyapım tekniğine bağlı olarak seçilir.

1.4.4.1.1.2. A2 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

“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. Su etkisi önemsizdir. Teorik olarak kazı “tam ayna” olarak yapılabilir. Gerçekte, büyük kazı profili hallerinde kazı, genellikle üst yarı ve alt yarı kazısı şeklinde sürdürülür. Delme-patlatma kazı için gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu yumuşak patlatma şartları ve yapım tekniğine bağlı olarak seçilir. Üst yarı kazısında 2,5 – 3,5 m, alt yarıda 4,0 m ile sınırlanmaktadır.

1.4.4.1.2. B Kaya Sınıfı ve Özellikleri (Gevrek Kaya Kütleleri)

“B” olarak gösterilen kaya kütlelerinin davranışı, yapısal kenetleme ve/veya çekme mukavemeti azlığından ötürü hızlı gevşeme ve ayrışmaya meyillidir.

Hemen hemen tüm çevrede, boşluk civarındaki ikincil gerilmeler, kaya kütlelerinin mukavemetini biraz aşmakta, bununla beraber zafiyet mekanizması içerilere ulaşmamaktadır.

Destek yapımının gecikmesi halinde artan çökmeler meydana gelir.

1.4.4.1.2.1. B1 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

“Gevrek” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Deformasyonlar küçüktür ve çok hızlı azalır. Patlamadan kaynaklanan kayadaki gevşemeler ve kaya kütlelerinin düşük dayanımı tünel tavanında ve yan duvarların üst kısmında sökülmelere neden olur. Su etkisi genellikle önemsizdir. Kazı enkesiti üst yarı kazısı ve alt yarı kazısı olarak bölünecektir. İlerleme adımı uzunluğu üst yarı 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.

1.4.4.1.2.2. B2 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

“Çok gevrek” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Tünel desteklenmesinin 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. Bozmuş 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 üst yarı kazısında 1,5 – 2,0 m alt yarıda ise 3,0 – 3,5 m’den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlama ile yapılır. Tünel tavanı ve yan duvarlarda sistematik destekleme gereklidir. Gerektiğinde tavanda süren kullanılacaktır. Süren için delme ve benzeri işlemlerin aynadaki veya tavandaki kütlesi üzerindeki olumsuz etkileri önlenecektir.

1.4.4.1.2.3. B3 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

“Daneli” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Bölünmüş kazıda bile kaya kütlesinde dökülmeler meydana gelir. Kohezyonun az olması ve az çimentolaşma kazının stabilitesinde yetersizliğe neden olur. Bozmuş veya ayrılmış kaya kütlesi içerisine fazla su akışının kaya kütlesinin dayanımı üzerinde etkisi bulunmaktadır. Bölünmüş kazı ile ilerleyebilmek için kaya kütlesini iyileştirici, desteksiz durma süresini artırıcı önlemler alınmalıdır. İlerleme adımı üst yarı kazısında 1,25 – 1,50 m, alt yarıda ise 3 m ‘den fazla olmayacaktır. Kazı genellikle yumuşak patlama ile yapılır, titreşime hassas 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, üst yarı aynasından 100 – 150 m ‘den daha geride olmamak üzere, yerinde dökme bir taban kemer betonu yapılması gerekebilir.

1.4.4.1.3. C Kaya Sınıfı ve Özellikleri (Baskılı Kaya Kütleleri)

“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 kütlesinin aşırı gerilmelere maruz kalması ile kabuk atma, burkulma, kesme ve boşluğa doğru plastik hareket gibi zafiyet mekanizmaları oluşur.

Kaya kütlesinin 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 kütlesine zarar verecek derecedeki gevşeme ve ayrışma, kaya dayanımında büyük miktarda azalmaya yol açar. Açılan boşluktaki büyük deformasyonlar ve uzun dönemde zamana bağlı deplaman davranışı, zeminin elastik olmayan, plastik ve viskoz davranışına bağlıdır.

Çatlamaya veya dökülmeye eğilimli kaya kütleleri ve şişme özelliği gösteren bileşenleri olan kaya kütleleri bu guruba girer.

Bu grup, aynı zamanda ayrıışmış 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 bağılı olarak, elastik veya plastik aşırı gerilme oluşur.

1.4.4.1.3.1. C1 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

Yüksek örtü kalınlığı altında masif kayada yüksek öngerilmeler kırılğan kaya kütlelerinde elastik enerji depolanmasına neden olur. Bu enerjinin aniden yer değıştirmesiyle kayada kesme ve kaya yapısının ezilmesiyle birlikte kırılmalar olur. Desteksiz bırakılan kısımlarda fırlayan kayalar parçalanmaya müsaittir. Kaya kütlelerindeki kırılmalar derinlere ulaşır.

Bozuşmuş veya ayrıışmış kaya kütleleri içerisinde fazla su akışının kaya kütlelerinin dayanamı üzerinde etkisi bulunmaktadır.

Bölünmüş kazı ile ilerlemelidir. Taban kazısı gereklidir. İlerleme adımı uzunluğu üst yarıda 1,5 – 2,0 m alt yarıda 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 kütlelerindeki basıncı azaltıcı delikler açılabilir. BU yöntemle dağ atmalarında önlenbilir. Jeolojik şartlara göre üst yarı aynasından 100-150 m ‘ den daha geride olmamak üzere yerinde dökme bir taban kemeri betonu yapmak gerekebilir.

1.4.4.1.3.2. C2 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

“Baskılı” kaya kütleleri olarak adlandırılır. C2, çevreleyen kaya kütleleri içerisinde derine uzanan plastik zonlar ve basınç veren davranışı ile karakterize edilir. Bu kaya kütlelerinde orta derecede fakat belirgin olarak uzun süren ve yavaş son bulan deformasyonlar gözlenir. Kazı çevresinde deformasyonların merteye ve hızları orta derecededir. Plastik davranışlı yüksek kohezyonlu kaya kütlelerinde gerilme gözlenir.

Su sızıntıları ve konsantre su akışının kaya kütleleri üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır.

Tünel kazısının, üst yarı, alt yarı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Portal bölgelerindeki özel durumlar hariç, üst yarı kazısı kendi içerisinde bölümlere ayrılacaktır. Üst yarı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gerekecektir. İlerleme adımı uzunluğu üst yarıda 0,75 – 1,25 m, alt yarıda 2 m ‘den fazla olmayacaktır. Kazı düzgün patlatma ve mekanik kazı metotlarıyla yapılabilir. Tıraşlamadan hemen sonra püskürtme beton kaplaması gerekmektedir.

Genellikle tünel aynası stabildir. Tüm kesit çevresinde sistematik destekleme gereklidir. Her ilerleme adımında destekleme sistemi tamamladıktan sonra bir sonraki ilerleme adımına geçilecektir. Tünel tavanında süren uygulaması gerekecektir. Süren uygulaması için delgi sırası ve sonrasında imalatın ayna ve tavandaki kaya kütlelerinin olumsuz etkilenmesi önlenmelidir. Destekleme elemanlarının görevi derin plastik kırılmaları sınırlamaktır. Jeolojik şartlara uygun olarak üst yarı aynasından 50 – 100 m ‘den daha geride olmamak üzere taban kemeri gereklidir.

1.4.4.1.3.3. C3 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

“Çok baskılı” kaya kütleleri 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 kütlelerinin davranışı üzerinde önemli etkisi bulunmaktadır.

Tünel kazısının üst yarı kazısı, alt yarı ve taban kazısı olarak bölünmesi zorunludur. Genellikle üst yarı kazısı aynasında bir destekleme gövdesi gerekecektir. Aynada sistematik destekleme gerekebilecektir. İlerleme adımı uzunluğu, üst yarı kazısında 1,2 m’den, alt yarıda ise 2,0 m’den 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 boşluklar ve / veya büyük deformasyonlara cevap verebilecek destek elemanlarının kullanımı gibi özel bir tertibat gerekecektir. Destekleme elemanları, kaya kütlelerinin üç eksenli gerilme durumunu idame ettireceklerdir.

İlerleme adımı uzunluğunun kısaltılması, süren boyunun uzatılması ve üst yarı kazısı aynasında büyük bir merkez destekleme gövdesinin bırakılmasının yeterli olmaması halinde ayna kazısının ayrıca alt kısımlara bölünmesi gerekebilir. Muhtemel çözümler, üst

yarı kazısının yarı taraf kazılar veya yan galeriler halinde yapılması olabilir. Komple kazı bölümünün aşırı düşey hareketleri olması halinde, kaplama temelinin 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 m geride taban kemerinin ring kapaması gerekebilecektir.

1.4.4.1.3.4. C4 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

“Akıcı” kaya kütlesi olarak adlandırılır. Çok az kohezyon ve sürtünme, kaya kütlelerinin 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 üst yarı 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 üst yarı kazısında 1,5 m alt yarıda ise 2,0 m’den fazla olmayacaktır. Kazı tünel ekskavatörü ile yapılacaktır. Kazı ile birlikte püskürtme beton kaplaması gerekmektedir.

Tünel desteklemesi, üst yarıda ve alt yarıda 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 uygulaması zorunludur. Üst yarı

kazısının alt bölümlere ayrılmış kesimlerinde geçici ring kapama gerekebilir. Taban kemerinde ring kapaması, üst yarı kazı aynası gerisinde 25 ile 50 m arasındaki kısa mesafelerde gerekli olabilir.

1.4.4.1.3.5. C5 Kaya Sınıfı ve Özellikleri

“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 sınırlanmasıyla 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 m’yi, alt yarı kazısında 3,0 m’yi geçmeyecektir. Kazı tünel ekskavatörü ile yapılabilir. Büyük kayaların veya mevzii olarak sert kaya kısımlarının kazısında patlatma gerekebilir.

Tünel desteklemesi, üst yarı ve alt yarıda 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 üst yarı aynasından 100 – 150 m’den daha geride olmamak üzere taban kemeri gereklidir.

1.4.5. Kaya Sınıflandırma Sistemi (Kaya Kütlesi Sınıflaması)

Yapımı devam eden ve yapımı tamamlanmış olan birçok tünelde sınıflandırma sistemlerinden yararlanılmıştır. Günümüzdeki sınıflandırma sistemlerinin önemli bir kısmı Tablo 2’de gösterilmiş olup bu bölümde yaygın olarak kullanılan kaya yükü (Terzaghi, 1946), RMR (Bieniawski, 1973) ve Q (Barton, Lien ve Lunde, 1974) sınıflandırma sistemleri incelenecektir.

Tablo 2. Kaya sınıflama sistemleri ve uygulama alanları (Kılıç, 2005).

Sınıflandırma Sistemi	Öneren	Ülke	Uygulama Alanları
1.Kaya yükü	Terzaghi, 1946	ABD	Tünel, çelik iksa
2.Tahkimatsız durma süresi	Lauffer, 1958	Avusturya	Tünel
3.Yeni Avusturya Tünel Yöntemi(NATM)	Pacher ve diğ.1964	Avusturya	Tünel
4.Kaya kalite katsayısı,RQD	Deere, 1964	ABD	Karot tanımı, tünel
5.Kaya Yapısı Değeri, RSR	Wickham ve diğ., 1972	ABD	Tünel
6.Kaya kütle İndeksi, RMR	Bieniawski, 1973	G.Afrika, ABD	Tünel, maden
7.Q Sistemi	Barton ve diğ., 1974	Norveç	Tünel, maden
8.Temel Geoteknik tanımlamalar	ISRM, 1981	Uluslararası	Genel
9.Birleşik Sınıflama	Williamson, 1984	USA	Genel

1.4.5.1. Q Sistemi

Norveç Jeoteknik Enstitüsü araştırmacılarından Barton, Lien ve Lunde 1974 yılında Q Sistemi diye adlandırdıkları bir kaya sınıflama sistemi belirlemiştir. Kaya kütlelerinin değerini belirten Q sayısı aşağıda belirtilen eşitlik yardımıyla bulunur. Tablo 3. de Q sistemi değer aralıkları ve anlamları gösterilmiştir.

$$Q = \frac{1^u}{RQD} \times \frac{1^g}{1^l} \times \frac{2BE}{1^m}$$

Bu eşitlikte;

RQD : Kaya kalite değeri

J_n : Süreksizlik takım sayısı

J_r : Süreksizlik pürüzlülük durumu

J_a : Süreksizlik ayrışma durumu

J_w : Süreksizlik suyu indirgeme değişken faktörü

SRF : Gerilme indirgeme katsayısı

Tablo 3. Q sistemi değer aralıkları ve anlamları

Q DEğERİ	SINIF	KAYA KÜTLE KALİTESİ
400-1000	A	Son derece zayıf
100-400	A	Çok fazla zayıf
40-100	A	Çok zayıf
10-40	B	Zayıf
4-10	C	Orta
1-4	D	İyi
0.1-1	E	Çok iyi
0.01-0.1	F	Pek çok iyi
0.001-0.01	G	Son derece iyi

Q Sistemi tanımlaması aşağıda gösterilen tablolar yardımıyla RQD, J_n , J_r , J_a , J_w , SRF belirlenerek yapılır. Tablo 4 RQD kaya niteliği sınıflaması, Tablo 5 çatlak pürüzlük değerini, Tablo 6 çatlak sistemi değerini, Tablo 7 çatlak suyu azaltma faktörünü, Tablo 8 çatlak ayrışma değerini, Tablo 9 gerilim indirgeme faktörünü, Tablo 10 kazı destek oranları faktörünü belirlememizi sağlamaktadır. Kalıcı destek ve güçlendirme sistemlerinin tespiti için Q destek grafiği Şekil 27’de gösterilmiştir.

Tablo 4. RQD kaya niteliği sınıflaması

Kaya Kalitesi	RQD
Çok zayıf	0-25
Zayıf	25-50
Orta	50-75
İyi	75-90
Pekiyi	90-100

Tablo 5. Çatlak pürüzlük değeri (J_r)

Çatlak Pürüzlük Durumu	J_r
Süresiz Çatlaklar	4
Pürüzlü ya da düzensiz, dalgalı	3
Düz dalgalı	2
Sürtünme izli dalgalı	1.5
Pürüzlü ya da düzensiz, düzlemsel	1.5
Düz, düzlemsel	1
Sürtünme izli, düzlemsel	0.5

Tablo 6. Çatlak sistemi değeri (Jn)

Çatlak Sistemi	Jn
Masif, çatlak çok az veya hiç yok	0.5-1
Bir çatlak sistemi	2
Bir çatlak sistemi ve gelişigüzel çatlaklar	3
İki çatlak sisitemi	4
İki çatlak sistemi ve gelişigüzel çatlakalar	6
Üç çatlak sistemi	9
Çatlak Sistemi	Jn
Üç çatlak sistemi ve gelişigüzel çatlaklar	12
Dört veya daha fazla çatlak sistemi gelişigüzel çok fazla sayıda, küp şeker şeklinde	15
Paralanmış kaya, toprak görünümünde	20

Not: Tünellerde kesişme bölgelerinde (Jn x 3),
Giriş ağız bölgelerinde (Jn x 2)

Tablo 7. Çatlak suyu azaltma faktörü (Jw)

Su Durumu	Jw	Yaklaşık su basıncı (kg./ cm. ²)
Kuru kazılar yada <5 lt. / dak su gelen kazılar	1	< 1
Orta derecede su gelişi veya basınç, çatlak dolgularının yer yer yıkanması	0.66	1 - 2,5
Dolgunsuz, çatlaklı dayanımlı kayada çok miktarda su gelişi veya yüksek basınç	0.5	2,5 - 10
Çok miktarda su gelişi veya yüksek basınç ile çatlak dolgularının fazlaca yıkanması	0.33	2,5 - 10
Patlama sırasında çok fazla su gelişi veya su basıncı, fakat zamanla azalması	0.2-0.1	10
Zamanla azalmayan çok fazla su gelişi veya su basıncı	0.1-0.05	< 10

Tablo 8. Çatlak ayrışma değeri (Ja)

Çatlak Ayrışma Durumu	Ja	Ø °(Yaklaşım Derece)
Sıkıca bağlanmış, sert, yumuşamaz geçirimsiz dolgu (Örneğin kuvars, epidol)	0.75	-
Ayrışmamış çatlak yüzleri, sadece yüzeysel paslanma	1	25-35
Hafifçe ayrılmış çatlak yüzleri. Yumuşamayan mincral kaplamaları, kil içermeyen kaya parçaları	2	25-30
Siltli veya kumlu kil kaplamaları, yumuşamayan düşük kil oranı	3	20-25

Tablo 8'in devamı

Çatlak Ayrışma Durumu	Ja	Ø °(Yaklaşım Derece)
Yumuşamayan veya düşük sürtünmeli kil mineral kaplamalı, (kaolinit, mika v.b.) Ayrıca klorit, talk, jips, grafit ve az miktarlarda şişen killer (1 - 2 mm.veya daha az kalınlıkta kesikli kaplamalar)	4	8-10
Kum taneleri, kil içermeyen kaya parçaları	4	25-30
Fazla konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolguları (kesiksiz, kalınlığı 5 mm. den az)	6	16-24
Orta veya düşük derecede konsolide olmuş, yumuşamayan kil mineral dolgulu (kesiksiz, kalınlığı 5 mm. den az)	8	12-16
Şişen kil dolgulu, (kesiksiz, kalınlığı 5 mm.den az). Ja' nın değeri, şişen kil boyutundaki tanelerin yüzdesine ve su etkisinde kalıp kalmayacağına göre değişir.	8-12	6-12
Dağılmış kaya ve kil bölge veya bantları	6-8 veya 8-12	6-24
Kil şartları tanımlaması için G.H.J.	6-8 veya 8-12	6-24
Maddelerine bakınız	6-8 veya 8-12	6-24
Siltli veya kumlu bölge kil bölge veya bantları, yumuşamayan düşük kil oranı	5	-
Kalın, sürekli kil bölge veya bantları	13	6-24

Tablo 9. Gerilim indirgeme faktörü (SRF)

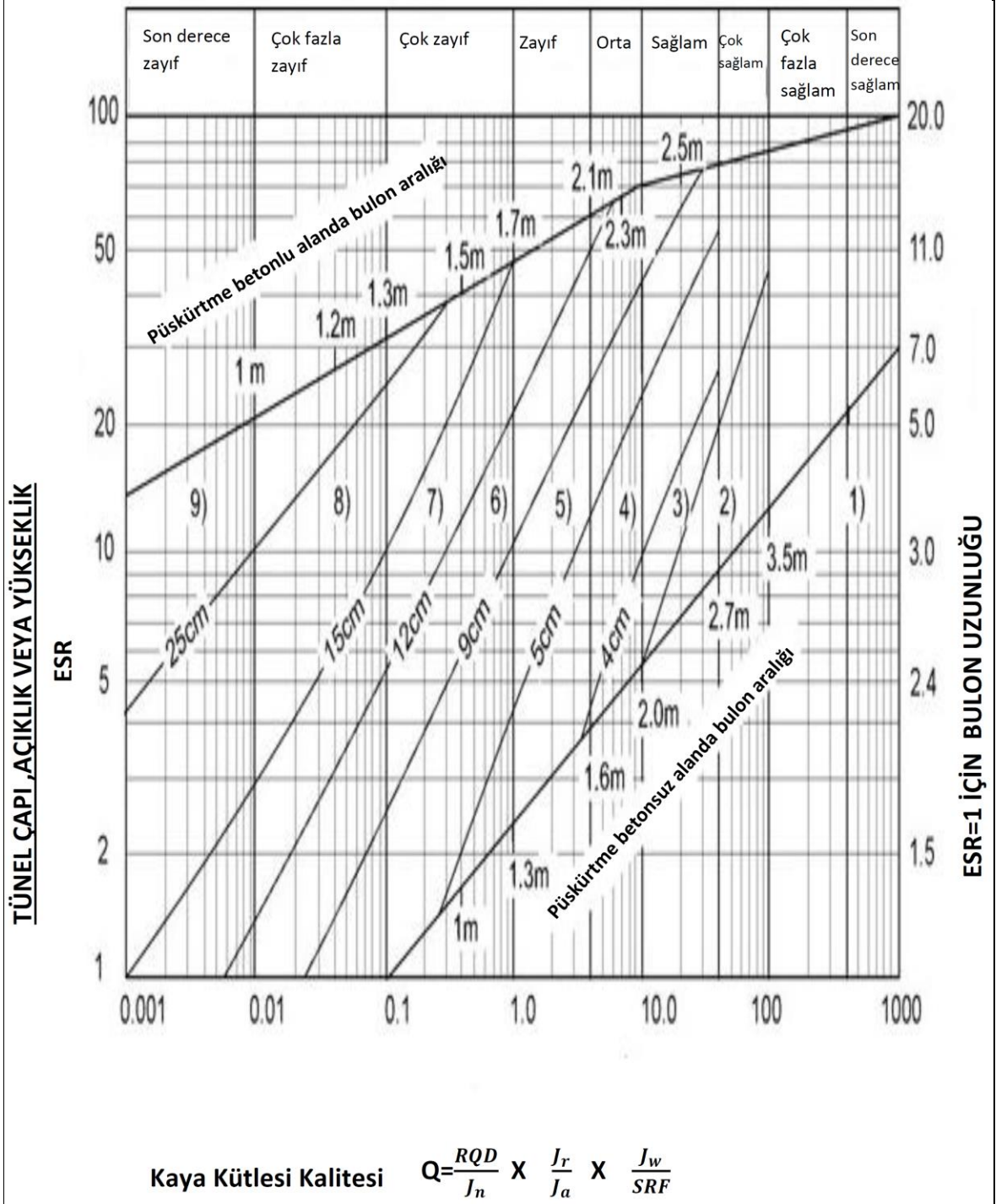
Kazıyı kesen zayıflık zonları, tünel kazılırken kaya kütlelerinin gevşemesine neden olabilir.	SRF
Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya kapsayan birden fazla zayıflık (herhangi bir derinlikte)	10
Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya kapsayan tek zayıflık zonu (herhangi bir derinlikte)	5
Kil veya kimyasal olarak parçalanmış kaya kapsayan tek zayıflık zonu (kazı derinliği < 50 m.)	2.5
Kil kapsamayan dayanımlı kayada birden fazla makaslanma zonu, gevşek çevre kayacı (herhangi bir derinlikte)	7.5
Kil kapsamayan dayanımlı kayad tek makaslama zonu, (kazı derinliği < 50 m.)	5
Kil kapsamayan dayanımlı kayada tek makaslama zonu (kazı derinliği > 50 m.)	2.5
Gevşek ve açık çatlaklar, fazla çatlaklı, küp şekeri görünümlü (herhangi bir derinlikte)	5

Tablo 9'un devamı

Dayanımlı kaya, kaya gerilmesi sorunları	$s_c / s_1 s_1 / s_1$	SRF
Düşük gerilme, yüzeye yakın	$> 200 > 13$	2.5
Orta derecede gerilme	200 – 1013 - 0,66	1
Yüksek gerilme, çok sıkı yapı	10 – 50,66 -0,33	0.5-2
Az kaya patlaması (masif kaya)	5 - 2,50,33 - 0,16	5-10
Fazla kaya patlaması (masif kaya)	2,50.16	10-20
NOT: s_c = Serbest basınç direnci kN / m^2 s_c = Çekme direnci (kN / m^2) s_c =Asal gerilme(kN / m^2)		
Yüksek kaya basıncının etkisi altında dayanımsız kayanın plastik akması		SRF
Az sıkışan kaya basıncı		5-10
Fazla sıkışan kaya basıncı		10-20
Suyun varlığına bağlı olarak kimyasal şişme		SRF
Az şişen kaya basıncı		5-10
Fazla şişen kaya basıncı		10-15

Tablo 10. Kazı destek oranları faktörü (ESR)

Kazı Tipi	ESR
Geçici maden kazıları	3-5
Sürekli maden kazıları, hidrolik enerji amaçlı su tünelleri (yüksek basınçlı cebri borular hariç), büyük kazılar için pilot tüneller, yarmalar ve aynalar v.b.	1-6
Depolar, su tasviye tesisleri, küçük yol ve demir yol tünelleri, denge bacaları, yaklaşım tünelleri v.b.	1-3
Santral binaları, büyük yol ve demir yolu tünelleri, sivil savunma sığınakları	1
Yer altı nükleer santralleri, fabrikalar, spor ve kamu tesisleri	0.8



Şekil 27. Tüneller ve yeraltı açıklıkları için kalıcı destek ve güçlendirme sistemlerini tespit için Qdestek grafiği (Grimstad,1993 modifiye hali), (Barton vd.,1974).

1.4.5.2. RMR (Jeomekanik Kaya Sınıflandırma Sistemi)

Kaya Kütleli Değerlendirme Sistemi ilk olarak 1973 yılında bieniawski tarafından ortaya konmuş daha sonra 1974, 1979, 1989 yıllarında geliştirilmiştir. RMR uygulamasında Tablo 11, 12, 13 ve Tablo 14'deki çizelgeler yardımıyla değişkenlerin sınır değerleri ve Tablo 15'deki tanımlamalar yardımıyla RMR puanı ve kazı açıklığına göre tünelin desteksiz ayakta kalma süresi belirlenir. Sınıflamaya göre kazı açıklığı ile iksasız durma süresinde ilişki Şekil 28'de gösterilmiştir.

Tablo 11. Sınıflandırma değişkenleri ve sayısal değerler

Değişken		Değer Aralığı				Düşük aralık için tek eksenli basınç deneyi tercih edilir.	
1	Kayanın direnci	Nokta yükü direnç indisi	>10 MPa	4 – 10 MPa	2 – 4 MPa		1 – 2 MPa
		Tek eksenli basınç direnci	>250 MPa	100 – 250 MPa	50 – 100 MPa	25 – 50 MPa	5 – 25 MPa 1 – 5 MPa <1 MPa
	Sayısal değer	15	12	7	4	2 1 0	
2	Kaya kalite katsayısı %	90 – 100	75 – 90	50 – 75	25 – 75	<25	
	Sayısal değer	20	17	13	8	3	
3	Süreksizlik aralığı	>2.0 m	0.6 – 2.0 m	20 – 60 cm	6 – 20 cm	<6 cm	
	Sayısal değer	20	15	10	8	3	
4	Süreksizlik durumu	Çok pürüzlü yüzeyler süreksiz, bitişik, sert eklem yüzeyli	Az pürüzlü yüzeyler açıklık <1 mm sert eklem yüzeyi	Az pürüzlü yüzeyler açıklık <1 mm yumuşak eklem yüzeyi	Parlak yüzeyler veya 5 mm den az kalınlıkta dolgu malzemesi veya açıklık 1-5 mm sürekli	5 mm den daha kalın yumuşak dolgu maddesi veya açıklık > 5 mm sürekli	
		Sayısal değer	30	25	20	10	0
5	Yer altı suyu	Tünel uzunluğunun her 10 m sindeki akış	Yok	<10 l/dak	10 – 25 l/dak	25 – 125 l/dak	>125 l/dak
		Eklem suyu basıncı	veya		veya	veya	veya
		Büyük asal gerilme	0	0	0.0–0.2	0.2 – 0.5	0.5
	Genel durum	veya kuru	Nemli	veya ıslak	veya Orta miktarda su basıncı	veya Çok aşırı su problemleri	
Sayısal değer	15	10	7	4	0		

Tablo 12. Süreksizlik yönelimine göre yapılacak sayısal düzeltmeler

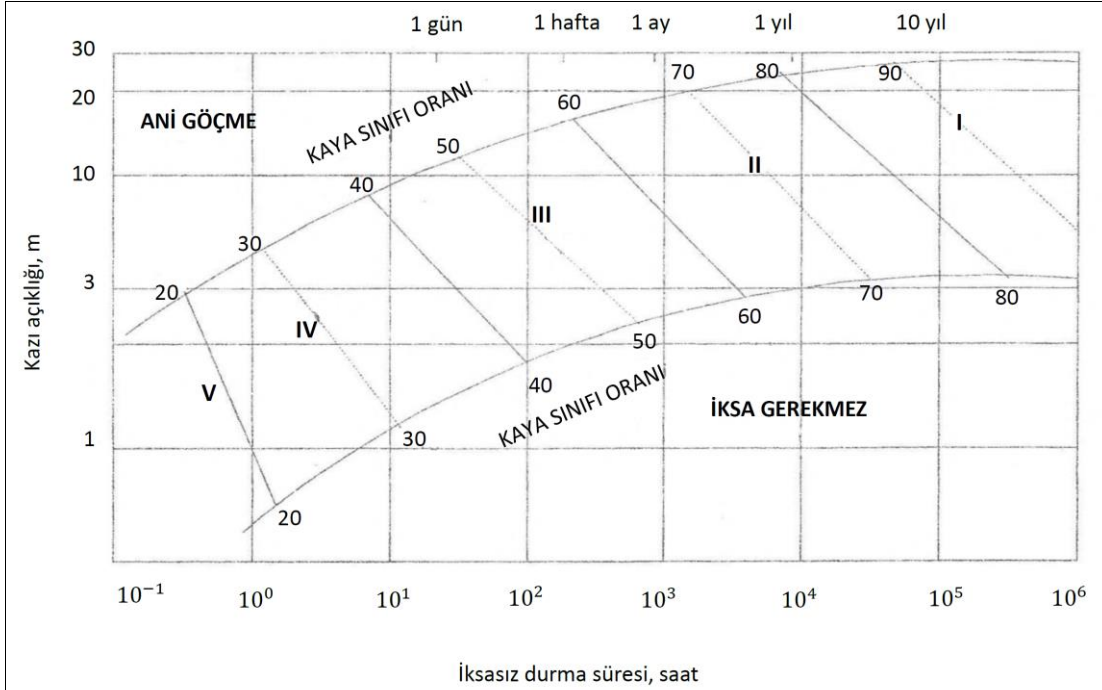
Eklemlerin eğim ve doğrultusu		Çok uygun	Uygun	Normal	Uygun değil	Hiç uygun değil
Sayısal değerler	Tüneller	0	-2	-5	-10	-12
	Temeller	0	-2	-7	-15	-25
	Şevler	0	-5	-25	-50	-60

Tablo 13. Toplam sayısal değerlendirmelere göre kaya kütesinin sınıflandırılması

Sayısal değerler toplamı	100-81	80-61	60-41	40-21	<20
Sınıfı	I	II	III	IV	V
Tanım	Çok iyi kaya	İyi kaya	Orta kaya	Zayıf kaya	Çok zayıf kaya

Tablo 14. Kaya kütesi sınıflarının ifade ettiği anlamlar

Sınıfı	I	II	III	IV	V
Ortalama iksasız geçmeden durma süresi	15 m açıklık için 10 sene	8 m açıklık için 6 ay	5 m açıklık için 1 hafta	2.5 m açıklık için 10 saat	0.1 m açıklık için 30 dakika
Kaya kütesinin kohezyonu	> 400 kPa	300-400 kPa	250-300 kPa	100-200 kPa	< 100 kPa
Kaya kütesinin ϕ , derece	<45	35-45	25-35	15-25	< 15



Şekil 28. Tünelcilik ve madencilikte jeomekanik sınıflamaya göre kazı açıklığı ile iksasız durma süresi arasındaki ilişki

RMR Sistemine göre kaya tünellerindeki kazı sistemi ve iksa sistemleri

Tablo 15. RMR Sistemine göre kaya tünellerindeki kazı sistemi ve iksa sistemleri

RMR sınıfı	Kazı Şekli	İksa		
		Kaya civataları,20mm çaplı tamamı betonlu	Püskürtme Beton	Çelik İksa
Çok sağlam kaya81 - 100 I	Tam ayna 3 m ilerleme	Belli noktalar dışında genellikle iksa gerekmez		
Sağlam kaya 61 - 80 II	Tam ayna 1.0-1.5 m ilerleme, iksayı aynadan 20 miçerdentamamlama	Tavanda bölgesel kaya civatası 3 m uzunlukta 2.5 m aralıklı gerektiğinde çelik hasır ile birlikte	Tavanda gerekli yerlerde 5cm kalınlıkta	Gerekmez
Orta derecede sağlam kaya 41 - 60 III	İki basamak halinde ilerleme üst basamakta 1.5-3.0 m ilerleme her patlamadan sonra iksa başla.İksayıaynadan 10m içinde tamamlama	Sistemantik kaya civatası,4m uzunlukta tavanveyan duvarda 1.5-2.0maralıklı gerektiğinde çelik hasır	Tavanda 5-10 cm yan duvarlarda 3 cm kalınlıkta	Gerekmez
Zayıf kaya 21-40 V	İki basamak halinde ilerleme üst basamakta 1.0-1.5 m ilerleme.İksa olabildiğince kazı ile birlikte yürüt,iksayı aynadan 10m içerde tamamlama	Sistemantik kaya civatası,4.5m uzunlukta, tavan ve yan duvarlarda 1.0-1.5m aralıklı çelik hasır	Tavanda 10-15 cm yan duvarlarda 10 cm kalınlıkta	Gerektiğinde 1.5maralıklı hafif bağ
Çok zayıf kaya <20 V	Çok basamaklı üst basamakta 0.5-1.5m ilerleme.İksayı kazı ile birlikte yürüt. Patlatmadan sonra derhal püskürtme beton uygula	Sistemantik kaya civatası,5-6m uzunlukta, tavan ve yan duvarlarda 1-1.5m aralıklı çelik hasırla birlikte tabanı civatala	Tavanda 15-20 cm yanlar 15 cm ve ayna 5 cm kalınlıkta	Orta veya ağır bağ,75 cm aralıklarla,çelik kamalarla tç.

1.4.5.3. RQD (Kaya Kalite Katsayısı)

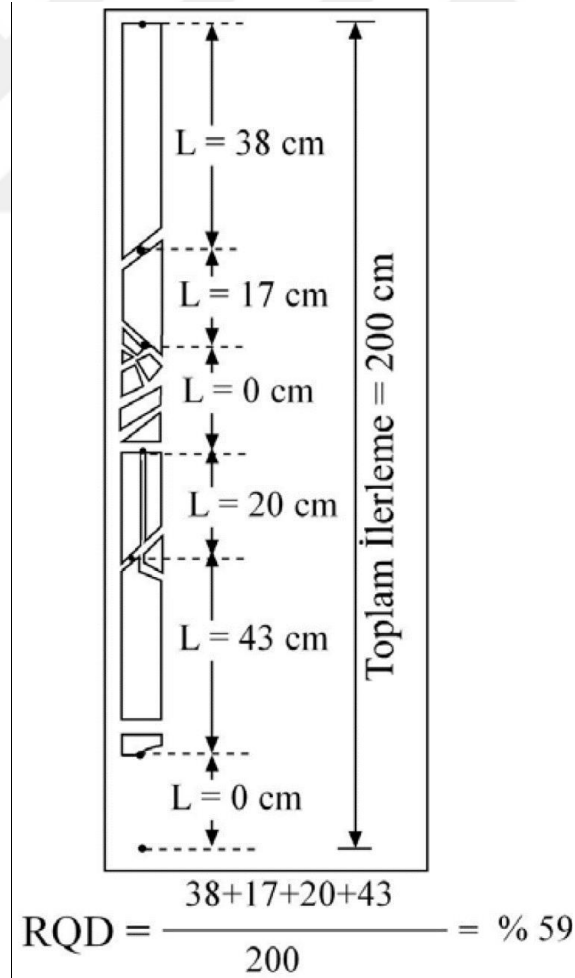
Kaya Kütleli Sınıflamalarında sıklıkla kullanılan RQD değeri ilk olarak 1964 yılında DEERE tarafından geliştirilmiştir. Şekil 29'da gösterildiği gibi sondajla elde ettiğimiz karotlardan boyları 10 cm'den uzun ve sağlam olanların toplamının kademe ilerlemesine oranı ile bulunur. Tablo 16'da RQD aralıklarına karşılık gelen kaya kalitesi belirtilmiştir.

Burada kaya kalite katsayısı süreksizlerin yoğunluğuna göre tek başına değerlendirilmiş olup RQD değeri kaya sınıflandırma sistemi olarak kullanılması belirleyici olmayacaktır.

Tablo 16. Kaya kalite katsayısı RQD

RQD,%	KAYA KALİTESİ
0-25	A:Çok Düşük
25-50	B:Düşük
50-75	C:Orta
75-90	D:İyi
90-100	E:Çok İyi

RQD kaya kalite sınıflaması (Deere, 1964)



Şekil 29. RQD tanımı ve hesaplaması (Deere, 1964).

1.4.6. Tünel Desteklemesi

Tünelin daimi stabilitesini sağlamak için gerekli olan tünel elemanlarını oluşturur. Belirlenen kaya sınıflandırmasına bağlı olarak kazıdan hemen sonra tünel desteklemesinin tipi, miktarı belirlenir. Tünelcilikte kullanılan bazı destek elemanları; püskürtme betonu, çelik iksa, çelik levha süren, donatı çeliği, süren, kablo ankrajlar, kaya tabakalarında enjeksiyon, kaya bulonları(SN, PG IBO, Swellex, Süper Swellex)'dir. Bu çalışmada bunlardan her tünelde kullanılan desteklemeleri inceleyeceğiz.

1.4.6.1. Süren

Kazı çalışmalarından önce uygulanan bir destekleme türüdür. Kazı sırasında oluşacak aşırı sökülme, göçmeleri önlemek amacıyla kullanılır. Uygulanan sürenler her zaman çelik iksayla bağlantılıdır. Süren uygulaması Şekil 30'da gösterilmiştir. Kullanılacak olan malzemeler KTŞ belirtilen iç çapı 30 ile 35 mm olan çelik borular veya minimum 26 mm çapında yüksek mukavemetli nervürlü donatı demirdir.



Şekil 30. Süren uygulaması

1.4.6.2. Çelik İksa

Projesinde belirtilmiş tahkim sistemine bağılı olarak I profil kemerler, H profil kemerler, TH ve E profil kemerler, Kafes kiriş çelik iksa tiplerinden biri kullanılır. Zayıf zeminlerde tam destekleme sağlanıncaya kadarki süreçte ön destekleme olarak çalışmalara emniyetli bir şekilde devam etmek göçükleri önlemek için kullanılan Şekil 31’de gösterilen çelik yapı profilleridir. Çeliğin minimum 400 N/mm akma mukavemetine ve minimum 500 N/mm çekme mukavemetine sahip olması gereklidir.



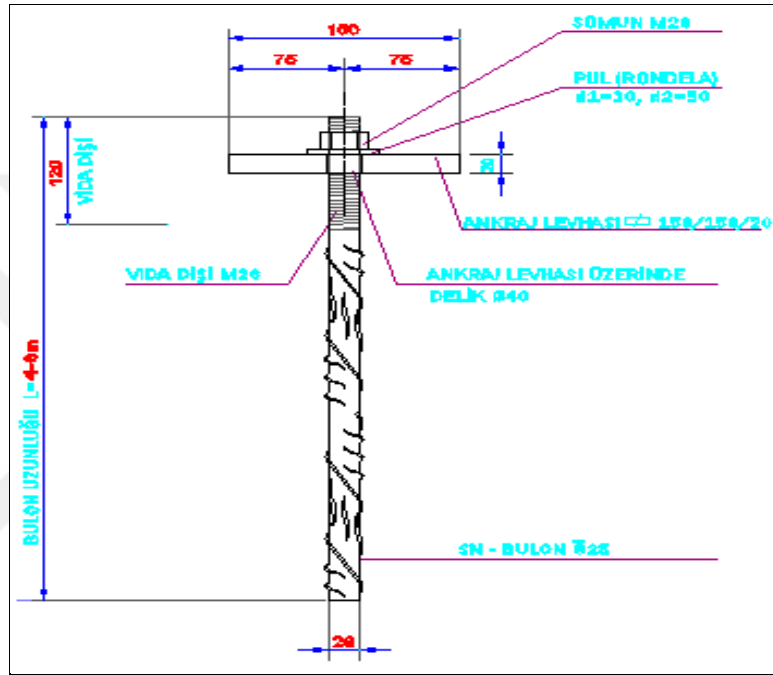
Şekil 31. Çelik iksa Profil

1.4.6.3. Kaya Bulonları

Bulonlar yardımıyla oluşturulan tabakayla yük taşıma kapasitesi arttırılır böylece gelen yük aktarılarak dağdağa taşıtmamıza yardımcı olan bulonlar ana iksanın bir parçasıdır. Kullanılacak bulon tipi, boyu, sayısı belirlenen kaya sınıfına göre değişiklik gösterebilir.

1.4.6.3.1. SN Bulonlar

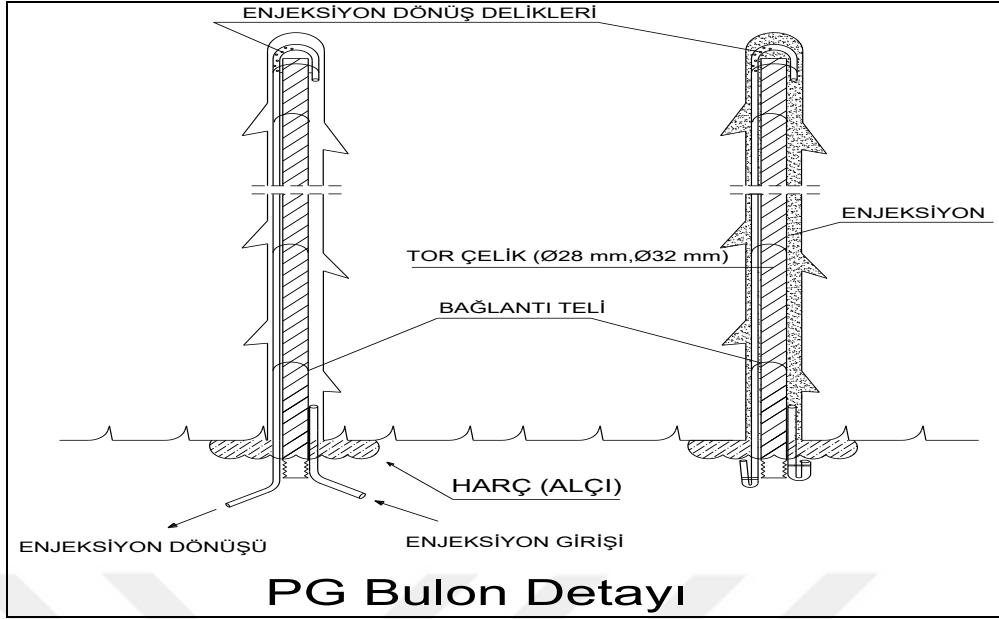
Uygulanacak yüzeye önce bulon delgi işlemi yapılır. Delgi işleminin tamamlanmasının ardından buraya enjeksiyon doldurulur. Bundan sonra bulon bu deliğe itilir. KTŞ nin ST 42 için minimum bulon çapı 28 mm, ST 52 için 25mm dir. SN bulon detayı Şekil 32’de gösterilmiştir.



Şekil 32. SN bulon detayı

1.4.6.3.2. PG Bulonlar

Bunun SN bulondan farkı enjeksiyon harcının bulon delgiye yerleştirildikten sonra önceden yerleştirilmiş olan enjeksiyon hortumuyla verilmiş olmasıdır. PG bulon detayı Şekil 33’de gösterilmiştir.



Şekil 33. PG bulon detayı

1.4.6.3.3. İBO Bulonlar

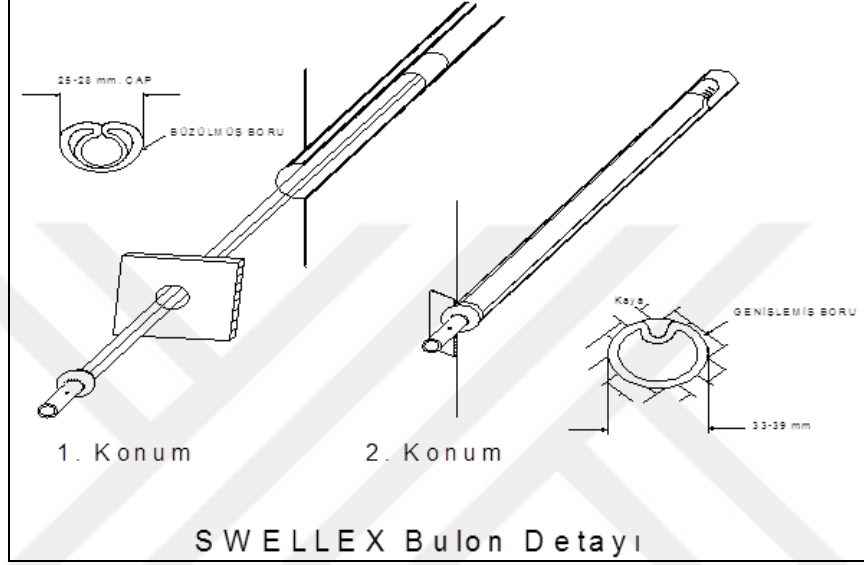
Burada bulon delgisini yapan çubukla bulonun kendisi aynıdır. İBO bulon detayı Şekil 34’de gösterilmiştir. Delme işleminden sonra çubuk yerinde bırakılır. Bu daha zayıf olandelgi işleminden sonra hemen kapanan ve bulon yerleştirilmesine izin vermeyen zeminlerde kullanılır. Aynı zamanda uzun boylu bulon kullanımının gerektiği durumlarda ekleme yapılabildiğinden tünel içi imalatlarda kullanılır.



Şekil 34. İBO bulon detayı

1.4.6.3.4. SWELLEX Bulonlar

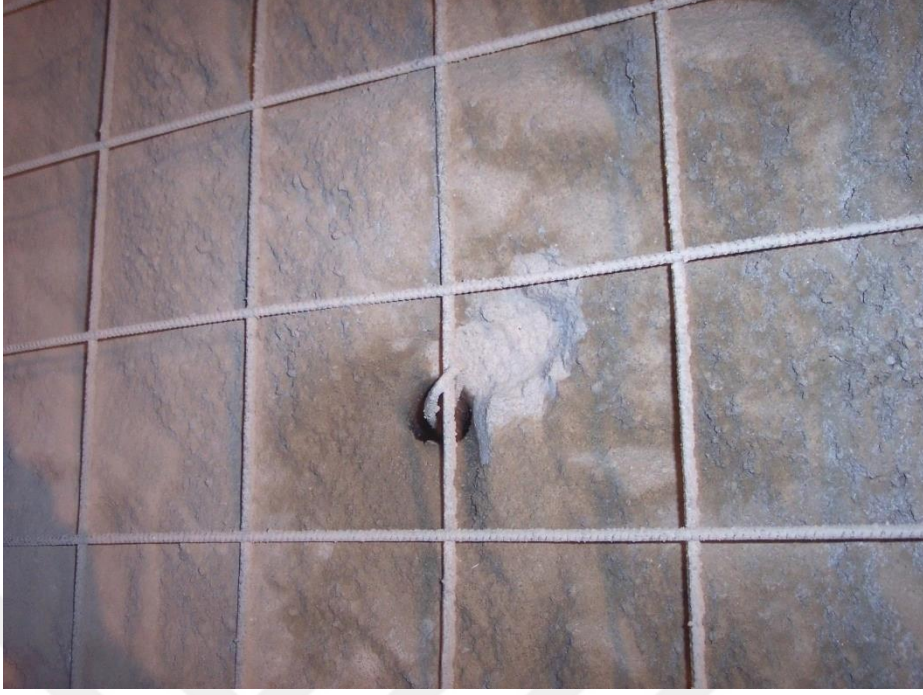
Bu blonlar daha çok sağlam zeminlerde kullanılır. Delme işlemi tamamlandıktan sonra yerleştirilen bulonlara genişletme işlemi yapılarak destekleme sağlanır. SWELLEX bulon detayı Şekil 35’de gösterilmiştir.



Şekil 35. Swellex bulon detayı

1.4.6.4. Hasır Çelik

Kazı işleminden sonra kazıyüzeylerine uygulanan emniyet püskürtme betonunun yüzeyine uygulanır. Şekil 36’da hasır çelik uygulaması gösterilmiştir. Kullanılacak hasır çeliğin minimum akma mukavmeti 500 N/mm² olan yapı çeliğinden üretilmiş olmalı ve 5 mm çapında 100x100 mm veya 6.5 mm çapında 150x150 mm aralıklı hasır çelik kullanılmalıdır.



Şekil 36. Hasır çelik uygulaması

1.4.7. Profil Kontrolü ve Toleranslar

Burada KTŞ 2013 350.05 Profil Kontrolü ve Toleranslar bölümü incelenmiş olup belirli kısımları aşağıda paylaşılmıştır.

- Radyal Deplasman hızının ayda 2 mm'nin altına inmesinden sonra nihai kaplama betonu ile ilgili çalışmalar başlayacaktır. Deformasyonun durması ile birlikte profil kontrolü çalışmaları başlamaktadır.
- Teorik gabari profilindeki sapmalar, fazla kazı yapılmış olması durumunda ya ilave püskürtme betonu teminiyle veya iç kaplama betonuyla doldurulmaktadır. Nihai beton gabarisine giren kısımlarda ise tarama yapılarak tünel iç kaplaması yeniden şekillendirilmektedir.
- Tamamlanmış tünel enkesitindeki tünel ekseninin, hesaplanmış tünel ekseninden güzergah plandaki sapması 50mm'den fazla olmayacaktır.
- Teorik iç beton kaplaması kalınlığının içine ankraj/bulon başlıkları, püskürtme betonu, çelik iksa gibi destekleme elemanları girmeyecektir.
- Beton taban kemeri olmayan tünel kesimlerinde taban yapısı alt kotu taban yapısı teorik kazı hattına göre +0 ile -100mm arasında bir hassasiyetle kazılacaktır.

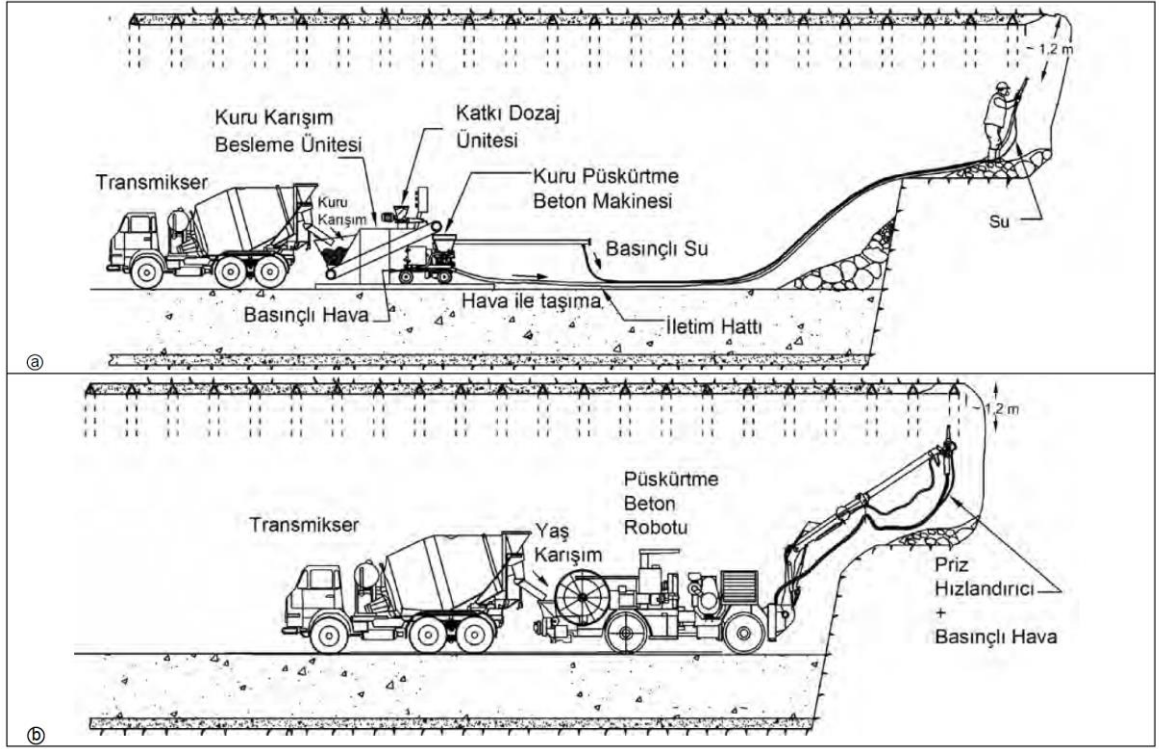
- Beton taban kemeri olan tünel kesitlerinde; taban kemerinin i yüzeyi, teorik enkesitten, kot olarak 5cm'den fazla sapmayacaktır.
- Beton kaplama i yüzeyinin teorik enkesite göre ie doğru göstereceği sapma genel olarak 5cm'yi geçmeyecektir.
- En alt kısımlarda kablo kanallarına ait minimum boyutların sağlanması için bu 3 cm ile sınırlanılmıştır.
- Niş, oyuk ve benzeri yapılar, dizayn edilen istasyonda 50mm toleransla yapılacaktır.
- Prekast eleman ve diğer yapı elemanları, teorik tünel enkesitine göre 15 mm'lik toleransla imal ve yerlerine monte edilecektir.

1.4.8. Püskürtme Beton

Püskürtme beton dizaynında belirtilen miktarlara uygun olarak karıştırılan agrega, imento, su, priz hızlandırıcının yüksek basınçlı hava yardımıyla boru ile püskürtülerek yerine yerleştirilir. Püskürtme betonun kullanım alanları; Boru ve kanalizasyonların işlerinde, tünel yapımı ve onarımı, şev stabilizasyonlarında, baraj ve köprü yapımı ve onarımında, depremden hasar görmüş yapıların onarımı gibi birçok alanda kullanılmaktadır. Püskürtme betonda imalat kalitesini sağlamak ve korumak için birçok faktör etkindir.

1.4.8.1. Püskürtme Betonun Uygulama Yöntemleri

şekil 37'de püskürtme betonu yaş yöntem ve kuru yöntem olarak uygulama yöntemleri gösterilmiştir.



Şekil 37. Kuru ve yaş karışım püskürtme beton uygulama yöntemleri (Arioğlu vd.,2008).

1.4.8.1.1. Kuru Yöntem

Bu yöntemde çimento ve agrega kuru karışım olarak püskürtme ucuna kadar basınçlı havayla iletilir burada karışıma su eklenip püskürtme tabancasıyla püskürtme işlemi gerçekleştirilir. Genellikle kullanılan sıvı haldeki priz hızlandırıcı püskürtme ucunda karışıma dahil edilir. Eğer priz hızlandırıcı toz halindeyse püskürtme beton makinasına beton verilirken ilave edilir. Bu çok kullanılmayan bir yöntemdir.

1.4.8.1.2. Yaş Yöntem

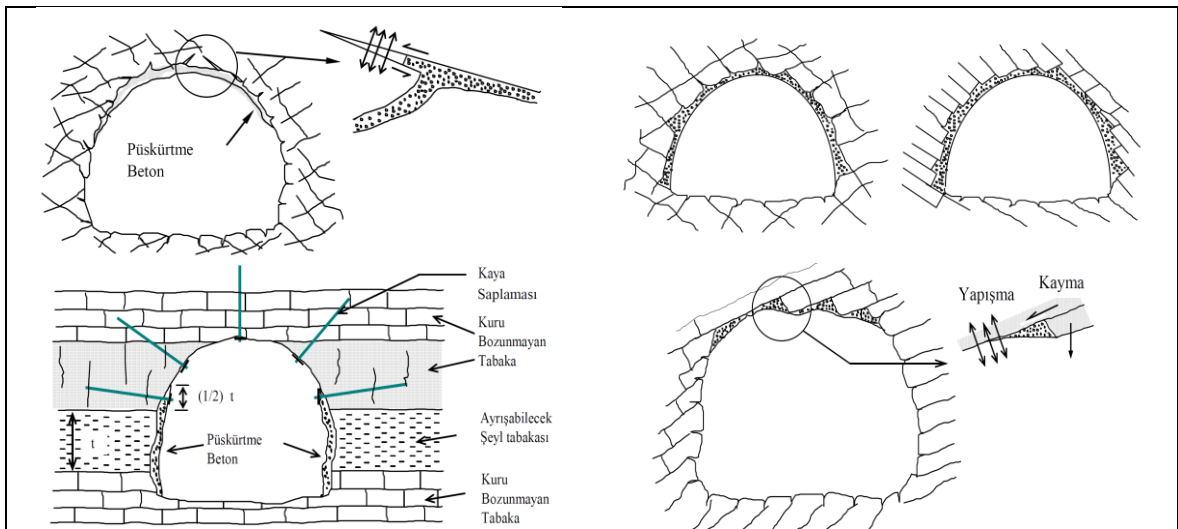
Bu yöntemde çimento, agrega, su karışmış olarak gelir püskürtme işlemi gerçekleştirilir. Priz hızlandırıcı katkının ilavesi kuru yöntemde olduğu gibi püskürtme ucunda ilave edilir.

1.4.8.2. Kuru ve Yaş Püskürtme Beton Karşılaştırmaları

Kuru Sistem ve Yaş Sistemi karşılaştırdığımızda Yaş Sistemin genel olarak avantajlı olduğu görülmektedir. Geri sıçrama kuru sistemde 2-3 kat daha fazladır. Geri sıçramanın meydana gelmesinden kaynaklanan iri agrega kaybı dayanım kaybına da sebep olmaktadır. Kuru sistemde karışıma su sonradan imalat yerinde ilave edildiğinden toz oluşumu fazladır. Toz oluşumu, geri sıçrama miktarı iş sağlığı ve güvenliğini olumsuz etkilemekte ve imalat aşamasında zorluklara sebep olmaktadır. Yaş Sistemde pompalanacak olan püskürtme betonu otomasyonlu santrallerde hazır olarak gelir ancak kuru sistemde su arazide katıldığından personel tecrübesi önem arz eder ve kalite kontrol zorlaşır. Yaş sistemde karışımın tamamlanmış olması iletim mesafesini kısaltır. Yaş sistemin kapasitesi daha fazla olduğundan büyük işlerde tercih edilir.

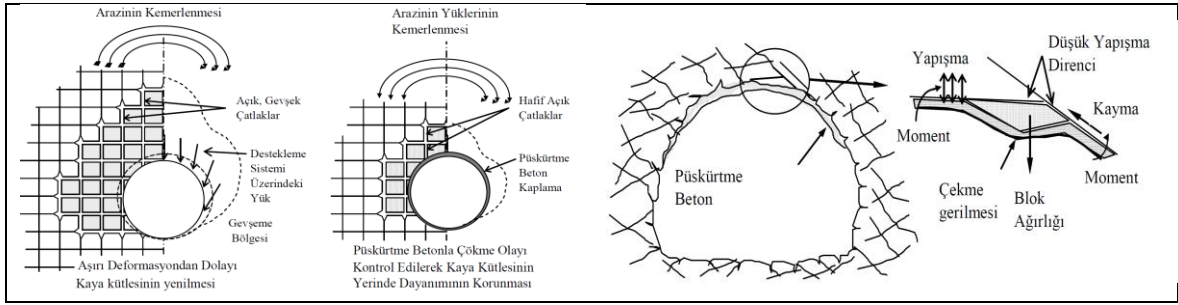
1.4.8.3. Tünel Kaplamalarında Püskürtme Betonunun İşlevsel Özellikleri

Kazısı yapılan kesimin hava ve su ile temasını keserek bozulmaların önüne geçer. Püskürtme betonu kırık ve çatlakların arasını doldurarak buradaki gerilme yoğunluğunu azaltarak kayacın buradaki kayma dayanımını artırır. Erken dayanım göstererek kemerleşme oluşturur, tabaka gibi çalışarak taşıyıcılık sağlayarak tünelin kendi kendini taşımasına yardımcı olur. Şekil 38’de püskürtme betonunun işlevsel özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 38. Püskürtme betonunun işlevsel özellikleri (Mahar 1975, Cecil 1970).

Şekil 38'in devamı



1.4.8.4. Püskürtme Betonun Uygulama Avantajları ve Dezavantajları

Püskürtme beton imalatlarında kalıp gerektirmemesi, uygulama hızının yüksek oluşu, işçilik miktarının az oluşu uygulama aşamasında kolaylık sağlamaktadır. Beton dökümü sırasında gerekli olan özel ekipman ve geri sıçrama uygulamada karşılaşılan dezavantajlardır. Püskürtme betonu imalatlarında nitelikli personel, beton dizaynı ve agrega çok önemlidir.

2. YAPILAN ÇALIŞMALAR VE BULGULAR

Dünyada ve Türkiye de iyi, orta ve zayıf dereceli zeminlerde yeni bir teknoloji olmasına karşın püskürtme betonu içerisinde sentetik lifli fiber donatıkullanımı hızla yaygınlaşmaktadır.

Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü sınırları içerisinde yapımı devam etmekte olan; Giresun Ayr.-Dereli -Şebinkarahisar-Suşehri Ayr. Yolu (Eğribel Tüneli İle Bağlantı Yolları Dahil) Km: 70+000-77+682 Kesiminin Yapımı İşinde; hasır çelik imalatı yerine sentetik fiber donatı kullanımı uygulanmıştır.

Q destek ihtiyacı tablosuna göre NATM kazı ve destek sınıfları için yeterli olacak enerji emme kapasitesine sahip sentetik lifli fiber donatı dozajı 3.5kg/m^3 olarak belirlenmiştir. Dozajın belirlenmesinde kullanılan sentetik fiber donatı, agrega, çimento, beton dizaynı, proje parametreleri gibibirçok etken olduğundan bu dozaj miktarı başka projelerde farklılık gösterebilir.

Yapım sırasında araziden alınan numunelere EFNARC plaka testine göre yükleme yapılarak deformasyona bağlı enerji depolama yeteneği KGM 10. Bölge Müdürlüğü ve çeşitli üniversitelerde belirlenmektedir.28 günlük numuneler üzerinde yapılan testlerde KTŞ (Karayolu Teknik Şartnamesi) de belirtilen enerji depolama kapasiteleri dikkate alınmıştır.

2.1. İnceleme Alanının Tanıtılması

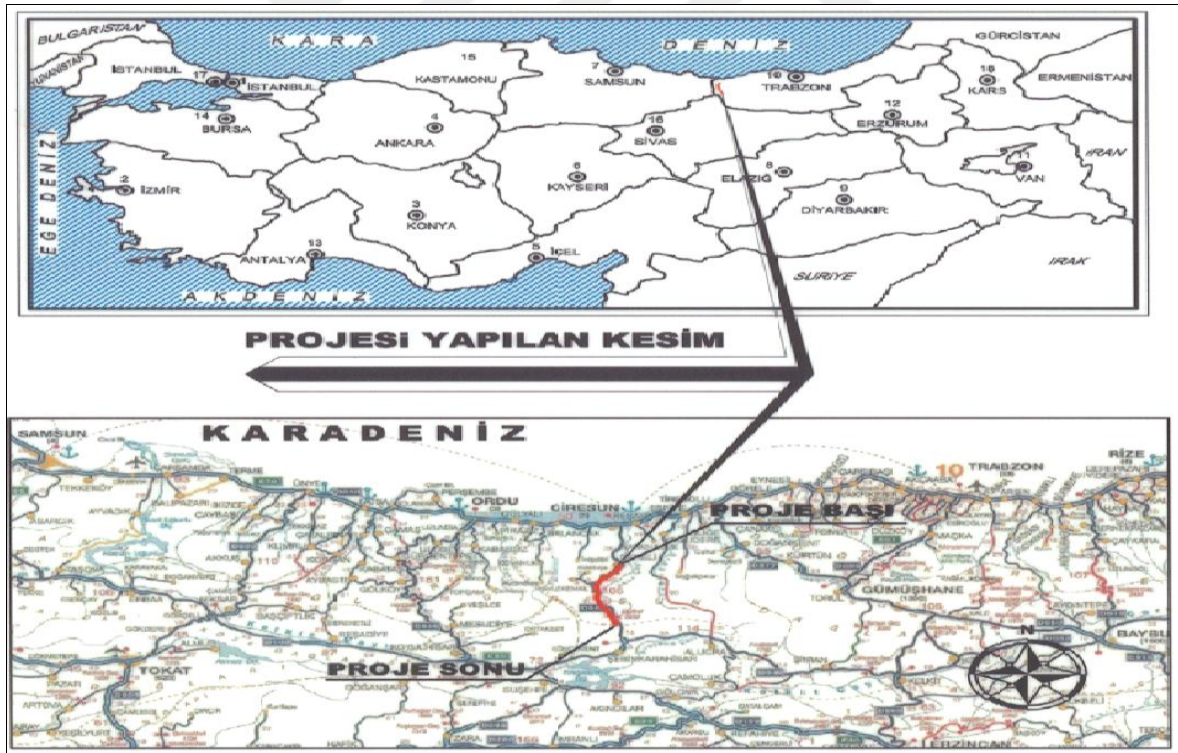
Yapılan çalışma alanı Eğribel Tüneli İnşaatı ve şantiye alanını kapsamaktadır.

2.1.1. İnceleme Alanının Coğrafi Konumu

Yapımı tamamlandığında Türkiyenin uzun tünelleri arasında Eğribel Tüneli yerini alacaktır. Eğribel Tünelinin proje güzergahı Şekil 39'da gösterilmiştir. Karadeniz Bölgesini Orta Anadoluya bağlayan bir yol olup 1. Sınıf Devlet Yoludur. Şekil 40'da Eğribel Tüneli güzergahı gösterilmiştir.

Tüneller Giresun'dan Şebinkarahisar tarafına gidiş(sağ tüp) Şebinkarahisar'dan Giresun'a gidiş(sol tüp) olmak üzere iki tüpten oluşmaktadır. Kış mevsiminin başlamasıyla birlikte yörenin yoğun kar yağışı alan bir yer olması da göz önünde bulundurulduğunda bahar aylarına kadar ulaşımda bakım ekiplerinin kesintisiz kar mücadelesine rağmen zaman zaman güçlükler yaşanmaktadır.

Eğribel Geçitinde 2200 olan rakım Eğribel Tünelinin tamamlanmasıyla birlikte rakım tünel girişinde 1860'a tünel çıkışında 1720'ye kadar düşürülmüş olacak ve söz konusu güzergahta ulaşım yılın tamamında kesintisiz olarak sağlanabilecektir. Eğribel Tünelinin yapım çalışmalarının tamamlanmasıyla Şekil 41'de gösterildiği gibi güzergah 6.5 Km kısılacak ve Giresun'u İç Anadolu Bölgesine bağlayacak olan bu yolda konforlu ve güvenli bir ulaşım imkanı elde edilecektir. Şekil 42'de gösterilen karlar altındaki coğrafi konumda Şekil 43'de gösterilen karla mücadele, Şekil 44'deki karla kapanmış yol ve Şekil 45'de gösterilen karla kaplı yolda zorlu ulaşım şartları giderilmiş olacak.



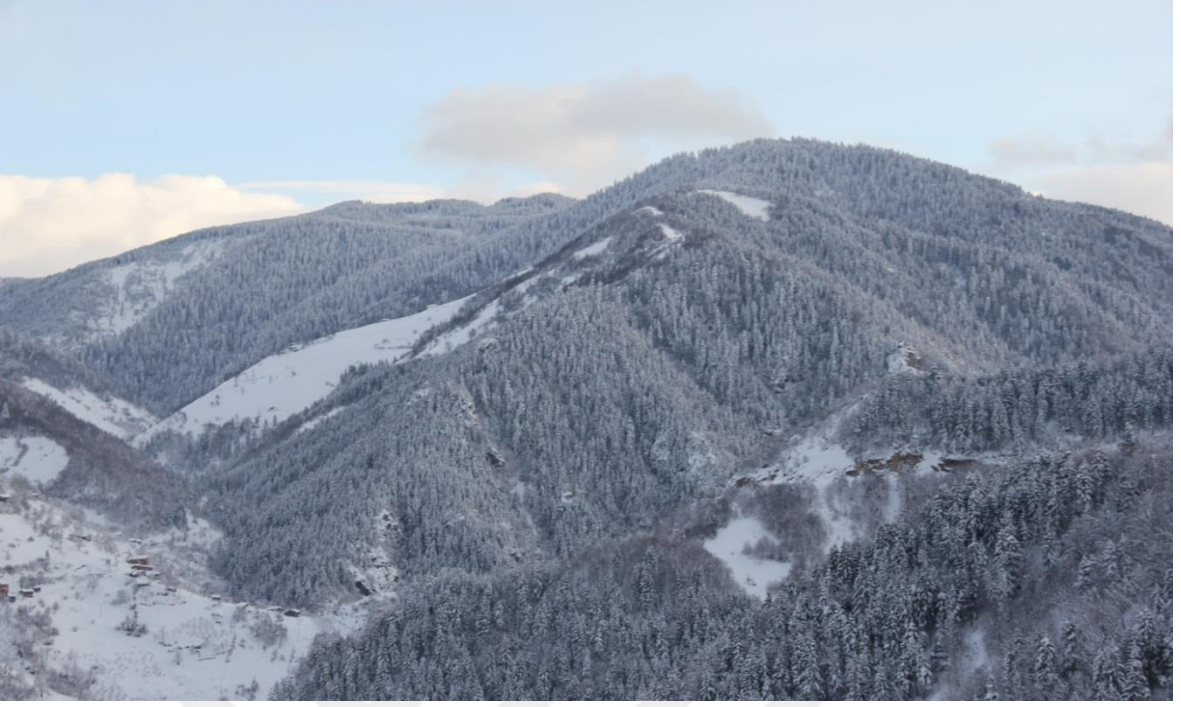
Şekil 39. Eğribel tünelinin konumu



Şekil 40.Eğribel tüneli güzergahı



Şekil 41. Eğribel tünelinin yolu ne kadar kısalttığının gösterimi



Şekil 42. Karlar altındaki coğrafi konum



Şekil 43. Karla mücadele



Şekil 44. Karla kapanmış yol



Şekil 45. Karla kaplı yolda zorlu ulaşım şartları

2.1.2. İnceleme Alanının Jeolojik Yapısı

Bu bölümde Eğribel Tünelinin jeolojik ve jeoteknik özellikleri incelenecektir. Eğribel Tüneli güzergah boyunca Paleosen-Eosen yaşlı Grantoyidler içerisinde geçmektedir. Eğribel tüneli yaklaşık 5900 metre uzunluğunda geliş ve gidiş platformu olmak üzere çift tip olarak açılacaktır. Granidiorit, granit, diyorit bileşimindeki kayalar arazi düzeyinde grimsi pembemsi sarımsı renklerde olup, orta iri daneli bir yapıya sahiptir.

Eğribel mevkiinde DB uzanımlı yükselti aynı zamanda iklimsel koşullar ve bitki örtüsü bakımından tipik doğu karadeniz jeomorfolojisini gösterirken, güney tarafı (Şebinkarahisar yöresi) daha çok iç Anadolu bölgesinin geçiş özelliklerini göstermektedir.

Çalışma alanının kuzey kesimlerinde yezeyleyen birim, volkanik ve volkano-sedimanter kayalardan olmaktadır. Eğribel civarında doğu- batı doğrultulu bir hat boyunca tüf, tüfit, volkanik breş/aglomera türü volkano-sedimanter kayalar ile bazalt-andezit türü volkanik kayalardan oluşan litolojiye sahip olan Eğribel volkaniti mostra düzeyinde grimsi-siyahımsı bir görünüm sunar. Piroklastikler içerisinde ara seviyeler halinde bazik lav akıntıları siyah görünümleri ile aynıdır. Bazaltlar, siyah renkli ve porfirik dokulu olup, siyahımsı renkli ve porfirik dokulu olup, siyahımsı renkli ve ince taneli bir hamur içerisinde, iriplajiyoklaz fenokristalleri dağınık halde gözlenmektedir. Piroklastik kayalar ise daha çok tabakalı görünümde, mm boyutundan cm, hatta dm boyutuna kadar değişkenlik gösteren çalık ve bloklardan oluşmaktadır. Volkanik kayaç parçası çakıl ve bloklar az yuvarlak-köşeli özelliklerdedir. Bu kayalar içerisinde çok az silisleşme ve hematitleşme göze çarpmaktadır.

Eğribel volkaniti arazide Üst Kretase yaşlı konuklu formasyonu üzerine uyumsuz olarak gelmekte ve miyosen yaşlı Tamzara formasyonu tarafından uyumsuz olarak üzerlenmektedir. Eğribel volkanitinin yaşı, arazideki konumu ve önceki çalışmalara göre Eosen olarak kabul edilmiştir. Taze kayaç örneklerinde son derece temiz yüzeyler gösteren bu volkanitler arazide yüksek sert engebeli bir yapı oluşturmaktadırlar.

2.2. Sentetik Lifli Fiber Donatı

Son günlerde Tünellerde hasır çelik imalı yerine sentetik lifli fiber donatı imalatı her geçen gün yaygınlaşmaktadır. Eğribel Tüneli projesinde de sentetik lifli fiber donatı kullanılmıştır. Sentetik lifli fiber donatı; püskürtme beton, tünel nihai kaplama betonu,

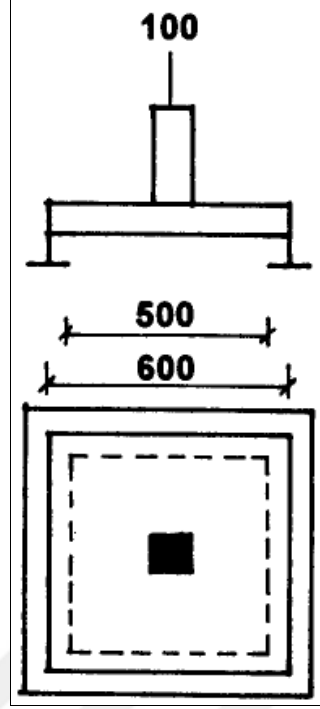
madenler, endüstriyel zemin ve saha betonları, deniz yapıları, prekast betonlar uygulamalarında kullanılabilir. Dünyada ve Türkiye de bir çok kullanım örnekleri vardır. Bunlar: Hindhead Yol Tüneli (UK), Ontigola Hızlı Tren Tüneli Madrid (İspanya), Santioga Subway 5. Hat Genişletme Projesi (Maipu Tünelleri), San Pedro Hes & Anco Barajı İletim Tünelleri ve Şev Shotcrete Güçlendirmesi (Şili), Vadheim Yol Tüneli (Norveç), Halsnoy Deniz Altı Yol Tüneli (Norveç), Oliola Su Tüneli (İspanya), Malaga Havalanı Metro TBM Tüneli (İspanya), Helsinki Metro İnşaatı (Finlandiya), Tomei Meishin Ekspres Yolu (Japonya), Ovit Tüneli (Türkiye), Ilgaz Tüneli (Türkiye), Salmankaş Tüneli (Türkiye), Eğribel Tüneli (Türkiye).

Kullanılacak olan sentetik lifli fiber miktarı kullanılacak projesinde tanımlanan enerji yutma kapasitesi karşılayacak miktarda olmalıdır. Bu projede 3,5kg/m³ sentetik lifli fiber donatı kullanılarak püskürtme betonunda oluşan kesit tesirlerini hasır çelik olmadan karşılanmıştır.

2.3. Tokluk İndeksi Sınıfının Belirlenmesi

2013 Karayolları Teknik Şartnamesinde tokluğun tanımı lifli betonun çekme gerilmeleri sonucu çatladıktan sonra da yük taşımaya devam etme yeteneğidir olarak belirtilmiştir. Lifli betonun tokluk değeri kirişin eğilmede-çekme testi ile yada plaka testi sonu betonun enerji depolama kapasitesi ile belirlenir. Bu çalışmada plaka testi ile enerji depolama kapasitesinin belirlenmesi incelenecektir. Çalışmalar boyunca KTŞ 2013 belirtilen esaslara dikkat edilmiş ve alınan numuneler Karayolları 10. Bölge Müdürlüğünde teste tabi tutulmuştur.

Lifli püskürtme betonun enerji depolama kapasiteleri en az 3 adet 600x600x100 mm'lik plakaların 28 günlük numuneler üzerinden Şekil 46. da gösterilen plaka test düzeni ile yapılır. Teste tabi olacak olan numuneler kırım öncesinde 3 gün boyunca su içinde tutulmuş olacaktır. Plaka orta noktasından yük uygulanırken plaka doldurma yüzeyi alta gelecek şekilde yerleştirilmelidir. Yük uygulanırken deformasyon hızı 1,5 mm/dk olacak şekilde deformasyon kontrollü yükleme yapılacaktır. Orta nokta deformasyonu 25 mm'ye ulaşınca kadar yükleme sürecek ve yük-deformasyon eğrisi oluşacaktır. Bu eğrinin altında kalan alan bizlere depolanan enerjiyi verecektir.



Şekil 46.Plaka test düzeni (KTŞ, 2013).

Yapılan testlerden elde edilen bu üç numunenin ortalaması sınıf değerine eşit yada büyük olacaktır. KTŞ enerji depolama kapasitesi Tablo 17’de gösterilmiştir.

European Specification for Sprayed Concrete (EFNARC).

Tablo 17.Enerji depolama kapasitesi

Tokluk Sınıfı	25 mm’lik Deplasmanda Enerji depolama kapasitesi(joule)
a	500
b	700
c	100

2.4. Sentetik Lifli Fiber Donatı Kullanımının Avantajları

Yapım aşamasında daha az işçilik sağladığından hızlı imalat imkanı sağlar. Korozyona uğramadığından uzun süre durabilite sağlar. Tüneller için önemli olan yangın dayanımını uzun süreli yangın halinde betonun içinde eriyerek boşluk alanı oluşturur ve buhar basıncından kaynaklanan beton patlamalarını önler. Betonun çatlamasını önleyerek

sünek bir yapı oluşturur. Zarar görmeden stok edilmesi kolaydır. İş güvenliği de tercih sebeplerinden biridir. Tünel uygulamalarında dökülmeleri minimuma indirir.

Sentetik lifli fiber donatının önemli teknik avantajları vardır. Sentetik lifli fiber malzemesinin uzunluğu ve fazla sayısı sebebiyle çatlak direnci fazladır. Rötne çatlaklarını ve mikro çatlakları engeller. Yüksek enerji yutma kapasitesine sahiptir. Fiber malzemenin uzunluğu kadar çatlak genişliğinde çalışarak yük transferini gerçekleştirir. Paslanmaz yapı, uzun ömürlü durabilite ve yangın dayanımını pozitif etkisi vardır. Uzun süreli yangın durumunda betonun içinde eriyerek boşluk oluşturmasıyla oluşan buhar basıncından dolayı betonun patlamasını önler. Betonun elastoplastik özellik kazanmasını sağlar. Betondan düşük elastisite modülü ile deformasyon anında betonun çatlaması önleyerek sünek bir yapı oluşturur.

2.5. Yapısal Tasarım

Proje firmasının sonlu elemanla analizi kullanarak EUROCODE 2, RILEM TC162-TDF standartlarıyla yapmış olduğu yapısal tasarım hesaplarında;

beton sınıfı: C20/25

hasır çelik: Q221/221

sentetik fiber: Barchip 54 özellikleri dikkate alınarak çözümler yapılmıştır.

Kullanılan sentetik lifli fiber donatının mühendislik özellikleri Tablo 18'de gösterilmiştir.

Tablo 18. Kullanılan sentetik lifli fiber donatının mühendislik özellikleri

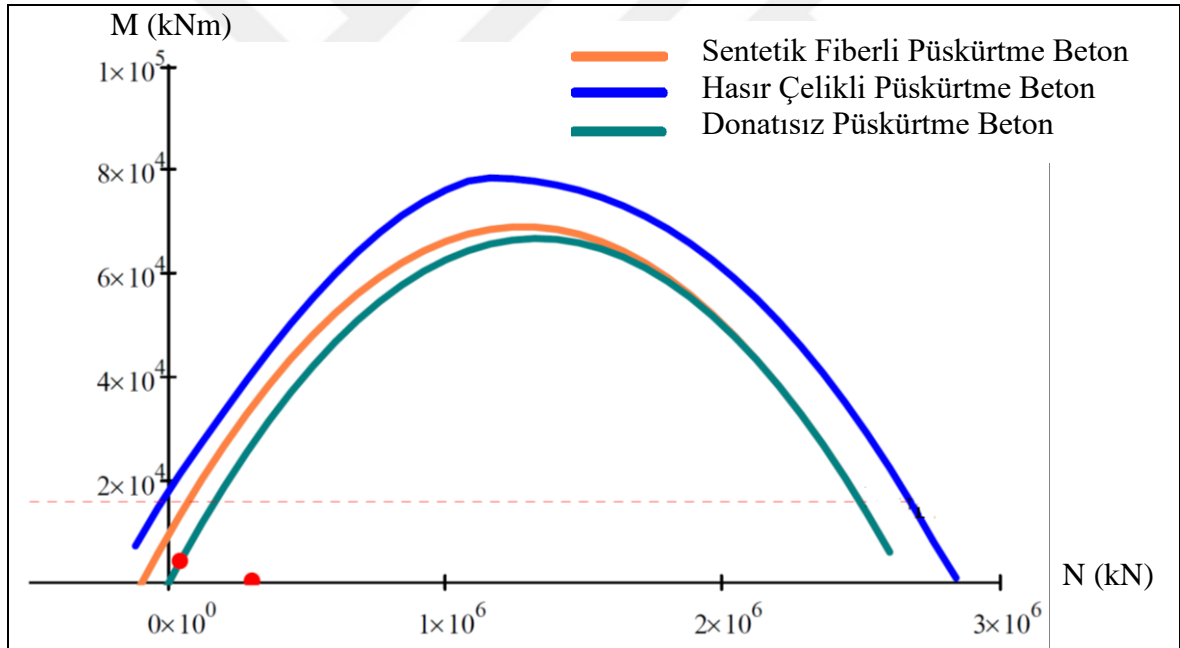
Karakteristik	Malzeme Özelliği
Hammadde	Modifiye Edilmiş Olefin
Uzunluk	54mm
Çekme Gerilmesi	580 Mpa
Yüzey Dokusu	Sürekli Kabartma
Fiber Sayısı / kg	37000
Yoğunluk	0.90-0.92 g/cm ³
Elastisite Modülü	12 Gpa
Ergime Noktası	150-165 C
Yanma Noktası	450 C

B1, B2, B3 zemin sınıflarında raporların kesit zorlamalarından elde edilen maksimum normal kuvvet (N_{max}) ve maksimum moment (M_{max}) statik yükleme durumu dikkate alınmış olup bu durumda kesitin şartları sağladığı görülmüştür.

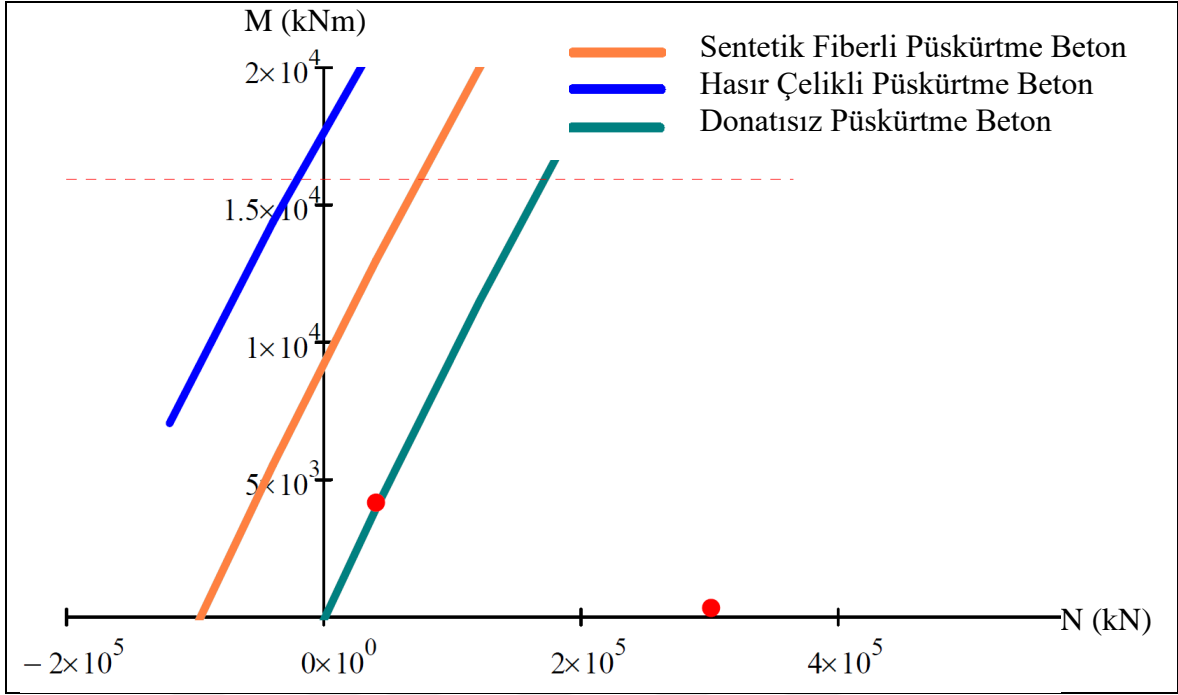
B3 zemin sınıfında 20cm püskürtme beton uygulayarak çift kat Q221x221 hasır çelik kullanılarak moment kapasitesi hesabı yapıldığında $M=16.011\text{kNm}$ elde edilmiştir.

Aynı zemin parametrelerine sahip zemin sınıfında çift kat hasır çelik yerine kullanılan 3.5 kg/m^3 sentetik fiber ile $M=9.06\text{ kNm}$ elde edilmiştir.

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları statik yükleme koşullarında N_{max} (kN) 300 iken M (kNm) 0.33 ve N (kN) 40 iken M_{max} (kNm) 4.16 bulunmuştur. Şekil 47’de statik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 48’de statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.

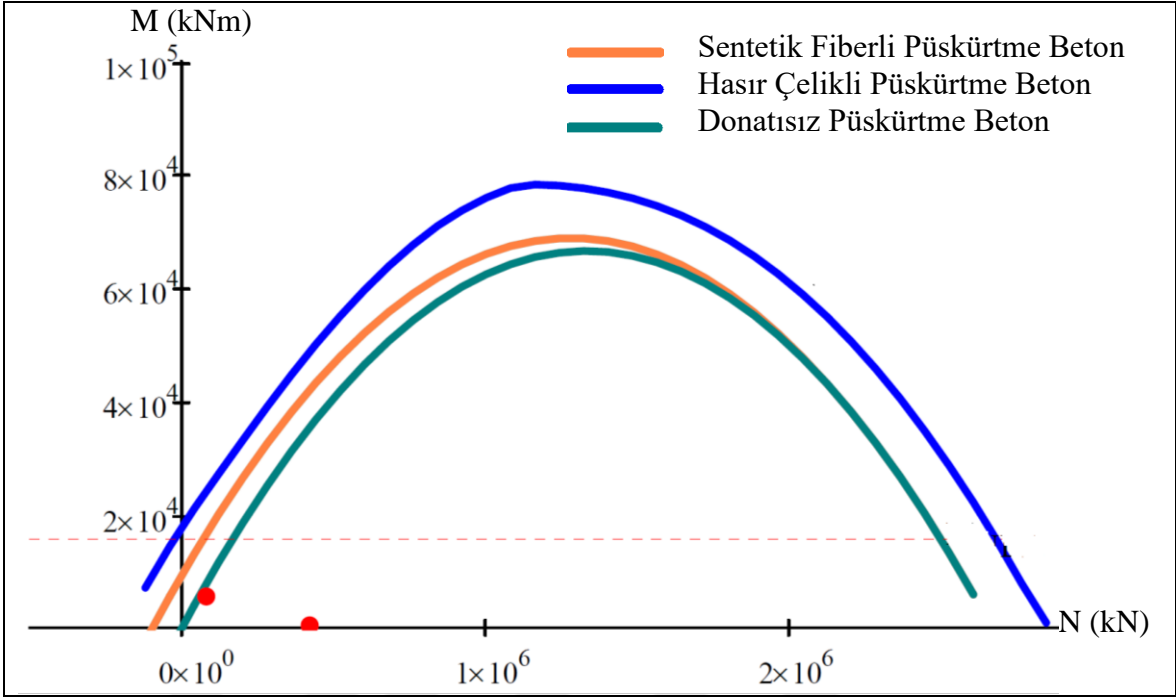


Şekil 47. 1. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı

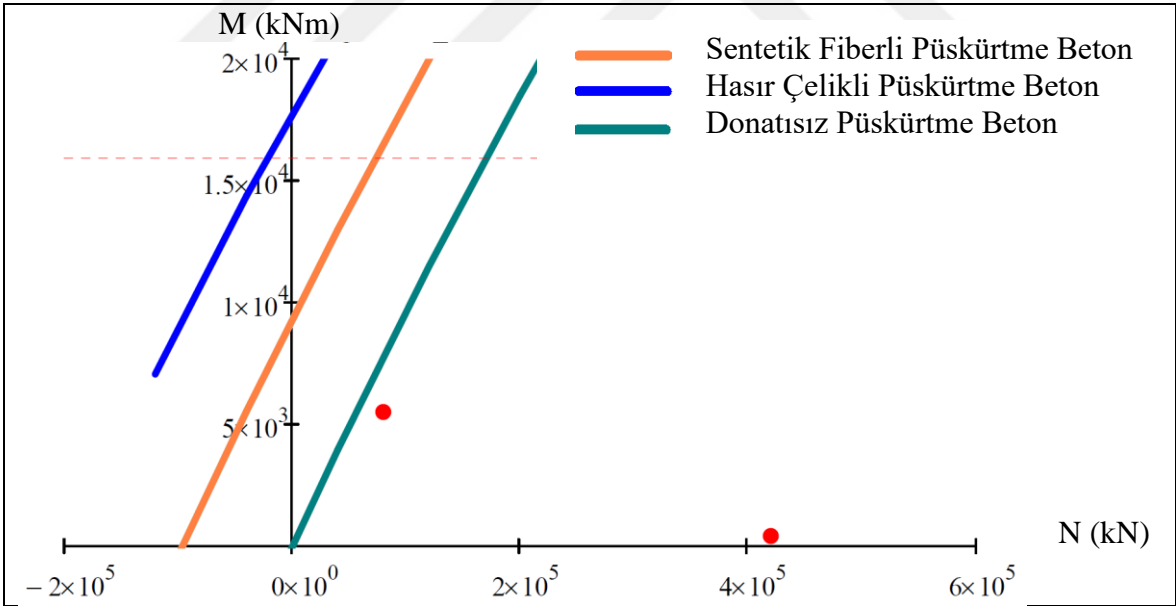


Şekil 48. 1. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları sismik yükleme koşullarında N_{max} (kN) 420 iken M (kNm) 0.41 ve N (kN) 80 iken M_{max} (kNm) 5.5 bulunmuştur. Şekil 49. de sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 50. de sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.



Şekil 49. 1. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı

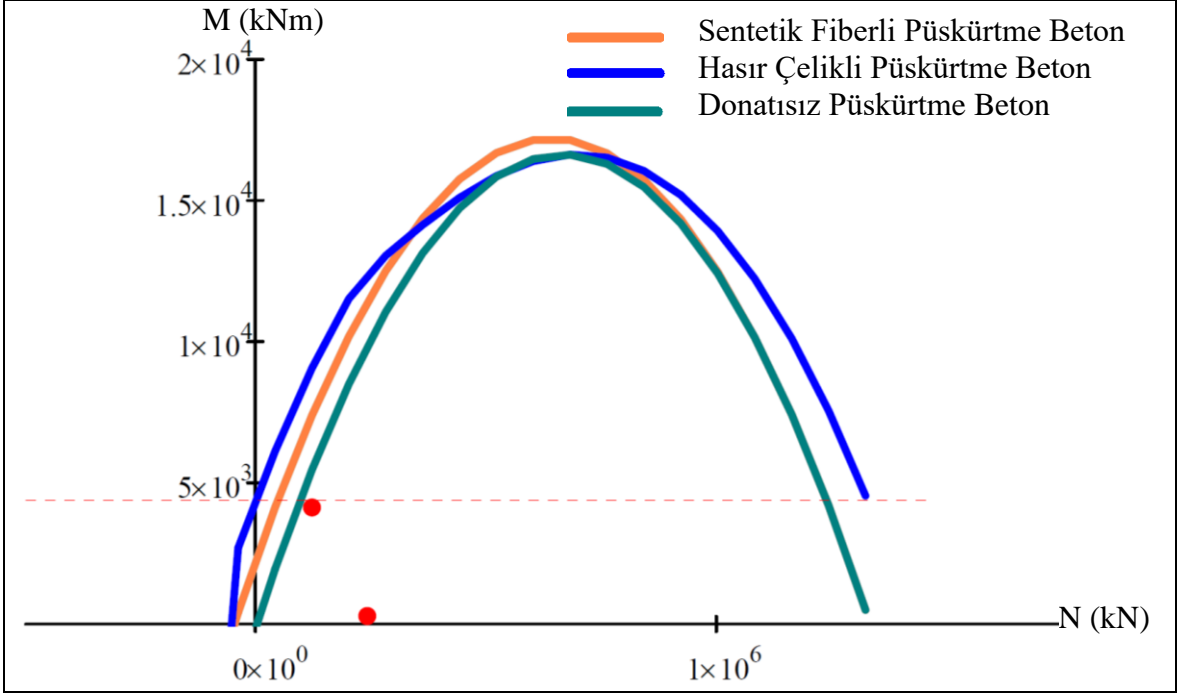


Şekil 50. 1. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

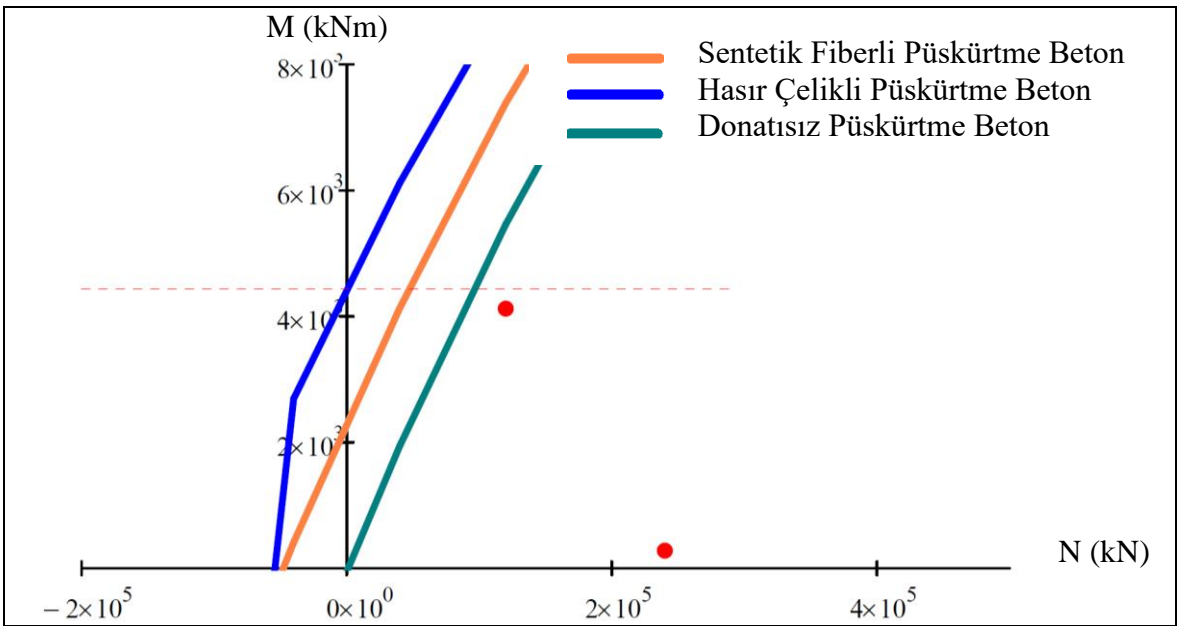
B1 zemin sınıfında 10cm püskürtme beton uygulayarak tek kat Q221x221 hasır çelik kullanılarak moment kapasitesi hesabı yapıldığında $M=4.463\text{kNm}$ elde edilmiştir.

Aynı zemin parametrelerine sahip zemin sınıfında tek kat hasır çelik yerine kullanılan 3.5 kg/m^3 sentetik fiber ile $M=2.265\text{ kNm}$ elde edilmiştir.

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları statik yükleme koşullarında N_{max} (kN) 240 iken M (kNm) 0.277 ve N (kN) 120 iken M_{max} (kNm) 4.12 bulunmuştur. Şekil 51’de statik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 52’de statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.

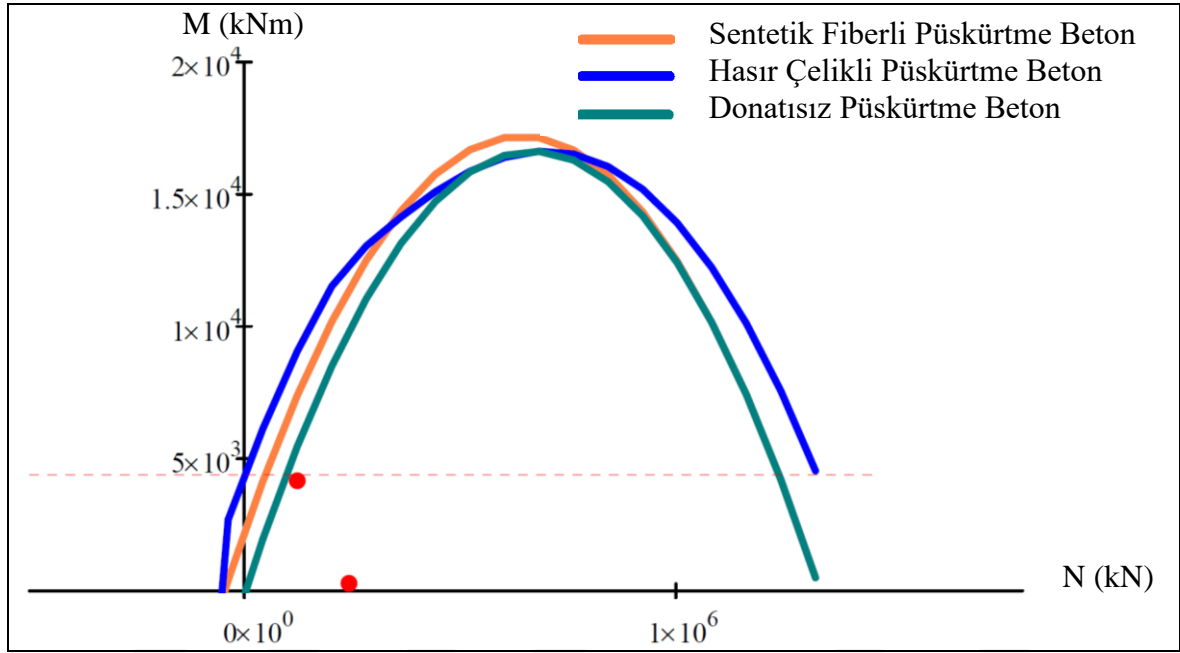


Şekil 51. 2. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı

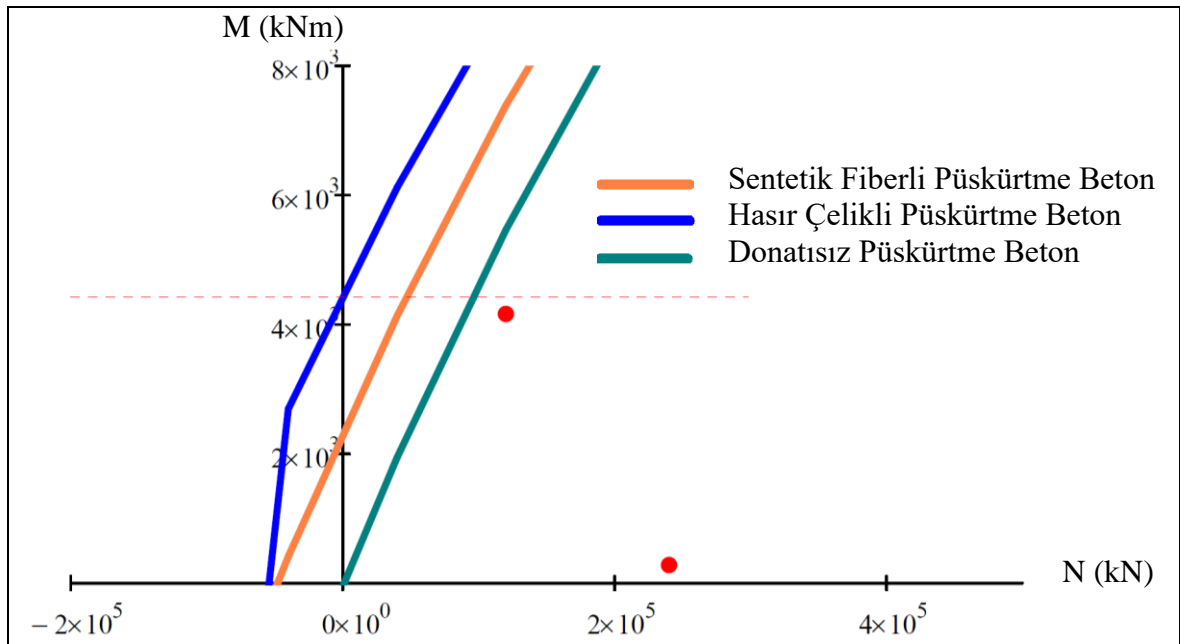


Şekil 52. 2. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları sismik yükleme koşullarında N_{max} (kN) 240 iken M (kNm) 0.277 ve N (kN) 120 iken M_{max} (kNm) 4.16 bulunmuştur. Şekil 53'de sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 54'de sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.



Şekil 53. 2. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı

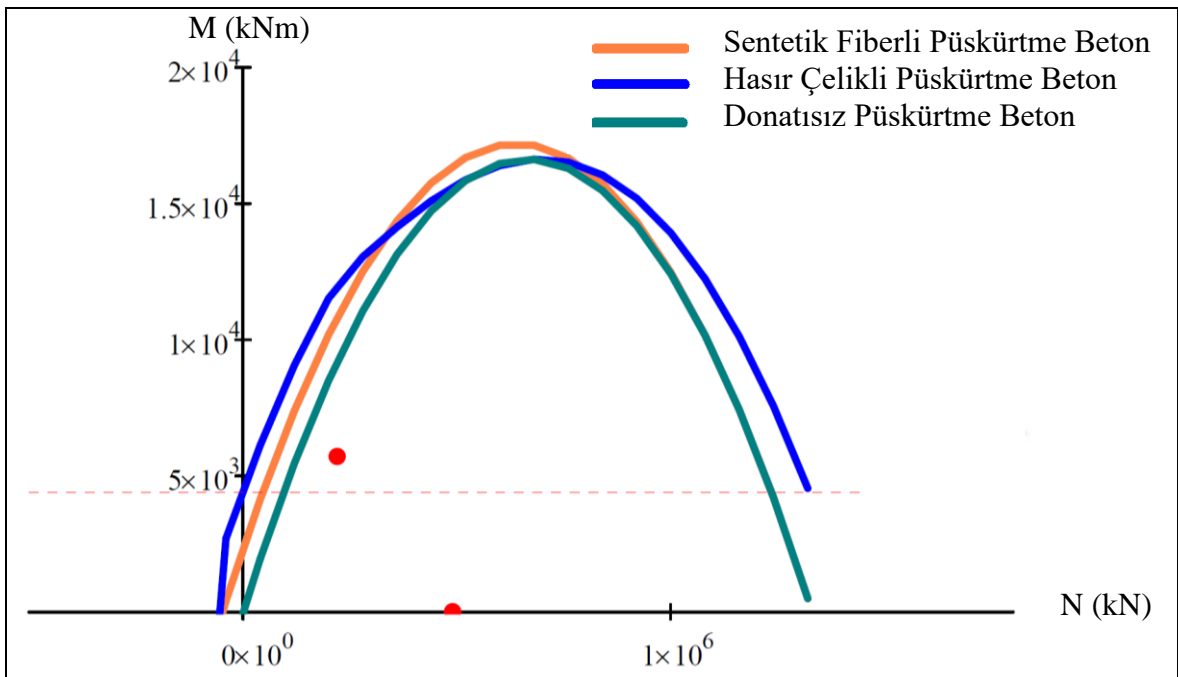


Şekil 54. 2. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

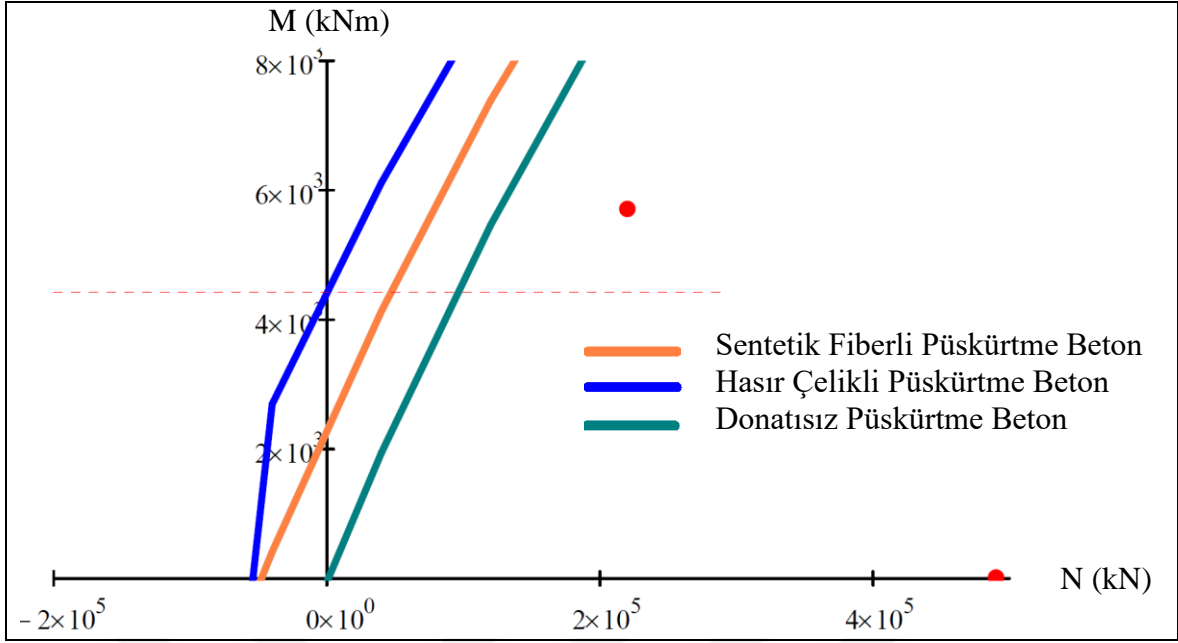
B1 zemin sınıfında 10cm püskürtme beton uygulayarak tek kat Q221x221 hasır çelik kullanılarak moment kapasitesi hesabı yapıldığında $M=4.463\text{kNm}$ elde edilmiştir.

Aynı zemin parametrelerine sahip zemin sınıfında tek kat hasır çelik yerine kullanılan 3.5 kg/m^3 sentetik fiber ile $M=2.265\text{kNm}$ elde edilmiştir.

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları statik yükleme koşullarında N_{max} (kN) 490 iken M (kNm) 0.0104 ve N (kN) 220 iken M_{max} (kNm) 5.71 bulunmuştur. Şekil 55'de statik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 56'da statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.

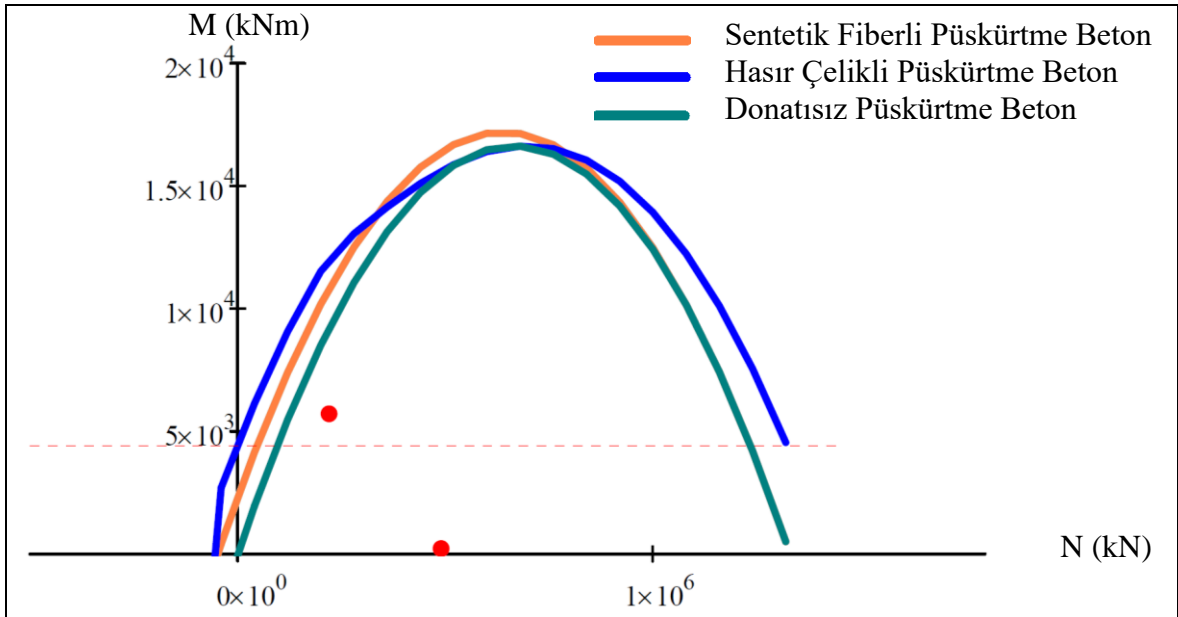


Şekil 55. 3. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı

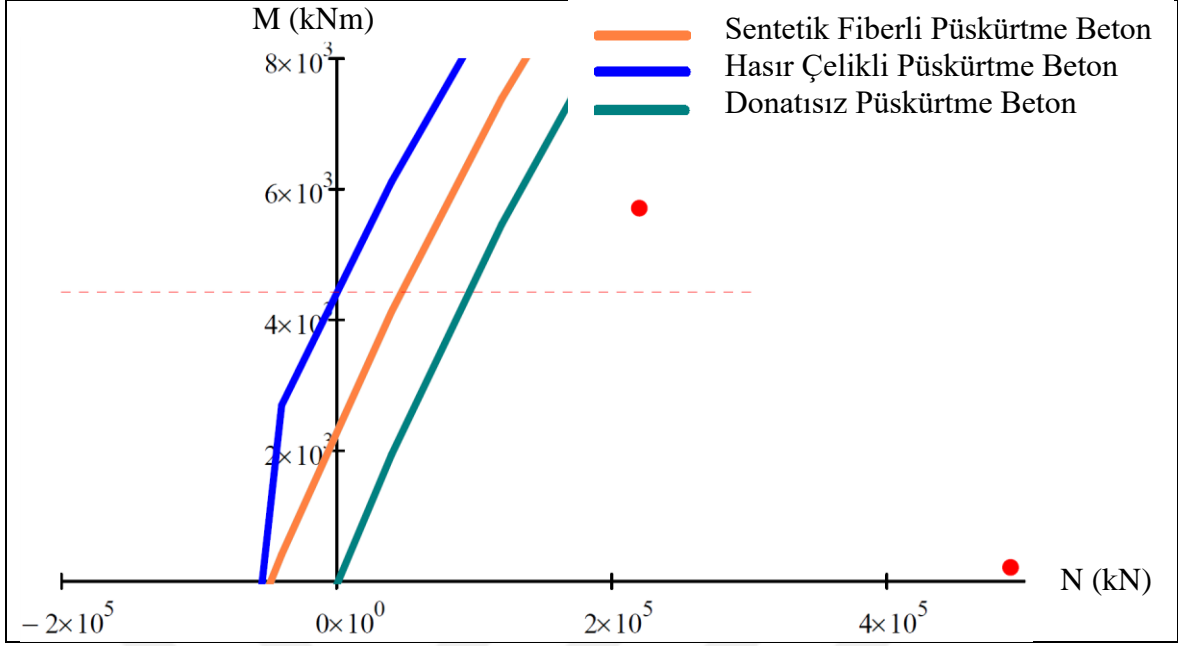


Şekil 56. 3. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları sismik yükleme koşullarında $N_{max}(kN)$ 490 iken $M(kNm)$ 0.212 ve $N(kN)$ 220 iken $M_{max}(kNm)$ 5.71 bulunmuştur. Şekil 57'de sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 58'de sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.



Şekil 57. 3. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı



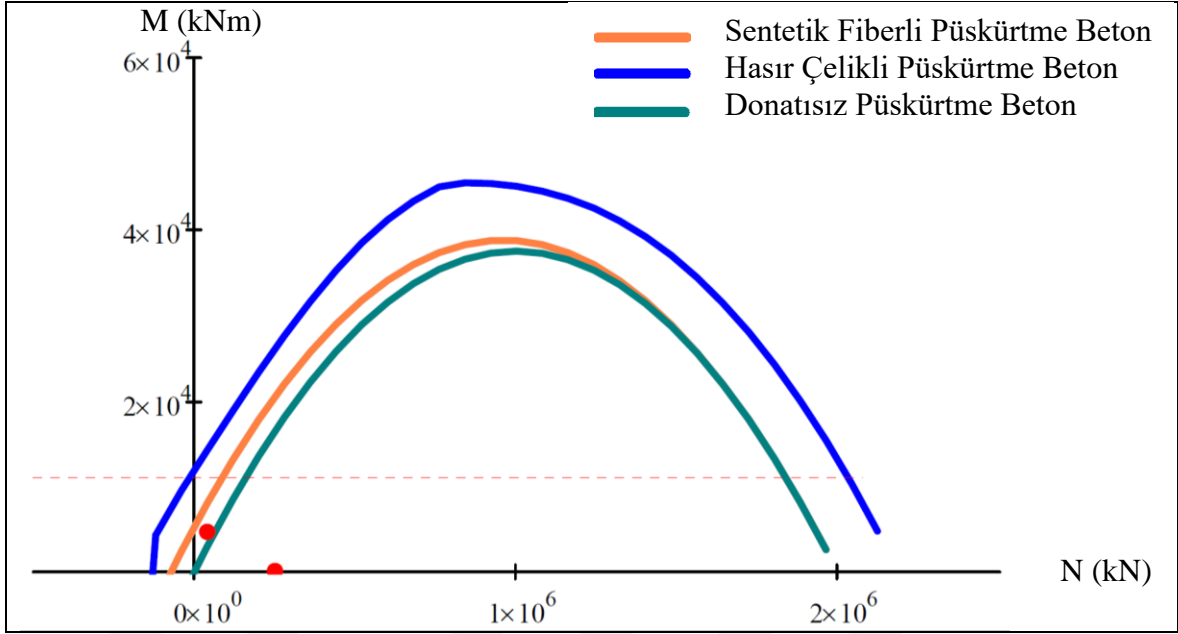
Şekil 58. 3. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

B2 zemin sınıfında 15cm püskürtme beton uygulayarak çift kat Q221x221 hasır çelik kullanılarak moment kapasitesi hesabı yapıldığında $M=11.2$ kNm elde edilmiştir.

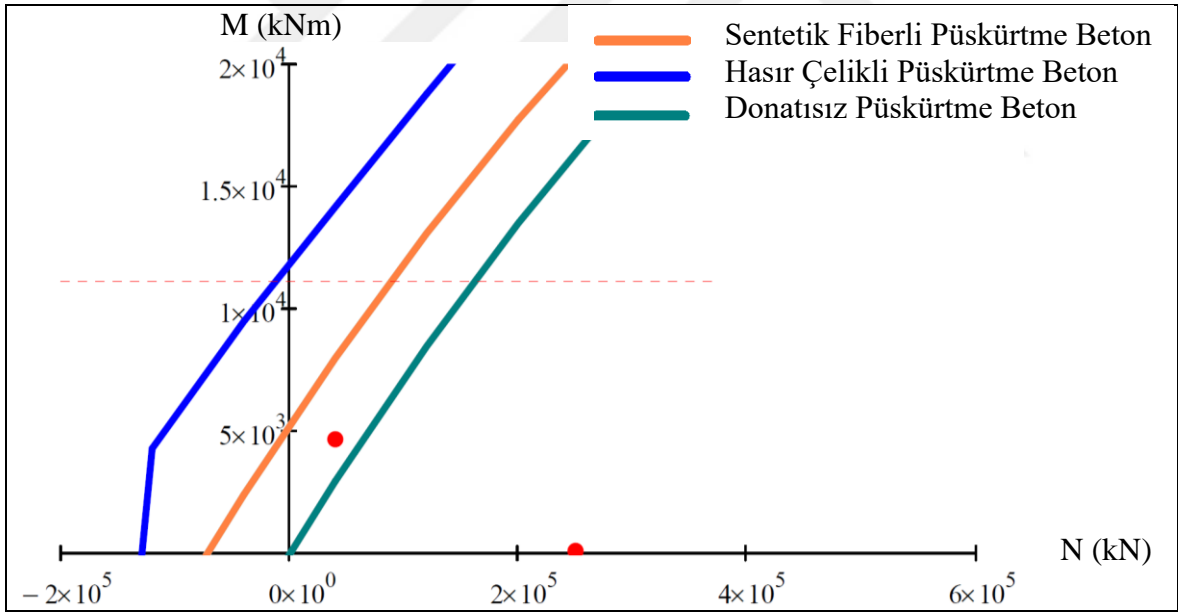
Aynı zemin parametrelerine sahip zemin sınıfında çift kat hasır çelik yerine kullanılan 3.5 kg/m³ sentetik fiber ile $M=5.096$ kNm elde edilmiştir.

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları statik yükleme koşullarında N_{max} (kN) 250 iken M (kNm) 0.0925 ve N (kN) 40 iken M_{max} (kNm) 4.65 bulunmuştur.

Şekil 59'de statik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 60'da statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.

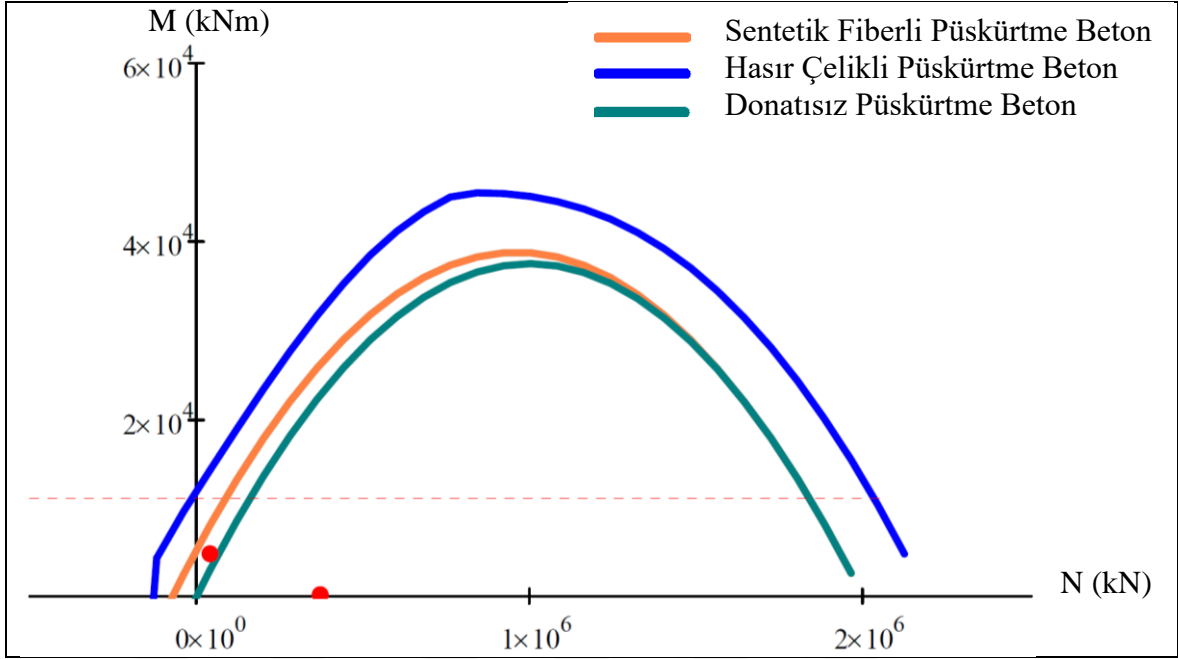


Şekil 59. 4. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı

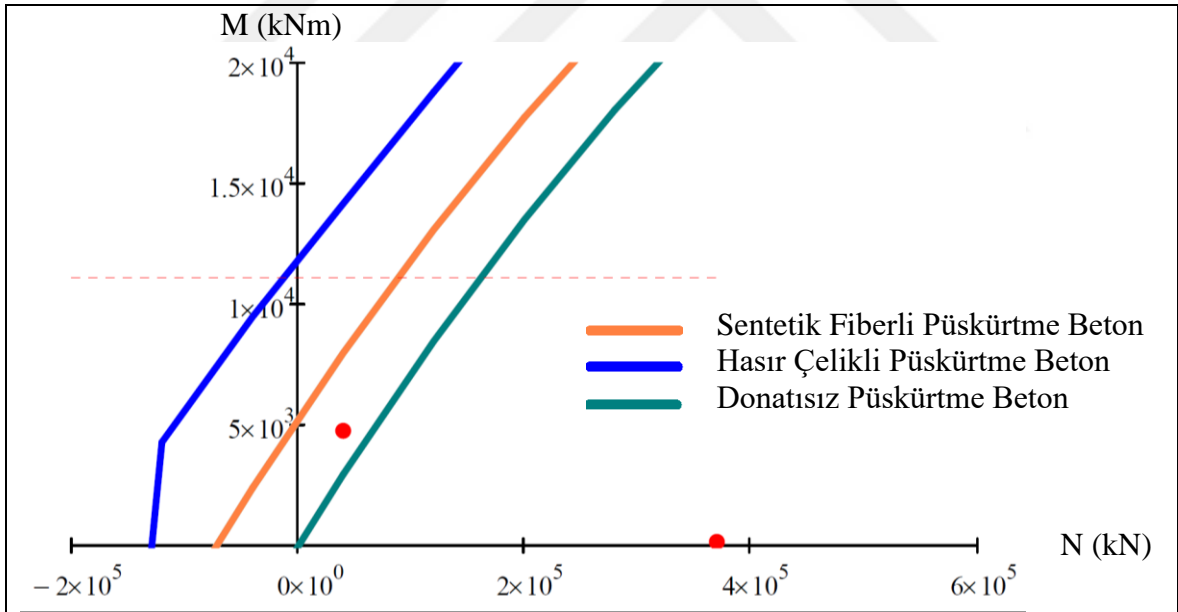


Şekil 60. 4. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları sismik yükleme koşullarında $N_{max}(kN)$ 370 iken $M(kNm)$ 0.145 ve $N(kN)$ 40 iken $M_{max}(kNm)$ 4.75 bulunmuştur. Şekil 61. de sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 62'de sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.



Şekil 61. 4. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı



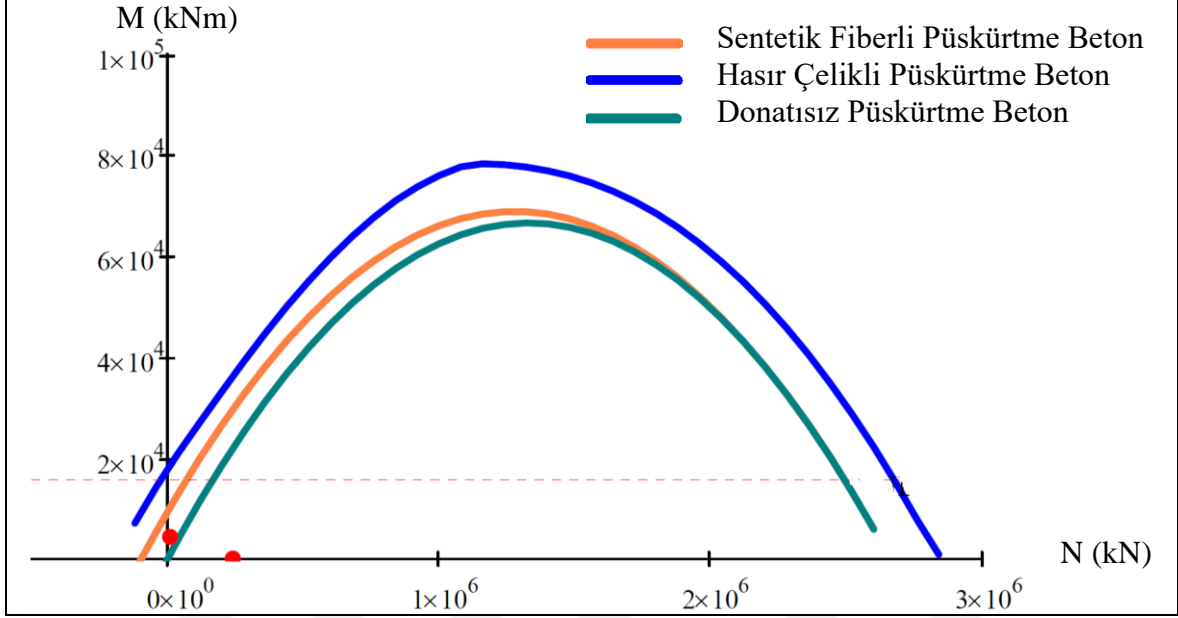
Şekil 62. 4. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

B3 zemin sınıfında 20cm püskürtme beton uygulayarak çift kat Q221x221 hasır çelik kullanılarak moment kapasitesi hesabı yapıldığında $M=16.011\text{kNm}$ elde edilmiştir.

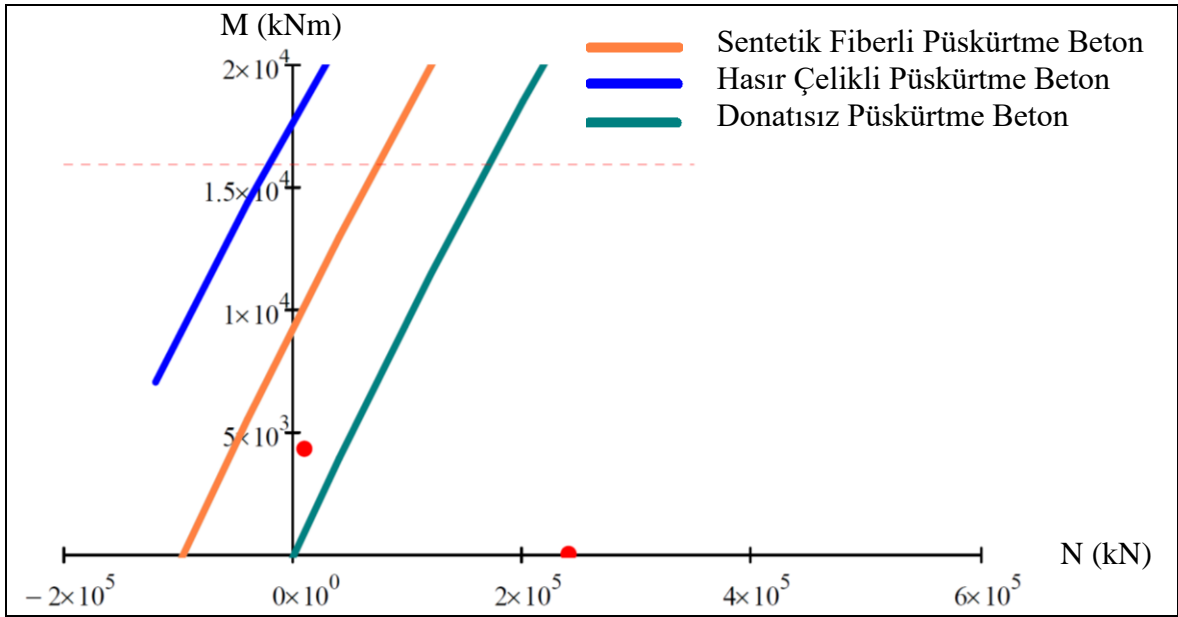
Aynı zemin parametrelerine sahip zemin sınıfında çift kat hasır çelik yerine kullanılan 3.5 kg/m^3 sentetik fiber ile $M=9.06\text{ kNm}$ elde edilmiştir.

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları statik yükleme koşullarında N_{max} (kN) 240 iken M (kNm) 0.0458 ve N (kN)9.7 iken M_{max} (kNm) 4.33 bulunmuştur.

Şekil 63'de statik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 64'de statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.

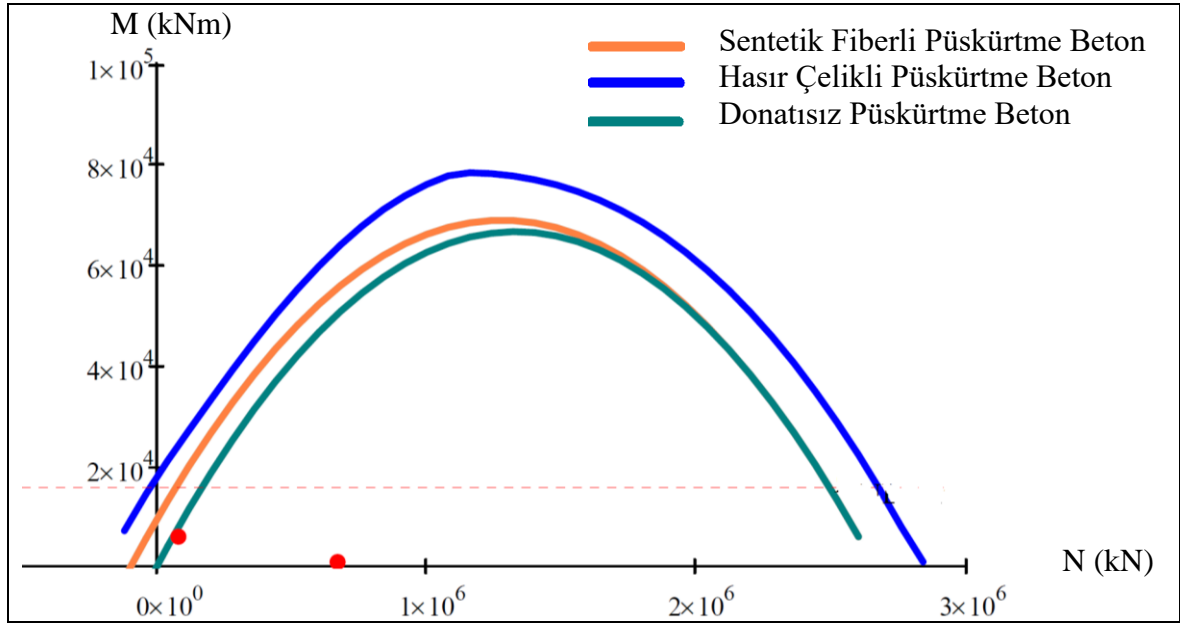


Şekil 63. 5. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı

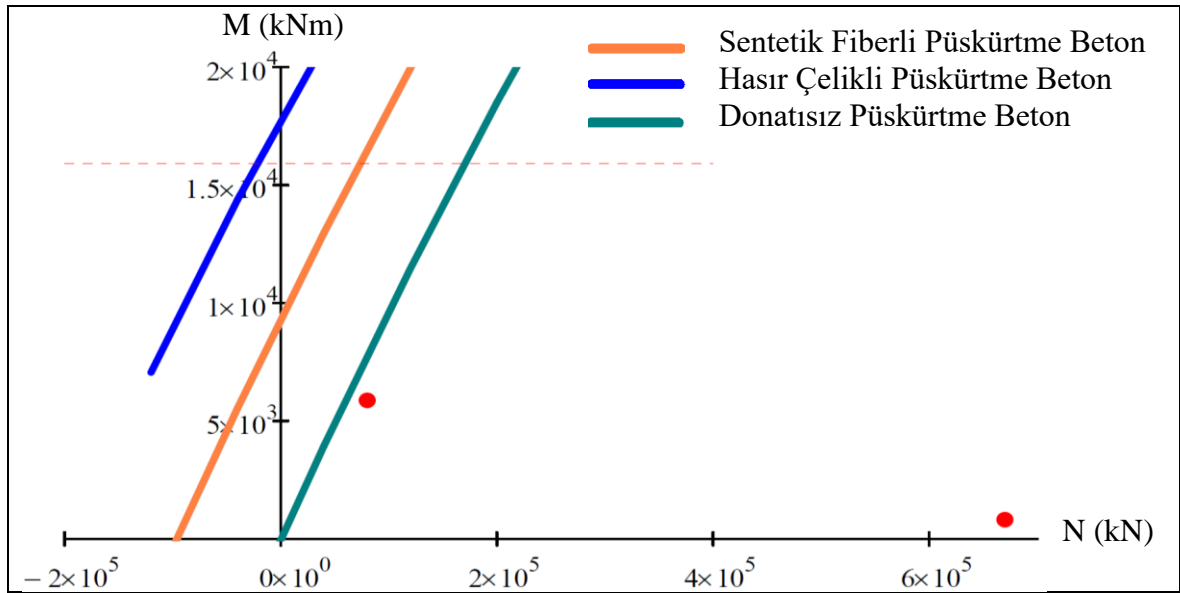


Şekil 64. 5. statik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

Yapılan analizlerde püskürtme betonun kesit zorlamaları sismik yükleme koşullarında $N_{max}(kN)$ 670 iken $M(kNm)$ 0.811 ve $N(kN)$ 80 iken $M_{max}(kNm)$ 5.87 bulunmuştur. Şekil 65’de sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı ve Şekil 66’da sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü gösterilmiştir.



Şekil 65. 5. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı



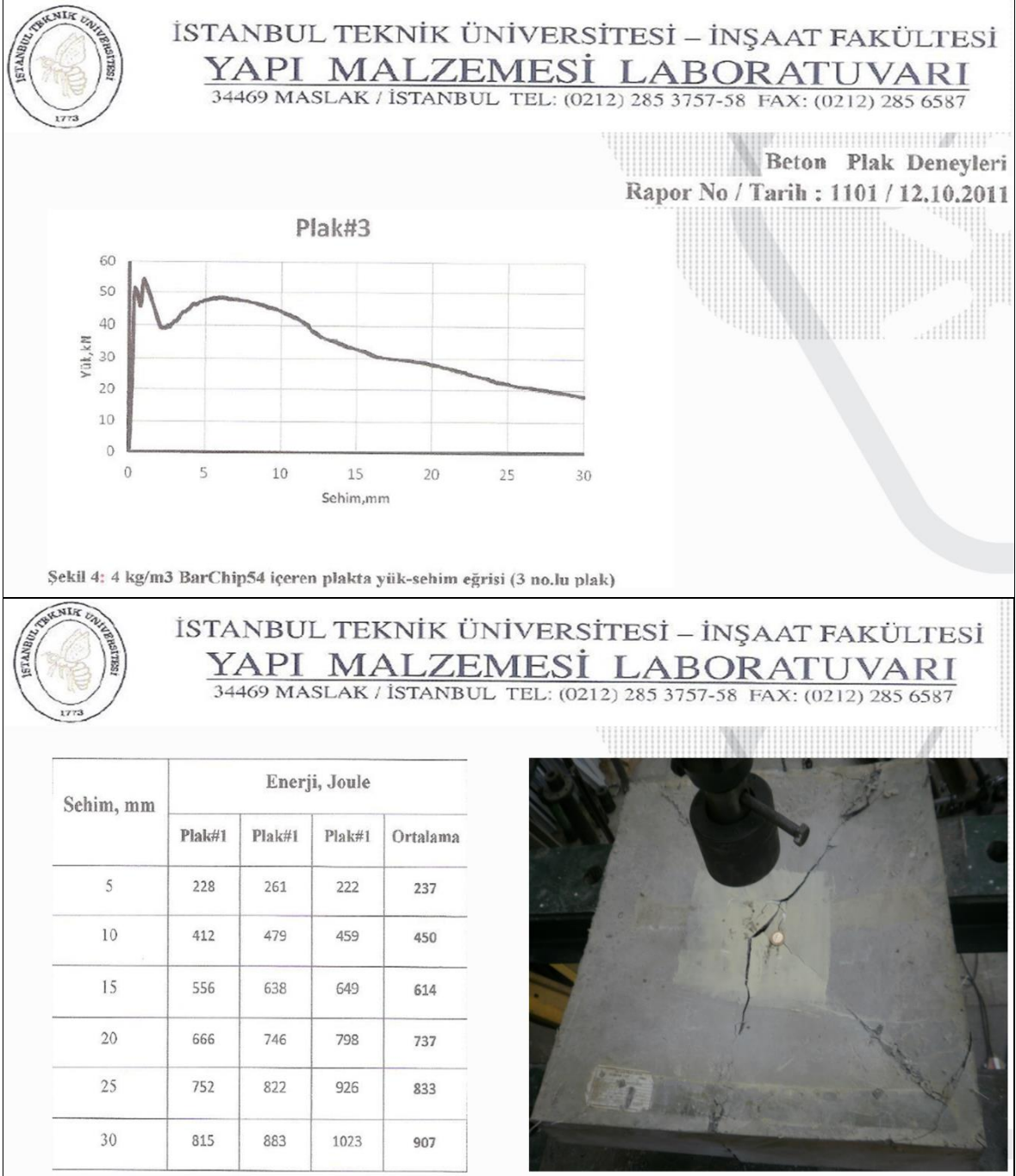
Şekil 66. 5. sismik yükleme koşullarında N-M diyagramı yakından görünümü

Normal kuvvet ve moment etkileşim graiklerinde de görüldüğü gibi farklı zemin gruplarında farklı statik ve sismik yükleme durumunda B1, B2, B3 sınıflarında hasır çelik yerine sentetik fiber kullanılarak normal kuvvet moment yükü kombinasyonlarını fiber takviyeli püskürtme betonla sağlanmıştır.

Kullanılan sentetik lifli püskürtme betonuna ait malzemenin farklı proje ve laboratuar sonuçları Şekil 68, 69 ve Şekil 70’de sunulmuştur. Şekil 68’de İstanbul Teknik Üniversitesi enerji-sehim sonuçları, Şekil 69’da İstanbul Teknik Üniversitesi tokluk sınıflarını gösteren rapor ve Şekil 70’de ise enerji yutma kapasitesini gösteren rapor gösterilmiştir.



Şekil 67. 40 mm ve 25 mm deplasman durumları



Şekil 68. İstanbul Teknik Üniversitesi enerji-sehim sonuçları ve numune örneği

	
İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ – İNŞAAT FAKÜLTESİ YAPI MALZEMESİ LABORATUVARI 34469 MASLAK / İSTANBUL TEL: (0212) 285 3757-58 FAX: (0212) 285 6587	
Tokluk Sınıfı	25 mm'lik sehime kadar Joule cinsinden yutulan enerji
a	500
b	700
c	1000

Sonuç: 25 mm sehime değerine kadar ölçülen enerjiler EFNARC tokluk sınıfları esas alınarak incelendiğinde, 833 Joule değerine ulaşan ortalama enerji yutma kapasitesi ile söz konusu numuneler **b-c tokluk sınıfları** arasına girmektedir.



Şekil 69. İstanbul Teknik Üniversitesi tokluk sınıfların gösteren raporu

itc Avda. de Elche, 164
T.L.F. 965 107 600
FAX 965 104 819
03008 ALICANTE
alicante@itc.es
INSTITUTO TÉCNICO DE LA CONSTRUCCIÓN S.A.

ACTA DE RESULTADOS DE ENSAYOS

REFERENCIA	COD. MUESTRA O ACTIVIDAD	CÓDIGO DEL ACTA	CÓDIGO TARIFA	FECHA DE REGISTRO
A-108731/HR	2016/2010	2758/2010	10310004	17/11/10

PETICIONARIO: (6364) UTE PAVASAL E.C., S.A. - NORTUNEL, S.A. (UTE AVE ASPE-EL CARRÚS)
AVDA. ALCALDE LORENZO CARBONELL, 59
03008. ALICANTE
CIF: ESU54477120

OBRA: 01000001- CONTRATO: 4 - PLATAFORMA DEL NUEVO ACCESO FERROVIARIO - ALTA VELOCIDAD DE LEVANTE. TRAMO: ASPE-EL CARRÚS - 03680 ASPE (Alicante)
MODALIDAD DE CONTROL DE CALIDAD: CO

ENSAYOS REALIZADOS: ENSAYOS DE HORMIGÓN PROYECTADO PARTE 5: DETERMINACIÓN DE LA CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA DE PROBETAS PLANAS REFORZADAS CON FIBRAS (UNE-EN 14488-5:2007)

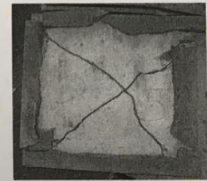
UTE PAVASAL E.C., S.A. - NORTUNEL, S.A. (UTE AVE ASPE-EL CARR AVDA. ALCALDE LORENZO CARBONELL, 59 03008 ALICANTE (Alicante)

MUESTREO: NORMA DE MUESTREO: --- MODALIDAD DE MUESTREO: ML, Muestreado por laboratorio
FECHA DE MUESTREO: 16/11/10 MUESTREADO POR: J.A. Vailló CANTIDAD: 3 Ud.
PROCEDENCIA: GUNITADO TÚNEL BOCA NORTE. AMASADA 5
IDENTIFICACIÓN DEL MATERIAL: HORMIGÓN PROYECTADO (M-74) (450 kg cemento 52.5 SR) 3.5 kg/m3 Fibra Barchip 54 Emico
DATOS COMPLEMENTARIOS DE LA MUESTRA: Central, H. Los Serranos (Sierra Negra), Albarán nº 92823

RESULTADOS DE ENSAYOS: Esquema mostrando el número y posición de las grietas:

Probeta plana cuadrada, anchura (mm): 600 x 600
Espesor medio de la probeta plana (mm): 100
Tipo de la máquina de ensayo: Prensa Clase 1 (Precisión $\pm 1\%$); Carga Máxima: 20 Tn; Marca: OMADYSA.

CARGA MÁXIMA (kN): 55
CAPACIDAD DE ABSORCIÓN DE ENERGÍA (J): 780



CURVA CARGA (kN) / FLECHA (mm)

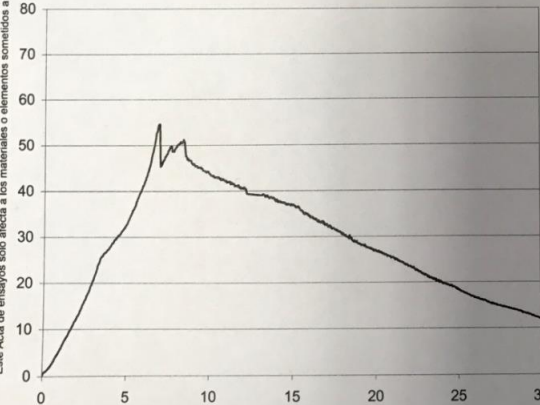
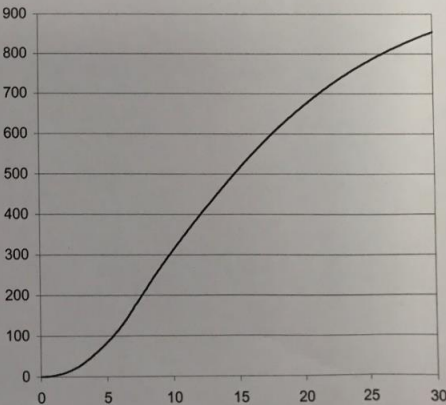


DIAGRAMA ENERGÍA (J) / FLECHA (mm)



EDAD DE LA PROBETA EN EL MOMENTO DEL ENSAYO: 28 Días.
DESVIACIONES RESPECTO A LA NORMA: Probeta pulida por su cara rugosa y recortada en sus cuatro lados.
El ensayo se ha llevado a cabo de acuerdo con esta norma

En Alicante, a 14 de diciembre de 2010

COPIAS ENVIADAS A:
JOSÉ ORTIZ (e-mail: 4088)
JOSÉ ORTIZ SANJUAN
ELENA CHINCHÓN (e-mail)

RESPONSABLE TÉCNICO: Rosario Lucas Ojeda, Arquitecto Técnico

DIRECTOR DEPARTAMENTO DE MATERIALES: Carlos-Luis Gómez Moya, Ingeniero Tco. de Obras Públicas

HOJA Nº1 DE 1

Şekil 70. Enerji yutma kapasitesini gösteren rapor

Yapılan çalışmalarda hasır çelik yerine sentetik fiber uygulaması sürekli yaygınlaşmaktadır. Bunun önemli nedenleri arasında hasır çelik imalatının sahada uygulamasının sentetik fiber uygulamasına göre çok daha zor ve kalifiye işçilik gerektirmesi, hasır çelik donatılarında zamanla oluşan korozyon bağlı olarak yapı

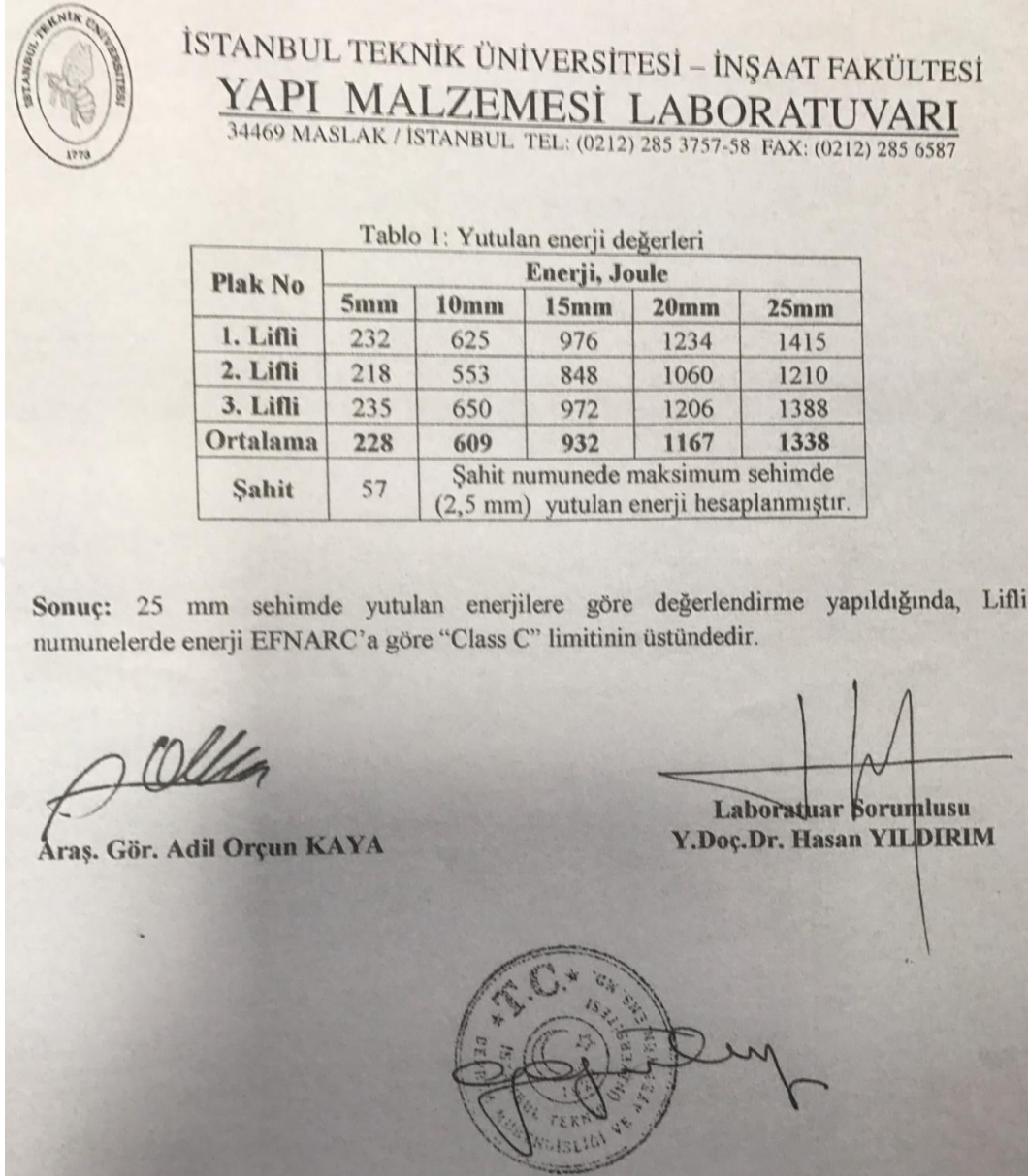
ömründeki azalma olmasıdır. Sentetik fiber kullanımı ile arazide uygulama kolaylaşmış korozyon sorunu çözülmüş olup betonun yük etkisi altında yüksek deformasyon yaparak enerji yutma kapasitesi artırılabilmiştir.

İstanbul Teknik Üniversitesinin 23.06. 2015 tarih ve 2665 nolu teknik raporunda plaka yükleme deneylerinden elde edilen çeşitli sehimlere ait enerji değerleri Tablo 19’da gösterilmiştir.

Tablo 19. Numunelerin sehim durumlarına göre enerji yutma kapasiteleri

Sehim (mm)	Enerji (joule)								
	2-1	2-2	Ortalama	3-1	3-2	Ortalama	4-1	4-2	Ortalama
5	275	166	220	224	219	222	185	177	181
10	590	375	483	465	445	455	373	380	376
15	886	572	729	688	664	676	549	506	527
20	1166	755	961	883	846	865	692	582	637
25	1431	926	1179	1043	1002	1022	793	635	714
30	1684	1084	1384	1164	1128	1146	865	674	769
35	1927	1232	1579	1261	1218	1239	922	704	813
40	2159	1368	1764	1341	1286	1314	972	732	852

İstanbul Teknik Üniversitesinin 16.01.2014 tarih ve 1584 nolu teknik raporunda plaka yükleme deneylerinden elde edilen çeşitli sehimlere ait enerji değerleri Şekil 71’de İstanbul Teknik Üniversitesi raporunda gösterilmiştir.



Şekil 71. İstanbul Teknik Üniversitesi raporu

Görüldüğü üzere farklı örneklerde farklı sehimlerde farklı enerji yutma kapasitelerine sahip olduğu yapılan çalışmalarda belirlenmiştir. Her projede kendi zemin sınıfına uygun olarak belirleyeceği enerji yutma kapasitesi doğrultusunda kullanılan sentetik fibere göre belirlenecek olan optimum miktarla istenilen enerji yutma kapasitesi sağlanacaktır.

Eğribel Tüneli Şantiyesinde kullanılan sentetik fiber malzemesinin ve kullanım aşamaları Şekil 72, 73, 74, 75, 76, 77 ve Şekil 78'de sunulmuştur. Şekil 72'de kilogramlık paketlenmiş sentetik fiber donatı, Şekil 73'de sentetik fiber malzemenin şantiyeye geliş şekli, Şekil 74'de bir miktar sentetik fiber malzemenin gösterimi, Şekil 75'de sentetik fiber

malzemenin beton üretimine karışımı, Şekil 76'da sentetik fiberli püskürtme betonunun pompaya iletim şekli, Şekil 77'de sentetik fiberli püskürtme betonunun pompaya iletim anı ve Şekil 78'de sentetik fiber donatılı püskürtme beton örneği gösterilmiştir. Burada yapılan uygulamanın başarılı olduğu sentetik fiber malzemesinin homojen dağılımından da gözlenmektedir. Bunu yapılan numune kırım sonuçları da doğrulamaktadır.



Şekil 72. 3 kilogramlık paketlenmiş sentetik fiber donatı



Şekil 73. Sentetik fiber malzemenin şantiyeye geliş şekli



Şekil 74. Bir miktar sentetik fiber malzemenin gösterimi



Şekil 75. Sentetik fiber donatı malzemesinin beton üretimine karışımı



Şekil 76. Sentetik fiberli püskürtme betonunun pompaya iletim şekli

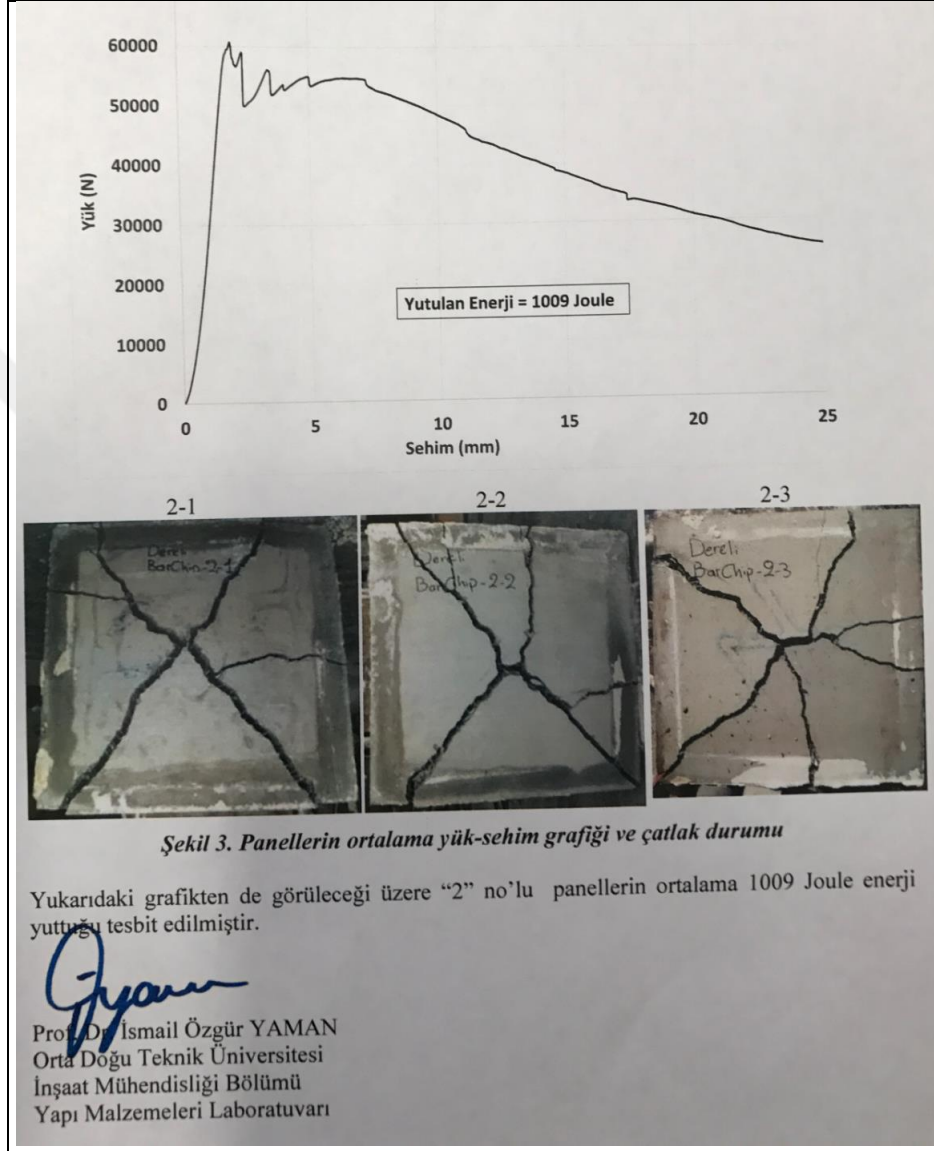


Şekil 77. Sentetik fiberli püskürtme betonunun pompaya iletim anı



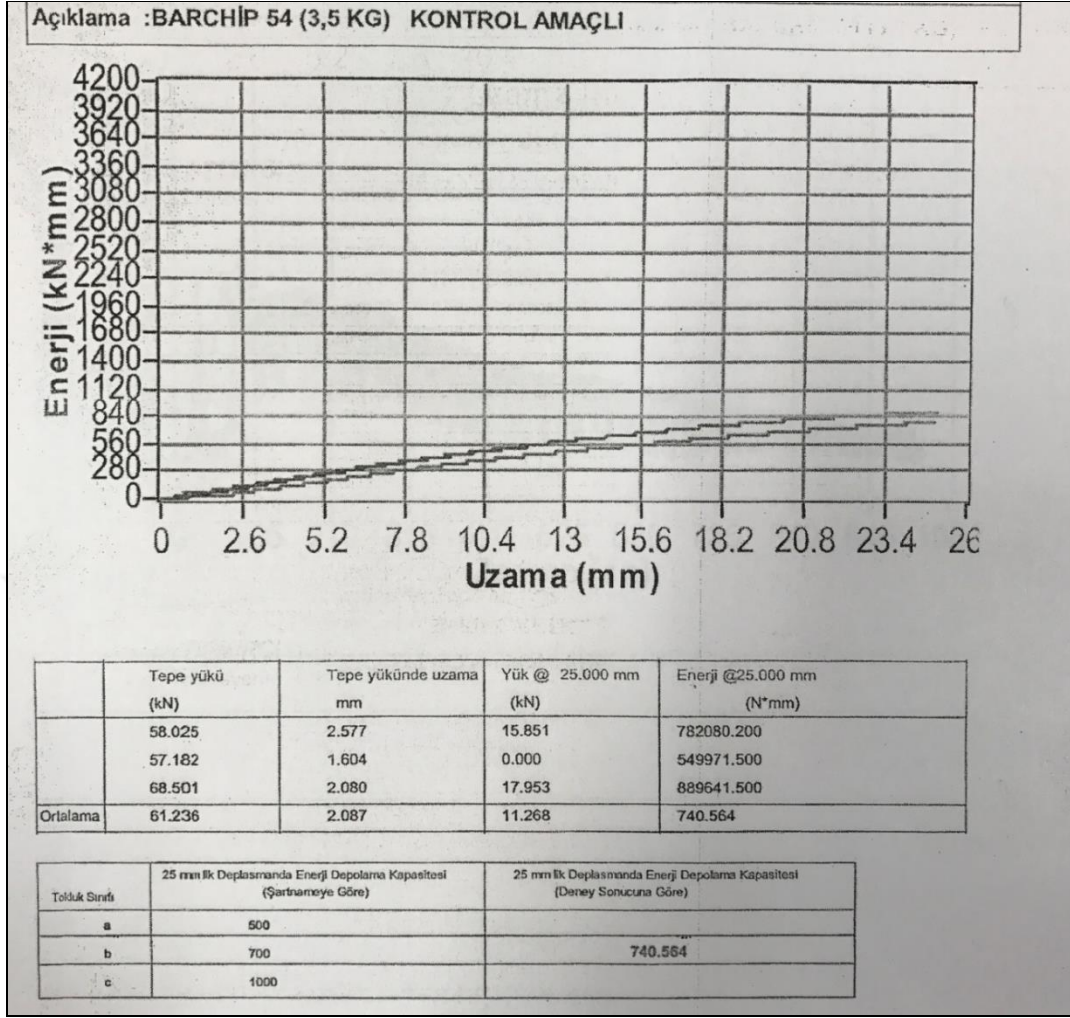
Şekil 78. Sentetik fiber donatılı püskürtme beton örneği

Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü Yapı Malzemeleri Laboratuvarında Eğribel tüneline ait panellerin enerji yutma kapasitesini gösteren rapor sonucu Şekil 79'da gösterilmiştir.

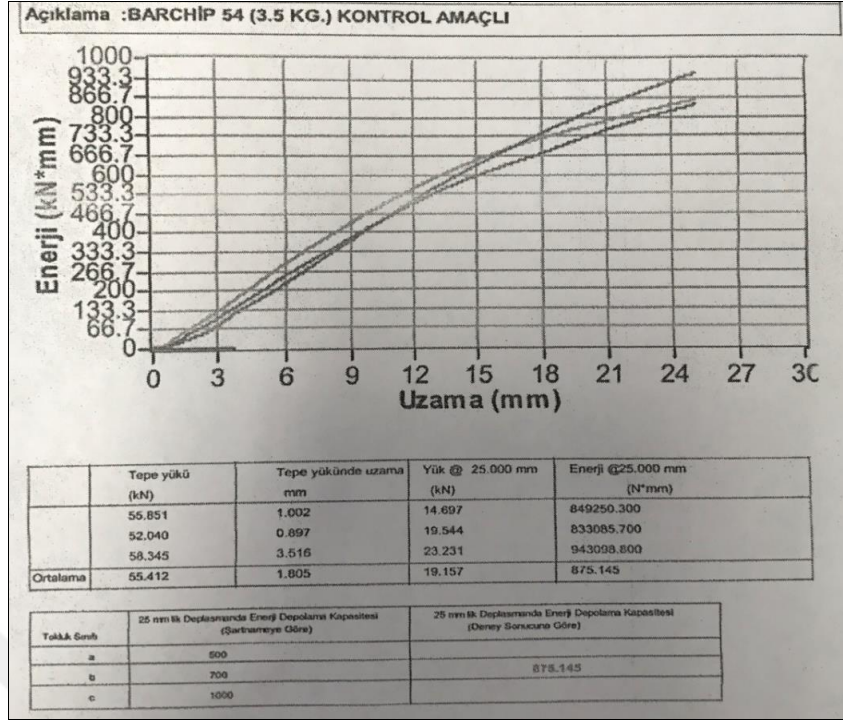


Şekil 79. Panellerin ortalama yük-sehim ve çatlak durumu

Eğribel tüneline ait panellerin enerji yutma kapasitesini gösteren rapor sonucu Şekil 80 ve Şekil 81'de gösterilmiştir.



Şekil 80. 25 mm deplasmanda enerji depolama kapasitesi deney sonucu sol tüp



Şekil 81. 25 mm deplasmanda enerji depolama kapasitesi deney sonucu sağ tüp

Sonuç olarak arazide kullanılacak sentetik fiber katkılı püskürtme betonunun EFNARC plaka testine göre 500-700 joule enerji emme değerini sağlaması için önerilen şantiye şartlarındaki beton koşullarında 3.5kg/m^3 sentetik fiber dozajı ile gerekli enerji emme değerini sağladığı yapım aşamasında görülmüş ve test edilmiştir. Bu miktar kritik kuvvet ve moment durumlarında oluşabilecek gerilmeleri karşıladığı yukarıdaki diyagramlarda da gösterilmiştir.

3. İRDELEME

Dünyada iyi, orta, zayıf dereceli zeminlerde sentetik fiber donatı kullanımları yaygınlaşmaktadır. Türkiye de KGM ve üniversitelerde yük altında deformasyon ölçen beton plak testleri ile enerji yutma kapasiteleri tespit edilerek kalite kontrolleri yapılmakta ve projesinde istenen enerji yutma kapasitesini sağlayacak şekilde püskürtme betonu içine yeterli miktarda sentetik fiber donatı katılmaktadır.

Sentetik fiber donatı miktarının belirlenmesinde kullanılan fiber donatının dayanım özellikleri, şantiyede kullanılan agrega, çimento, beton dizaynı, fiber donatının püskürtme betonuna katılış biçimi, tecrübeli personelin etkili olduğu görülmüştür.

Sentetik fiber donatının püskürtme betonuna eklenme biçimi ve eklenme yerleri seçiminde farklılıklar olabilir. Sentetik fiber donatı püskürtme betonuna transmikserde katılabilir. Bu katılım 3 kg veya 5 kg olarak hazır paketlenerek gelmiş olan ve beton içinde eriyebilen poşetlerle direk olarak transmiksere eklenebilir. Ekleme işleminden sonra belli bir miktar transmikserin karıştırması için beklenir. Sentetik fiber donatının bir başka karışıma eklenme biçimi beton santralinde püskürtme betonun olduğu hazneye eklenmesiyle olur. Bunu da direk paketler halinde yada paketten çıkartılarak yapılabilir. Şantiyede yapılan denemelerde sentetik fiber donatının püskürtme betonuna katılımında en iyi verim beton santralinde karışım aşamasında agrega bantlarına eklenmesiyle sağlanmıştır. Çalışmalar sırasında püskürtme betona sentetik fiber donatının ekleniş biçimi ve yerinin betonun enerji yutma kapasitesini etkilediği görülmüştür.

Sentetik fiber donatının püskürtme betonuna eklenmesi betonun slumpını etkilemesi sebebiyle santralden uygulama için geçen sürenin önemli olduğu gözlemlenmiştir. Ayrıca püskürtme beton dizaynı da sentetik fiber donatının enerji yutma kapasitesini etkilemektedir. Özellikle beton dizaynındaki ince malzeme yüzdesindeki değişimin etkisi son derece önemlidir. Şantiyede yapılan çalışmalar göstermiştir ki sentetik fiber katkılı püskürtme beton uygulamalarında değişen parametrelerin betonun basınç değerinde sınır değerler içinde kalan değişikliklere sebep olsa bile enerji yutma kapasitesinde çok önemli farklılıklara sebep olmaktadır. Bu yüzden imalat sırasında kullanılan malzemeler, beton santrali ve uygulama aşamasında özel takip edilmelidir.

Proje dayanım şartları sağlandıktan sonra sentetik fiber donatı kullanımı şantiyede özellikle birbirini takip eden sıralı işlerden oluşan tünel çalışmalarında sağladığı zaman

avantajı imalatlar sırasında çok kolaylık oluşturmuştur. Tünelcilikte iş kalemlerinin birbirini takip etmesinden dolayı bir iş kaleminin süresinin kısalması tüm işleri etkilemekte ve günlük imalat miktarını pozitif etkilemektedir. Ayrıca bu durum zamandan tasarruf sağladığı gibi çalışma sırasında ana gider kalemlerinden olan kullanılan personel, makine sayısını ve süresini azaltmaktadır. Tablo 20 ve Tablo 21’de sentetik fiberli beton uygulamasında ve çelik hasır uygulamasında çalışan makine ve personel miktarları gösterilmiştir.

Tüm bunlar ortalama 200-250 kişinin çalıştığı bir şantiyede işin genel süresi ve yapılan imalatın toplam miktarı düşünüldüğünde önemli miktarlar oluşturmaktadır.

Sentetik fiber donatı kullanımının personel ve makine giderlerine katkı sağladığı gözlemlenmiştir. Bunun yanında yapılan işin süresinde %30 civarında azalma görülmüştür. Buda belli bir sürede yapılan işin %30 arttığı veya başka bir ifade ile işin süresinden %30 erken bittiği anlamına gelmektedir. Tüm bunlar maliyetleri, giderleri ve gelirleri etkilemektedir.

Tablo 22 ve Tablo 23’de birim fiyatlar, piyasa fiyatları düşünülerek hazırlanmış olup sabit giderler dikkate alınmadan hazırlanmıştır.

Tablo 20. Sentetik fiberli püskürtme beton uygulaması

ÜSTYARI FİBERLİ PÜSKÜRTMR BETON UYGULAMASI															
UYGULAMA ADI	ÇALIŞMA ESNASINDA KULLANILAN MAKİNA VE ÇALIŞAN OPERATÖR							TORKRET	ÇALIŞAN TÜNEL PERSONELİ						ÇALIŞILAN SÜRE (SAAT)
	EXCAVATÖR	LODER	KAMYON	MİKSER	ROBOT	JUMBO	MANİTU		ETÜT	FORMEN	Erbab işçi	DÜZ işçi	LAĞIMCI	ELEKTRİKÇİ	
AYNA ÇİZİMİ							1 kişi		2 kişi	1 kişi	1				0,5
AYNA VE BULON DELGİ						2 kişi				1	1				2,5
BULON İMALATI		1 kişi								1 kişi	1	3 kişi		1 kişi	1
AYNA DOLUM							1 kişi			1 kişi	1	2	1 kişi	1 kişi	0,5
HAVALANDIRMA VE PASA		1 kişi	5 kişi									1			3
AYNA TARAMA	1 kişi									1 kişi	1				1
TARAMA PASASI		1 kişi	3 kişi								1				0,5
ETÜT(RÖLEVE)							1 kişi		2 kişi	1 kişi					0,5
FİBERLİ PÜSKÜRTME BETON				1 kişi	1 kişi			1		1	1 kişi	1		1 kişi	2
toplam geçen süre														11,5	

Tablo 21. Çelik hasır uygulaması

ÜSTYARI ÇİFT KAT ÇELİK HASIR UYGULAMASI															
UYGULAMA ADI	ÇALIŞMA ESNASINDA KULLANILAN MAKİNA VE ÇALIŞAN OPERATÖR							torkret	ÇALIŞAN TÜNEL PERSONELİ						ÇALIŞILAN SÜRE (SAAT)
	EXCAVATÖR	LODER	KAMYON	MİKSER	ROBOT	JUMBO	MANİTU		ETÜT	formen	Erbab işçi	Düz işçi	(ATEŞleme	ELEKTRİKÇİ	
AYNA ÇİZİMİ							1 kişi		2 kişi	1 kişi	1				0,5
AYNA VE BULON DELGİ						2 kişi				1	1				2,5
BULON İMALATI		1 kişi								1 kişi	1	3 kişi		1 kişi	1
AYNA DOLUM							1 kişi			1 kişi	1	2	1 kişi	1 kişi	0,5
HAVALANDIRMA VE PASA		1 kişi	5 kişi									1			3
AYNA TARAMA	1 kişi									1 kişi	1				1
TARAMA PASASI		1 kişi	3 kişi								1				0,5
ETÜT(RÖLEVE)							1 kişi		2 kişi	1 kişi					0,5
EMNİYET PÜSKÜRTME BETON				1 kişi	1 kişi			1		1 kişi	1	1		1 kişi	1
FİRKETE DELGİ						2 kişi				1 kişi				1 kişi	1
1.KAT ÇELİK HASIR							1 kişi			1 kişi	1	3 kişi			2
1.KAT PÜSKÜRTME BETON				1 kişi	1 kişi			1		1 kişi	1	1		1 kişi	1
2.KAT ÇELİK HASIR							1 kişi			1 kişi	1	3 kişi			1
2.KAT PÜSKÜRTME BETON				1 kişi	1 kişi			1		1 kişi	1	1		1 kişi	1
toplam geçen süre															16,5

Tablo 22. Fiberli püskürtme beton uygulaması

FİBERLİ PÜSKÜRTME BETON UYGULAMASI					
Poz No:	Cinsi (MAKİNE)	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
KGM/03.592	Jumbo	sa	2,5	357,05	892,625
KGM/03.517/1	Robot	sa	2	55,88	111,76
3,136	mikser	sa	2	42,86	85,72
KGM/03.538/2	Kamyon	sa	16,5	66,93	1104,345
03.521.	lastik tekerlikli yükleyici (loder)	sa	4,5	72,33	325,485
03.501/1	ekskavatör (beko)	sa	1	112,3	112,3
03.521.	lastik tekerlikli yükleyici (manitu)	sa	1,5	72,33	108,495
Toplam Makine Tutarı					2740,73
Poz No:	Cinsi (İŞÇİLİK)	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
01.409.	Formen	sa	8	14,85	118,80
01.502.	Erbab İşçi	sa	8	7,85	62,80
01.501.	Düz İşçi	sa	9	7,40	66,60
01.510.	Torkret	sa	2	8,90	17,80
01.011.	Lağımçı(Ateşleme Ustası)	sa	0,5	10,10	5,05
01.502.	Erbab İşçi(Etüt-Elektrikçi)	sa	4,5	7,85	35,33
01.501.	Düz İşçi(Etüt)	sa	1	7,40	7,40
Toplam işçilik Tutarı					313,78
Toplam Tutar Fiberli					3054,51

Tablo 23. Çelik hasırlı püskürtme beton uygulaması

Çift Kat Çelik Hasırlı Püskürtme Beton Uygulaması					
Poz No:	Cinsi (MAKİNE)	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
KGM/03.592	Jumbo	sa	3,5	357,05	1249,675
KGM/03.517/1	Robot	sa	3	55,88	167,64
3,136	mikser	sa	3	42,86	128,58
KGM/03.538/2	Kamyon	sa	16,5	66,93	1104,345
03.521.	lastik tekerlikli yükleyici (loder)	sa	4,5	72,33	325,485
03.501/1	ekskavatör (beko)	sa	1	112,3	112,3
03.521.	lastik tekerlikli yükleyici (manitu)	sa	4,5	72,33	325,485
				Toplam Makine Tutarı	3413,51
Poz No:	Cinsi (İŞÇİLİK)	Ölçü Birimi	Miktarı	Birim Fiyatı (TL)	Tutarı (TL)
01.409.	Formen	sa	13	14,85	193,05
01.502.	Erbab İşçi	sa	12	7,85	94,20
01.501.	Düz İşçi	sa	19	7,40	140,60
01.510.	Torkret	sa	3	8,90	26,70
01.011.	Lağımçı(Ateşleme Ustası)	sa	0,5	10,10	5,05
01.502.	Erbab İşçi(Etüt-Elektrikçi)	sa	6,5	7,85	51,03
01.501.	Düz İşçi(Etüt)	sa	1	7,40	7,40
				Toplam işçilik Tutarı	518,03
				Toplam Tutar Hasırlı	3931,54

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Yapılan çalışmada NATM göre kazı ve destek çalışmaları yapılan tünellerde projesinde belirtilen zemin sınıflarına uygun olacak şekilde değerlendirilerek hasır çelik yerine sentetik fiber donatı kullanımı ve kullanılacak sentetik lifli fiber miktarı irdelenmiştir. Kullanılan sentetik lifli fiber donatıyla ilgili şu sonuçlara varılmıştır.

a) Fiberinin püskürtme betona katılımı

Sentetik lifli fiber donatılı püskürtme betonunun elde edilmesi aşamasında sentetik fiber donatının püskürtme betonuna katılım şekli ve yeri son derece önemlidir. Aynı püskürtme betonda farklı yer ve şekilde eklenen sentetik fiber donatının enerji yutma kapasitelerindeki değişimi çok fazla etkilemiştir. Burada sentetik fiber donatının püskürtme betonuna ekleneceği en uygun yerin beton santralinde agrega bantlarına torbadan çıkarılmış biçimde olduğu belirlenmiştir. Ayrıca bu enerji yutma kapasitesini etkilediği gibi topaklanmanın da önüne geçmiştir.

b) Fiberde püskürtme betonun dizaynının önemi

Püskürtme betonun dayanımı sentetik lifli fiber donatı eklendikten sonra enerji yutma kapasitesinde çok etkili olmuştur. Farklı dizaynlarda aynı miktarda sentetik fiber donatı kullanılmasına karşın istenilen sonuçlara ulaşılamamıştır. Bu noktada sentetik fiber donatı eklenecek olan püskürtme beton dizaynına çok iyi karar vermelidir. Çünkü püskürtme beton dizaynı dayanımları, enerji yutma kapasitesini etkilediği gibi topaklanma, geri sıçramanın da önüne geçmektedir.

c) Hasır çelik imalatı yerine fiber uygulamanın zaman avantajı

Hasır çelik destekleme uygulaması ön püskürtme betondan sonra yapılırken hasır malzemesinin taşınması, hasır imalatının gerçekleştirilme zorluğu, hasır çelik imalatının gerçekleşmesi için hasır çeliğin monte edilecek delgilerin delinmesi, ayrıca ön püskürtmeden sonra başka bir iş gurubunu yapıp onun için gerekli olan iş makinası ve personelin gelmesi ve sonra tekrardan püskürtme betonu için gerekli ekipmanın gelmesi kurulması için geçen süreç zaman almakta ve birbirir sıra gelen işleri aksatmaktadır. Sentetik fiber donatılı püskürtme beton uygulamasında ön püskürtme yapılırken projesinde belirtilen miktar kadar uygulanabilmektedir. Çünkü öncesinde ve sonrasında hasır çelikte olduğu gibi başka bir işlem olmadığından püskürtme beton robotu kurulmuşken püskürtme beton imalatı tamamlanır. Sentetik lifli fiber donatı imalatı hem uygulama kolaylığı hem

uygulamadaki işlem sırasındaki avantajlarıyla önemli miktarda zaman avantajı sağlamaktadır. Bu durumda sentetik fiber donatılı püskürtme betonu iş kalemi gurubuna dahil olan makine ve personelin bu süreci aksatmadan yürütebilmeleri için yeterli nitelikte ve kalitede olmaları son derece önemlidir. Çünkü kademeli yapılan püskürtme beton imalatı artık tek seferde yapılması bu işin tünel içerisinde sürekli olarak gerçekleşmesi anlamına gelmektedir. Bu püskürtme beton işinin aksatılmadan gerçekleşmesi kazanılan zaman avantajı açısından son derece önemlidir. Aksi takdirde elde edilen kazanım boşa çıkacaktır.

d) Maliyetlere olan artışı

İşin süresinde yaklaşık %30 oranında kısalma görülmüştür. Bu tüm maliyetleri etkilemektedir.

Çift kat kasır çelik yerine sentetik fiber katkılı püskürtme beton uygulaması kullanıldığında işçilik giderlerinde yaklaşık %40 azalma görülmüştür. Bu oran makine giderlerinde yaklaşık %20 dir.

e) Yapılan işin süresinin genel süreye etkisi ve genel giderlerin azalması

Yapım süresinde sağladığı zaman avantajı işin günlük ve aylık imalat miktarında artış sağlamaktadır. Bunun sonucu olarak belirli zaman diliminde yapılan imalat miktarındaki artış işin genel süresinden erken tamamlanmasına neden olacaktır. Yada çeşitli sebeplerden ötürü işin sekteye uğraması ve süresinden fazla zamanda bitirileceği zamanlarda avantaj sağlayıp işin süresinde tamamlanmasını sağlayacaktır. İşin zamanında tamamlanması cezalı çalışmanın, teminat süresini uzatmanın, sabit şantiye giderlerinin önüne geçecektir.150 kişilik bir şantiyenin sabit giderlerinin(barınma, maaş, vb.)yaklaşık olarak 750.000 TL. olduğu düşünülürse işin süresinden erken tamamlanmasının büyük işlerdeki kazancı azımsanmayacak kadardır.

f) İş sağlığı ve güvenliği

Hasır çelik imalatının işçiliği gerçekleştirilirken oluşabilecek risklerin önüne geçmektedir. Hasır kaldırılması, monte edilmesi uzun ve tehlikeli bir işçilik gerektirmektedir. Bunun ortadan kaldırılması iş sağlığı ve güvenliğini olumlu etkilemektedir. Hasır çelik yerine kullanılan donatının sentetik fiber olması da batma, yaralanma, gibi şantiyelerde işçilik sırasında çok gözüken olayların önüne geçmektedir. Sentetik fiber donatılı püskürtme beton kullanılmasıyla hasır çelik imalatı gerçekleştirilince elde edilen enerji yutma kapasitesi, eğilme ve çekme dayanımlarına ulaşılmaktadır. Burada sentetik fiber kullanılmadan sadece püskürtme betonu yapılan

imalatlarda bu dayanımlar elde edilmeden tünelde hasır çelik imalatı yapılmakta olup buda risk oluşturmaktadır. Sentetik fiber kullanılması bu riski de ortadan kaldırmakta ve imalat sırasında oluşabilecek kazaları azaltmaktadır.

g) Geri sıçramada gözle görülür bir azalma

Sentetik fiberli püskürtme betonun çekme dayanımına olan artışı püskürtme işlemi gerçekleştirilirken olan geri sıçramalar, dökülmeler,püskürtme betonun kalınlığının arttığı yerdeki uygulamalarda oluşan kopmaların ilk dayanımının fazla olması sebebiyle önüne geçtiği görülmüştür.

h) İlk dayanımlagöçük engelleme ve güvenlik

Tünel kazı işlemi tamamlanmasının peşi sıra uygulanan sentetik fiber donatı katkılı püskürtme betonu uygulaması yüksek enerji yutma kapasitesi, yüksek eğilme ve çekme dayanımıyla göçüklerin önüne geçmektedir. Burada kazıdan sonra hasır çelik imalatı uygulanana kadarki süreçte istenen dayanımlar sağlanamadığından göçükler, kopmalar oluşmaktadır. Kopmaların oluşması blok hareketlerine sebebiyet vermektedir. Bu olayların önüne geçilmesiyle desteklemenin tamamlanmasına kadarki süreçte de güvenlik sağlanmış olur.

1) Farklı zemin sınıflarında kullanımı

B1, B2 ve B3 zemin sınıflarında raporların kesit zorlamalarından elde edilen N_{max} ve M_{max} statik ve sismik yükleme durumunda $3,5 \text{ kg/m}^3$ sentetik fiber donatı kullanılarak istenilen dayanım elde edilmiştir. Başka proje ve zemin sınıflarında gerekli projelendirme çalışmaları yapılarak hasır çelik yerine uygun dozajda sentetik fiber donatı kullanılabilir.

Her mühendislik projesinde olması gerektiği gibi maliyetlerin düşük, emniyetin yüksek, araştırma, tasarım, yapım sürelerinin kısa olması, hizmet ömrünün uzun olması ve çevre dostu olması koşulları bu çalışmada yukarıda belirtildiği gibi gerçekleşmiştir.

5. KAYNAKLAR

- Arıoğlu, E. ve Girgin, C., 1998. elik Lifli Puskurtme Beton Kaplama Tasarımı-Kaya Patlama Olayına Maruz Tunnellerde Kullanım, 4. Ulusal Kaya Mekanigi Sempozyumu, Ekim, Zonguldak,Bildiriler Kitabı, 119-133.
- Arıoğlu, E., 2009. Tünel Dersi, Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü, İstanbul.
- Arıoğlu, E., 2011. Tünel Ders Notları, Yıldız Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Arıoğlu, E., Odbay, O. ve Alper, H., 1993. M. İnönü Tünel Şantiyesinde Puskurtme Beton Dayanımlarının Değerlendirilmesi, Yapı Merkezi AR-GE Arşivi.
- Arıoğlu, E., Yüksel, A. ve Yılmaz, A. O., 2008. Puskurtme Beton Bilgi Föyleri - özümlü Problemler, TMMOB Maden Mühendisleri Odası, İstanbul Şubesi, 142.
- Barton, N. ve Abrahao, R., 2003. Employing the QTBM Prognosis Model, Tunnel and Tunnelling International, USA.
- Barton, N., 1999. TBM Performance Estimation in Rock Using QTBM, Tunneling Int., Milan.
- Barton, N., 2002. Some New Q-Value Correlations Toassist in site Tharacterization and Tunnel Design.International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 39, 185–216.
- Barton, N., Lieu, R. ve Limde, I., 1974. Engineering Clasification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Oslo: Norway, 106.
- Barton, N., Lien, R. ve Lunde, J., 1974. Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support, Rock Mechanics 6, 5, 189-236.
- Bieniawski Z.T., 1976. Rock Mass Classifications in Rock Engineering. Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering, Rotterdam, 97-106.
- Bieniawski Z.T., 1989. Engineering Rock Mass Classifications. John Wiley & Sons, New York, 251.
- Bieniawski, Z T., 1976. Rock Mass Classifications in Rock Engineering, Proc. of the Symp. On Exploration for Rock Engineering, Jahannesburg, 97-106.
- Bieniawski, Z.T., 1973. Engineering Classification of Jointed Rock Masses. Trans. S. African Instn. Civ. Engrs., 15, 12, 335 - 344.

- Bieniawski, Z.T., 1974. Geomechanics Classification of Rock Masses and its Application in Tunneling. Proc. Third Int. Congress on Rock Mechanics, 27-32.
- Bishop, A., W., 1955. The Use of Slip Circle in the Stability Analysis of earth Slopes. Geotechnique, 5, 7-17.
- Bozkurt, M., 1987. Tüneller Ders Notları, İTÜ İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.
- Bozkurt, M., 1981. Tüneller, İstanbul Teknik Üniversitesi, İstanbul.
- Deere D.U., 1964. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes. Felsmechanik und Ingenieurgeologie, 1, 16-22.
- Deere, D. U., 1963. Technical Description of Rock Cores for Engineering Purposes in Rock Mechanics and Engineering Geology, Vienna.
- Emiroğlu, A., 2010. İstanbul (4.Levent-Hacıosman Arası) Metro Tünelindeki Mühendislik Uygulamaları, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı, Adana.
- Ertem, M., 2000. Karşiyaka Tünellerinin Kazı Etüdü Yüksek Lisans Tezi DEÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- European Specification for Sprayed Concrete (Efnarc), 1989. Energy Absorption Class (Plate Test).
- Gerçek, H. ve Geniş, M., 1998. Yönlere bağlı Birincil Gerilme Alanının Yeraltı Açıklıklarının Duraylılığına Etkisi, 4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, Ekim Zonguldak, Bildiriler Kitabı, 235-246.
- Girgin, C., Yüksel, A. ve Arıoğlu, E., 1998. Tünellerde Püskürtme Betonun Mekanik Büyüklükleri ve Kalite Kontrol İlkeleri, 4. Ulusal Kaya Mekaniği Sempozyumu, Ekim Zonguldak, Bildiriler Kitabı, 135-146.
- Grimstad E. ve Barton N., 1993. Updating the Q-System for NMT. Proc. Int. Symp. on Sprayed Concrete, Norwegian Concrete Association, 20, Oslo.
- Haruyama, K., Teramoto, S. ve Taira, K., 2004. Construction of large cross-section double-tier Metropolitan Inter-city Highway (Ken-O-Do) Ome Tunnel by NATM, Taipei, Taiwan.
- Hoek, E. ve Brown, E. T., 1997. Practical Estimates of Rock Mass Strength. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 34, 1165–1186.
- Huang, F., Zhu, H., Jiang, S. ve Liang, B., 2017. Excavation-Damaged Zone around Tunnel Surface under Different Release Ratios of Displacement, International Journal of Geomechanics, 17, 4, 1-11.

- Jing, L. ve Stephansson, O., 2007. Fundamentals of Discrete Element Methods for Rock Engineering: Theory and Applications. Developments in Geotechnical Engineering, 85.
- Karayolları Genel Müdürlüğü, 2013. Karayolları Teknik Şartnamesi, Ankara.
- Kılıç, R. ve Ulaş, K., 2009. Mühendislik Jeolojisi Uygulama Notları, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Jeoloji Bölümü, Ankara.
- Kılıç, R., 2005. Kaya Mekaniği, Ankara Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Ankara.
- Koçak, B., 2006. Yeraltı Kaya Yapılarının Denetimi ve Yönlendirilmesinde Uzman Sistem Oluşturulması, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Koçbayı, A. ve Doğan E., 2015. Tünel Delme Makineleri ve Performans Analizleri Örnek Çalışmalar, 3. Sulama Sempozyumu, Ekim, Ankara, Bildiriler Kitabı.
- Köse, H., Gürgen, S. ve Onargan, T., 1992. Tünel ve Kuyu Açma, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, No:145, İzmir.
- Köse, H., Gürgen, S., Onargan, T., Yenice, H. ve Aksoy, O., 2012. Tünel ve Kuyu Açma, Dokuz Eylül Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Yayınları, 145, İzmir.
- Li, C., 2016. Developing an Analytical Method to Study Vertical Stress Due to Soil Arching During Tunnel Construction, Springer International Publishing Switzerland.
- Moffat, R., Jadue, C., Beltran, J.F. ve Herrera, R., 2002. Experimental Evaluation of Geosynthetics as Reinforcement for Shotcrete, Santiago, Chile.
- Nurnur, H., 2016. Büyük Kesitli Tünel Kazısı Sırasında Çevre Yapılarda Meydana Gelen Oturmaların Sayısal Modelleme ile Analizi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Oktay, V., 2015. Yeni Avusturya Tünel Metodu(NATM), Tünel Teknolojisi Dergisi.
- Özacar, V., 2010. Kaya Yapılarının Davranışının Belirlenmesinde Yeni Bir Metod Olan Kaya Yapısı İndeksi Üzerine Bir Çalışma, Dokuz Eylül Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir.
- Öztürk, H, T. ve Durmuş, A., 2008. Tünelere Toplu Bir Bakış ve Savunma Tünellerinin Türkiye İçin Önemi, İstanbul Bülten, 96.
- Öztürk, O., 2014. Metro Tünellerinin İstanbul Örneğinde Çok Yönlü İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı, İstanbul.

- Sapigni, M., Berti, M., Bethaz, E., Busillo, A. ve Cardone, G. 2002. TBM Performance Estimation Using Rock Mass Classifications, Bologna, Italy.
- Satıcı, Ö. ve Topal, T., 2015. Tünel Açma Yöntemlerinin Mühendislik Jeolojisi ve Kaya Sınıflama Sistemleri ile Değerlendirilmesi, Jeoloji Mühendisliği Dergisi, 39, 1, 45-57.
- Selman, H.G., 2014. Tünel Kazısı Sebebiyle Meydana Gelen Zemin Oturmaları ve Mevcut Yapılara Olan Etkilerinin İncelenmesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Süzen, E., 2009. 4.Levent-Ayazağa (İstanbul) Metrosu Tünelindeki Kazı ve Sağlama Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.
- Şeker, Ö., 2008. Yeni Avusturya Tünel İnşa Yöntemi Prensiplerine Göre Tünel Kaplama Tasarımı, İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- T.C Ulaştırma bakanlığı Demiryollar Limanlar Havameydanları İnşaatı Genel Müdürlüğü, 2007. Geoteknik Tasarım Esasları, Yüksel Proje, Ankara.
- T.C. Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2013. Karayolları Genel Müdürlüğü, NATM Uygulamalı Yeraltı Tünel İşleri Teknik Şartnamesi.
- Unlütepe, A. ve Ozener, H., 2008. Geotechnical measurements at Izmir LRT system tunnels, Istanbul Technical University, İstanbul.
- Ünlütepe, A. ve Messing, M., 2005. Tünel Ölçme Uygulamalarında Son Yenilikler, Harita ve Kadastro Mühendisleri Odası Mühendislik Ölçümleri STB Komisyonu 2. Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, İTÜ, İstanbul.
- Van-Manh Nguyen ve Quang-Phich Nguyen. 2015. Analytical Solution for Estimating the Stand-up Time of The Rock Mass Surrounding Tunnel, Hanoi University of Mining and Geology, Hanoi, Vietnam.
- Vardar, M. ve Bayraktar, H., 1992. Tünel Mühendisliğinde Eski ve Yeni Kaya Sınıflamalarının Kayaçlar in Post Failure Davranışlarındaki Yeri, Zemin Mek ve Temel Müh. Kongresi, Ekim, İstanbul, Bildiriler Kitabı, 166-176.
- Vardar, M. ve Eriş, İ., 1994. Derin ve Geniş Kazılarda Sağlama-Destekleme Önlemleri Üzerine Bir Araştırma., 5. Zemin Mek. ve Temel Müh Kongresi, Ekim, Ankara, Bildiriler Kitabı, 13-24.
- Vardar, M., 1982. Yeraltı Kaya Yapıları Mekaniğinde Yeni Avusturya Tünel Açma Yönteminin Ana İlkeleri, Ankara Jeoteknik-2, DSİ Yayını, Ankara, 79-94.

Yalçın, E., Gurocak, Z., Ghabchi, R. ve Zaman, M., 2016.Numerical Analysis for a Realistic Support Design: Case Study of the Komurhan Tunnel in Eastern Turkey, International Journal of Geomechanics, 16, 3, 1-14.

Yılmazer, Ö., 2009.Karabük Kısıklı Tünelli Geçişinin Jeotekniği, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Adana.

Yollar Türk Milli Komitesi Bülteni, 2014. s. 7.



ÖZGEÇMİŞ

BİRİNCİOĞLU, 13.10.1985 tarihinde Trabzon'da doğmuştur. Kanuni Anadolu Lisesi'nden 2004 yılında mezun olarak lisans öncesi eğitimini Trabzon'da tamamlamıştır. 2004-2005 eğitim öğretim yılında Dokuz Eylül Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde lisans eğitimine başlamıştır. 2009 yılında mezun olduktan sonra kısa bir süre saha mühendisi olarak özel sektör deneyimi yaşamıştır. Ardından, 2011 yılında Karayolları 10. Bölge Müdürlüğü'nde Kontrol Mühendisi olarak çalışmaya başlamış olup, halen Karayolları 10. Bölge Müdürlüğünde Kontrol Şefi olarak iş hayatına devam etmektedir.

BİRİNCİOĞLU evli olup, iyi derecede İngilizce bilmektedir.