

**KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA GEOTEKNİK
ÇALIŞMALAR VE YAKLAŞIM DOLGU MODELLERİ**

KENAN OĞUL

KOCAELİ 2017

KOCAELİ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA GEOTEKNİK
ÇALIŞMALAR VE YAKLAŞIM DOLGU MODELLERİ

KENAN OĞUL

Doç. Dr. Utkan MUTMAN
Danışman, Kocaeli Üniversitesi
Prof. Dr. Sami ARSOY
Jüri Üyesi, Kocaeli Üniversitesi
Doç. Dr. Niyazi Uğur TERZİ
Jüri Üyesi, Aksaray Üniversitesi



Tezin Savunulduğu Tarih: 16.06.2017

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Yüksek Hızlı Demiryollarının projelendirilmesi ve yapım çalışmaları sürecinde geoteknik çalışmalar ile yaklaşım dolgu modellerinin imalat aşamalarının ele alındığı bu çalışma ile yüksek hızlı demiryolu yapım özelliklerinin ortaya konulması amaçlanmıştır.

Bu çalışmanın ortaya çıkmasında desteklerini esirgemeyen Hocam Sayın Doç.Dr. Utkan Mutman Beyefendiye, birlikte sürdürdüğüm eğitim ve çalışma hayatım boyunca, desteklerini gördüğüm sayın hocalarıma ve çalışma arkadaşlarıma, Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryollarına ve tüm aileme sonsuz teşekkürler.

Haziran – 2017

Kenan OĞUL

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
ŞEKİLLER DİZİNİ	vi
TABLolar DİZİNİ	xii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ.....	xiii
ÖZET	xv
ABSTRACT	xvi
GİRİŞ	1
1. GENEL BİLGİLER	3
1.1. Yüksek Hızlı Demiryolu Projeleri	3
1.1.1. Proje kriterleri (Hız- Minimum kurp yarıçapı- Maximum eğim).....	3
1.1.2. Topoğrafyadan doğan yapılar (yarmalar-dolgular-viyadükler-tüneller).....	3
1.2. Ülkemizdeki Yüksek Hızlı Tren Projeleri	4
1.3. Çalışma Bölgesi ve Konusu İle İlgili Genel Bilgi	6
1.3.1. Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesinin tanıtımı.....	6
1.3.2. İnceleme alanı ile ilgili genel bilgiler	7
2. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARININ YAPIM ÇALIŞMALARI	8
2.1. Altyapı Çalışmaları	8
2.1.1. Güzergah işleri	9
2.1.1.1. Yarmalar.....	9
2.1.1.2. Dolgular	12
2.1.1.3. Zemin iyileştirmeler.....	13
2.1.2. Viyadükler	15
2.1.3. Tüneller	18
2.1.3.1. Tam kesit tünel açma makinaları (TBM- Tunnel Boring Machine) ile tünel açma.....	18
2.1.3.2. Konvansiyonel tünel açma yöntemi (NATM - New Austria Tunneling Methot).....	21
2.1.4. Küçük sanat yapıları	36
2.1.4.1. Alt geçitler.....	36
2.1.4.2. Üst geçitler	37
2.1.4.3. Menfezlerler	38
2.1.5. Hat yatağının oluşturulması (alttemel- seçme malzeme ve subbalast)	38
2.1.6. Drenaj çalışmaları.....	38
2.2. Üst Yapı Çalışmaları	39
2.2.1. Balastın serilmesi.....	41
2.2.2. Ray-travers bağlantılarının yapılması.....	46
2.2.3. Ray kaynağı.....	51
2.2.3.1. Alüminotermite ray kaynağı	52
2.2.3.2. Elektrikli direnç alın kaynağı	55
2.2.4. Hat ekartman ayarları	57

2.3. Elektrifikasyon ve Sinyalizasyon Çalışmaları	58
2.3.1. Kataner direklerinin dikilmesi	58
2.3.2. Taşıyıcı konsolların ve elektrik kablolarının tesisi	62
2.3.3. Sinyal kablo kanallarının ve kabloların döşenmesi	68
2.3.3.1. Sinyal kablo kanallarının döşenmesi	68
2.3.3.2. Sinyal kabloların serimi	70
2.3.4. Güç trafo tesisi ve telekomand birimlerinin kurulması	73
3. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR	75
3.1. Projelendirme Aşamaları	75
3.1.1. Ön projelendirme	76
3.1.1.1. Ön proje jeolojik etüt raporu	76
3.1.1.2. Ön proje hidrojeolojik etüt raporu	76
3.1.1.3. Ön proje mühendislik jeolojisi etüt raporu	77
3.1.1.4. Ön proje jeoteknik etüt ve raporu	78
3.1.2. Kesin projelendirme	79
3.1.2.1. Kesin proje jeolojik etüt raporu	79
3.1.2.2. Kesin proje hidrojeolojik etüt raporu	80
3.1.2.3. Kesin Proje Mühendislik Jeolojisi Etüt Raporu	80
3.1.2.4. Kesin proje jeoteknik etüt ve raporu	80
3.2. Zemin Araştırma Çalışmaları	82
3.2.1. Kazılar	82
3.2.1.1. Sığ gözlem çukuru	82
3.2.1.2. Şaftlar	83
3.2.2. Sondajlar	83
3.2.3. Jeofizik yöntemler	85
3.2.3.1. Sismik Yöntemler	86
3.2.3.2. Jeoelektrik yöntemler	88
3.2.3.3. Mikrotitreşim	88
3.2.3.4. Sismoloji	88
3.2.3.5. Gravite	89
3.2.4. Yeraltı suyu	90
3.3. Yerinde Deneyler	91
3.3.1. Standard penetrasyon deneyi (SPT)	92
3.3.2. Konik penetrasyon deneyi (CPT)	94
3.3.3. Presiyometre deneyi (PMT)	95
3.3.4. Arazi veyn deneyi (VST)	96
3.4. Laboratuar Çalışmaları	97
3.4.1. Zemin mekaniği deneyleri	99
3.4.1.1. Sınıflandırma deneyleri	100
3.4.1.2. Zeminin kayma direnci karakteristiklerini ölçen deneyler	102
3.4.1.3. Zeminin oturma ve sıkışma karakteristiklerini belirleyen deneyler	105
3.4.1.4. Diğer laboratuar deneyleri	106
3.4.2. Kaya mekaniği deneyleri	106
3.4.2.1. Fiziksel ve indeks özelliklerin saptanmasına yönelik deneyler	108
3.4.2.2. Tasarım deneyleri	112
3.5. Zemin Parametrelerinin Tasarımda Kullanılması	118

3.6. Kaya Parametrelerinin Tasarımda Kullanılması.....	120
3.6.1. Q sınıflandırma sistemi.....	122
3.6.2. Kaya kütle değeri (Rock Mass Rating, RMR).....	123
3.6.3. Kaya kütlelerinin dayanım özellikleri ve jeolojik dayanım indeksi (GSI).....	123
3.7. Sıvılaşma.....	124
3.7.1. Sıvılaşmanın oluşumu.....	124
3.7.2. Sıvılaşabilir zemin türleri.....	125
3.7.3. Ön Sıvılaşma, sıvılaşma ve çevrimsel (devri) oynaklık (sınırlı ön sıvılaşma).....	127
3.7.4. Sıvılaşmaya etki eden faktörler.....	128
3.7.5. Sıvılaşma olasılığının belirlenmesi.....	132
3.7.6. Sıvılaşma ile meydana gelen zemin duraysızlıkları.....	133
3.7.7. Sıvılaşma bölgelerinde uygulanacak tedbirler.....	133
3.8. Zemin İyileştirme Yöntemleri.....	134
3.8.1. Jet-Grout yöntemi.....	135
3.8.2. Taş kolon yöntemi.....	141
3.8.3. Stabilizasyon.....	151
3.8.4. Kompaksiyon.....	155
3.8.5. Donatılı zeminler.....	160
3.8.5.1. Geosentetik malzemelerin özellikleri.....	161
3.8.5.2. Geosentetik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri.....	162
3.8.5.3. Geotekstiller.....	162
3.8.5.4. Geogridler.....	163
3.8.5.5. Geomembranlar.....	164
3.8.5.6. Geokompozitler.....	166
3.8.5.7. Geosentetik malzemelerinin kullanım alanları.....	167
4. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU HAT YATAĞI.....	173
4.1. Yüksek Hızlı Demiryolu Hat Yatağı Katmanları.....	175
4.1.1. Balast tabakası.....	175
4.1.2. Alt balast tabakası (subballast).....	176
4.1.3. Dolgu tabakaları.....	177
4.1.3.1. Kullanılacak dolgu malzemelerinin özellikleri.....	178
4.1.3.2. Dolgu yapım yöntemi.....	179
4.1.3.3. Dolguların sıkıştırılması.....	179
4.1.3.5. Dolgu sevi ve şev eğimi.....	181
4.1.4. Taban zemini.....	182
4.1.4.1. Taban zemininin geoteknik olarak sınıflandırılması.....	182
4.1.5. Drenaj.....	184
4.1.5.1. Yeraltı suyunun drenajı.....	184
4.1.5.2. Yüzeysel suların drenajı.....	185
4.2. Demiryolu Hat Yatağının Etkileri.....	188
4.2.1. Hat performansına etkisi.....	188
4.2.2. Bakım ve maliyete etkisi.....	189
5. YAKLAŞIM DOLGU MODELLERİ.....	190
5.1. Proje Bölgesinde Uygulanan Yüksek Hızlı Demiryolu Yaklaşım Dolgu Modelleri ve Yapım Aşamaları.....	193
5.1.1. Köprü yaklaşım dolgu modelleri.....	194

5.1.1.1. Köprü yaklaşım dolgusu modeli (doğal zemin üstü).....	194
5.1.1.2. Köprü yaklaşım dolgusu modeli (doğal zemin altı)	200
5.1.2. Alt geçit / menfez yaklaşım dolgusu modelleri.....	203
5.1.2.1. Alt geçit / menfez yaklaşım dolgusu modeli (doğal zemin üstü).....	203
5.1.2.2. Alt geçit - menfez yaklaşım dolgusu modeli (doğal zemin altı)	206
5.1.3. Geçiş plakları.....	214
6. YAKLAŞIM DOLGU MODELLERİ KARŞILAŞTIRMA ANALİZLERİ	218
6.1. Amaç	219
6.2. Modelleme	220
6.3. Sayısal Analiz	222
6.4. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi	224
6.4.1. Düşey yüklerden kaynaklı oturmaların değerlendirilmesi.....	224
6.4.1.1. Kaya tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları	225
6.4.1.2. Kum tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları.....	227
6.4.1.3. Kil Tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları	229
6.4.2. Toplam oturma.....	231
6.4.2.1. Kaya tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları	233
6.4.2.2. Kum tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları.....	235
6.4.2.3. Kil tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları.....	237
6.5. Sonuçlar	239
7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	240
KAYNAKLAR.....	244
KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER	247
ÖZGEÇMİŞ.....	249

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1.	Türkiye demiryolu ağ haritası	4
Şekil 1.2.	TCDD'nin kullanıma başladığı ilk hızlı tren setleri.....	5
Şekil 1.3.	Ankara – İstanbul yüksek hızlı demiryolu projesi ve etapları	7
Şekil 1.4.	Ankara – İstanbul 2. Etap proje kesimleri	7
Şekil 2.1.	Tünel, yarma, dolgu, altgeçit, viyadük ve drenaj yapılarının bir arada görüntüsü	9
Şekil 2.2.	İki taraflı hendek yarmanın kazılması, kaya bulonu püskürtme beton ve çelik hasır ile tahkimatı.	10
Şekil 2.3.	Gabyonlar ile kaplanmış çift taraflı yarma	10
Şekil 2.4.	Gabyonlar ile yarma şev koruma imalatı.....	11
Şekil 2.5.	Gabyonlar ile kaplanmış çift taraflı yarma	11
Şekil 2.6.	İki tünel arasında kademeli olarak serme+ sıkıştırma+ sulama ile yapılan kaya dolgular.....	12
Şekil 2.7.	Demiryolu hat döşeme seviyesine getirilmiş güzergah dolgusu.....	13
Şekil 2.8.	Yüksek Hızlı demiryolu güzergahında Jet Grouting ile zemin iyileştirilmesi.	14
Şekil 2.9.	Jet grouting deneme kazıklarının oluşturulması ve kontrolü.....	14
Şekil 2.10.	Kazık makinası ile delgi ve donatının yerleştirilmesi.	15
Şekil 2.11.	Viyadük ayak temeli donatısının döşenmesi ve fore kazık filizlerine bağlanması	16
Şekil 2.12.	Viyadük temeli ve ayak elevasyon donatılarının döşenmesi.....	16
Şekil 2.13.	Elevasyon ve başlık kirişi tamamlanan viyatüklere ön germeli girişlerin konulması	17
Şekil 2.14.	İmalatı tamamlanan yüksek hızlı tren viyadüğü	17
Şekil 2.15.	Tünel delme makinasının boy kesit görünüşü	19
Şekil 2.16.	Yüksek hızlı demiryolu yapımında kullanılan TBM'in tünel giriş ağzında montajdan sonra boy görünümü	19
Şekil 2.17.	Yüksek hızlı demiryolu yapımında kullanılan TBM'in kesici kafa ön görünüşü	20
Şekil 2.18.	TBM ve NATM yöntemin yapılış metodolojisi.....	21
Şekil 2.19.	Tünel portal yapısının oluşturulması.....	22
Şekil 2.20.	Tünel portal yapısının oluşturulması.....	22
Şekil 2.21.	Tünel Kanopi Yapısının Oluşturulması.....	23
Şekil 2.22.	Kanopi yapısının bir kısmı portal dışında oluşturularak ayna giriş emniyeti sağlanır.	23
Şekil 2.23.	Patlayıcı malzemenin deliklere doldurulması sonrasında gecikmeli kapsüller ile sıralı patlatma yapılması için patlatma bağlantılarının yapılması.	24
Şekil 2.24.	Sağlam kaya sınıfında patlatma sonrası oluşan pasa.....	25
Şekil 2.25.	Zayıf zeminde hidrolik kırıcı kafalı makine ile kazı işlemi.....	25
Şekil 2.26.	Çıkan pasanın nakli lastikli veya paletli yükleyiciler ve kamyonlar ile sağlanır.	26
Şekil 2.27.	Üst yarı çelik hasır ve iksasının montajı.....	27

Şekil 2.28.	Üst yarı kaya bulon deliklerinin hazırlanması.	27
Şekil 2.29.	Üst yarı kaya bulon deliklerinin çimento+su enjeksiyonu ile doldurulması.	27
Şekil 2.30.	Üst yarı kaya bulonlarının sürülmesi.....	28
Şekil 2.31.	Altyarının sağ ve sol taraflı ilerletilmesi.	28
Şekil 2.32.	Altyarının sağ ve sol taraflı ilerletilmesi. Kazı sonrası tahkimatın yapılması. Çelik iksa, çelik hasır ve püskürtme beton uygulaması.	29
Şekil 2.33.	Tünel üstyarı ve altyarı görünüş.....	29
Şekil 2.34.	Tünel üstyarı + altyarı + invert kazısı tamamlanmış.....	30
Şekil 2.35.	Tünel taban (invert) donatılarının döşenmesi	30
Şekil 2.36.	Tünel taban (invert) donatılarının döşenmesi ve beton dökümü.....	31
Şekil 2.37.	Su yalıtımı için membran uygulaması.....	31
Şekil 2.38.	Membran uygulaması sonrası nihai kaplama kemer betonu donatısının döşenmesi	32
Şekil 2.39.	Yürüyen kalıp ile kaplama kemer betonu yapımı	32
Şekil 2.40.	Yürüyen kalıbın dışarıda görünüşü	33
Şekil 2.41.	Yürüyen kalıp ile kaplama kemer betonu yapımı	33
Şekil 2.42.	Tünelin nihai hali.	34
Şekil 2.43.	Aç-kapa ve flüt yapılarının imalatı.....	34
Şekil 2.44.	Aç-kapa ve flüt yapılarının imalatı.....	35
Şekil 2.45.	Aç-kapa ve flüt yapılarının imalatı.....	35
Şekil 2.46.	Tünel nihai hali. Kablo kanallarının ve demiryolu üst yapısının döşenmesi	36
Şekil 2.47.	Demiryolu alt geçidi.....	37
Şekil 2.48.	Demiryolu üstgeçit toprakarme imalatı	37
Şekil 2.49.	Demiryolu altında hidrolik menfez	38
Şekil 2.50.	Yüksek Hızlı Tren Hattı Tip En Kesiti.....	40
Şekil 2.51.	Bazalt nitelikli balast	41
Şekil 2.52.	Balastın demiryolu araçları ile nakliyesi	43
Şekil 2.53.	Tabaka balastın kamyon ve grayder vasıtasıyla serilmesi.....	43
Şekil 2.54.	Serilen balast tabakası kalınlığının kot kazıkları yardımı ile kontrolü.....	44
Şekil 2.55.	Finisher ile birinci tabaka balast serilmesi.....	44
Şekil 2.56.	Serilen birinci tabaka balastın silindir ile sıkıştırılması (vibrasyonsuz).....	45
Şekil 2.57.	İkinci tabaka balast serilmesi.	45
Şekil 2.58.	İkinci tabaka balastın hatta serilmiş durumu.	46
Şekil 2.59.	Yol serme makinası ile panellerin döşenmesi.....	47
Şekil 2.60.	Yol serme makinası ile panellerin döşenmesi.....	47
Şekil 2.61.	Yol serme makinası ile panellerin döşenmesi.....	48
Şekil 2.62.	Yol serme makinası ile panellerin döşenmesi.....	48
Şekil 2.63.	Travers aparatı ile travers döşenmesi.	49
Şekil 2.64.	Travers aparatı ile travers döşenmesi.	49
Şekil 2.65.	Rayların hatta döşenmesi.	50
Şekil 2.66.	Rayların hatta döşenmesi	50
Şekil 2.67.	Contaların kaynağa hazırhale getirilmesi	52
Şekil 2.68.	Kaynak öncesi masterlama işleminin yapılması.	52
Şekil 2.69.	Kaynak kalıbının bağlanması.	52

Şekil 2.70.	Kaynak potasının hazırlanması.....	53
Şekil 2.71.	Kaynak potasındaki termitin yakılarak kaynak yapılması.....	53
Şekil 2.72.	Eriyik halindeki alümino termitin soğumaya bırakılması.....	54
Şekil 2.73.	Kaynak fazlalıklarının kabaca alınması.....	54
Şekil 2.74.	Mobil makinalı alın kaynağı yapılması.....	55
Şekil 2.75.	Mobil ray alın kaynağı makinası.....	56
Şekil 2.76.	Elektrikli direnç alın kaynağı.....	56
Şekil 2.77.	Kaynakların taşlanması.....	57
Şekil 2.78.	Direk ve ankraj Temelerinin İşaretlenmesi.....	59
Şekil 2.79.	Kazısı yapılmış direk temeli.....	59
Şekil 2.80.	Direk temeli karotu ve akraj temeli demiri.....	60
Şekil 2.81.	Direk Temeline Beton Dökümü.....	60
Şekil 2.82.	Karot Kalıbı Sökülmüş Direk Temeli.....	61
Şekil 2.83.	Kumlası Yapılmış Direk.....	61
Şekil 2.84.	Çember Betonu.....	62
Şekil 2.85.	Çift Konsollu Direk Sabit Parça Montajı.....	63
Şekil 2.86.	Portal Montajı.....	64
Şekil 2.87.	Montajı tamamlanmış portallar.....	64
Şekil 2.88.	Enerji kablolarının çekilmesi.....	65
Şekil 2.89.	Enerji kablolarının çekilmesi.....	65
Şekil 2.90.	Enerji kablosunun bağlantılarının yapılması.....	66
Şekil 2.91.	Tamamlanmış elektrifikasyon sistemi.....	66
Şekil 2.92.	Tünel içi şez imalatı.....	67
Şekil 2.93.	Tamamlanmış elektrifikasyon sistemi viyadük üzerinde.....	67
Şekil 2.94.	Viyadük üzeri kablo kanallarının döşenmesi.....	69
Şekil 2.95.	Dolgu üzeri kablo kanallarının döşenmesi.....	69
Şekil 2.96.	İstasyon girişi cüce sinyal.....	72
Şekil 2.97.	Anayol sinyal sistemleri.....	72
Şekil 2.98.	İstasyon giriş sinyalleri.....	73
Şekil 2.99.	Güç trafosu.....	73
Şekil 2.100.	Güç trafo tesisi.....	74
Şekil 2.101.	Haberleşme sistemi teknik bina iç donanım.....	74
Şekil 3.1.	Gözlem çukuru açılması.....	82
Şekil 3.2.	Karotlu zemin sondaj makinesi, kule vinç ve karotiyer tij boruları.....	84
Şekil 3.3.	Karotlu zemin sondaj makinesi, sondör ve helezon tij boruları.....	84
Şekil 3.4.	Karot sandıkları, numaralandırılması ve karot yerleşimi.....	85
Şekil 3.5.	Arazi deneyleri.....	92
Şekil 3.6.	Standard penetrasyon deneyi (SPT) yapılışı.....	93
Şekil 3.7.	CPT deneyi.....	95
Şekil 3.8.	PMT deneyi.....	96
Şekil 3.9.	VST deneyi.....	97
Şekil 3.10.	İnce daneli zeminlerin kıvamı ve kıvam limitleri.....	101
Şekil 3.11.	Schmidt Çekici.....	109
Şekil 3.12.	Örnek şekilleri; a) çapsal, b) eksenel, c) blok d) düzensiz şekilli.....	111
Şekil 3.13.	Doğrudan çekme deneyi için yükleme presi.....	113
Şekil 3.14.	Doğrudan çekilme deneylerinde örneğin konumu ve yükleme başlığı türleri.....	113

Şekil 3.15.	Brazilian deney düzeneği.....	114
Şekil 3.16.	Brazilian deneyinde kullanılacak olan örnekler.....	114
Şekil 3.17.	Tek eksenli sıkışma deney düzeneği	115
Şekil 3.18.	Üç eksenli deney düzeneği.....	116
Şekil 3.19.	Deney yükleme ünitesi.	116
Şekil 3.20.	Taşınabilir kaya makaslama düzeneği.....	117
Şekil 3.21.	Örnek hazırlama kalıpları	117
Şekil 3.22.	Sonik hız deneyi gereçleri ve bağlantıları.....	118
Şekil 3.23.	Demiryolu güzergahının jet- grout ile iyileştirilmesi	136
Şekil 3.24.	Jet- grout uygulama aşamaları	138
Şekil 3.25.	Jet- grout ile oluşan kolonlar.....	138
Şekil 3.26.	Jet- grout uygulama şekilleri.....	140
Şekil 3.27.	Taş kolon uygulaması.....	143
Şekil 3.28.	Taş kolon uygulaması.....	143
Şekil 3.29.	Taş kolon vibroprob	144
Şekil 3.30.	Taş kolon Vibroprob kesiti	145
Şekil 3.31.	Taş kolon yapım aşamaları	145
Şekil 3.32.	Taş kolon taşıma şekli	146
Şekil 3.33.	Taş kolon oluşturulması.....	146
Şekil 3.34.	Taş kolon Islak uygulama	147
Şekil 3.35.	Taş kolon yükleme deneyi	149
Şekil 3.36.	Taş kolon Taş kolon yükleme deneyi.....	149
Şekil 3.37.	Taş kolon Taş kolon yükleme deneyi.....	150
Şekil 3.38.	Taş kolon Taş kolon yükleme deneyi.....	150
Şekil 3.39.	Düz tekerlekli silindir	157
Şekil 3.40.	Lastik tekerlekli silindir	157
Şekil 3.41.	Keçi ayaklı silindir	158
Şekil 3.42.	Vibrasyonlu el kompaktörü	159
Şekil 3.43.	Tokmak	159
Şekil 3.44.	Geogridlerin kenetlenme prensibi ve yanal hareketleri önlemesi.....	172
Şekil 3.45.	Su yalıtımı için metro inşaatında uygulanan polietilen esaslı geomembranlar.....	166
Şekil 3.46.	Geokompozitler (geogrid + geotekstil).....	167
Şekil 3.47.	Demiryolu hat yatağı için geokompozit (geogrid + geomembran) uygulaması. Hatta serilmesi.....	169
Şekil 3.48.	Geokompozit üzerine granül malzeme serilmesi.....	169
Şekil 3.49.	Geokompozit ve granül malzeme üzerine dolgu malzemesi serilmesi.....	170
Şekil 3.50.	Geokompozit uygulama katmanları (granül malzeme + geokompozit + granül malzeme + dolgu malzemesi)	170
Şekil 3.51.	Geokompozit uygulama katmanları	171
Şekil 3.52.	Demiryolu hat yatağı için hücresel grid uygulaması.....	171
Şekil 3.53.	Geogrit malzemesinin balast altına uygulanması.....	172
Şekil 3.54.	Geokompozit malzemesinin travers altına uygulanması.	172
Şekil 4.1.	Demiryolu hattının bileşenleri	173
Şekil 4.2.	Demiryolu hat yapısı ve bileşenleri.....	174
Şekil 4.3.	Demiryolu hat tabakaları	175
Şekil 4.4.	Oturma plakası bileşenleri	181

Şekil 4.5.	Demiryolu sandık yarmasının gabyonlar ile kaplanmış hali	182
Şekil 4.6.	Altyapıya nüfuz eden suyun kaynakları	185
Şekil 4.7.	Yüzey ve derin drenaj yapıları	186
Şekil 4.8.	Derin drenaj yapısı en kesit.....	186
Şekil 4.9.	Yüzey drenaj kanalları.....	187
Şekil 4.10.	Dolgu altı taban drenaj uygulaması.....	187
Şekil 5.1.	ADIF (İSPANYA) - Yaklaşım Dolgu Modeli	191
Şekil 5.2.	DB (Almanya) Yaklaşım Dolgu Modeli	191
Şekil 5.3.	DB (Almanya)- 2 Yaklaşım Dolgu Modeli	192
Şekil 5.4.	RFI(İTALYA) Yaklaşım Dolgu Modeli.....	192
Şekil 5.5.	SNCF(FRANSA) Yaklaşım Dolgu Modeli	193
Şekil 5.6.	Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri).....	195
Şekil 5.7.	Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) Boy Görünüşü	197
Şekil 5.8.	Resim: Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) En Görünüşü.....	197
Şekil 5.9.	Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) Üstten Görünüş.....	198
Şekil 5.10.	Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) Kenar ayak Görünüşü.....	198
Şekil 5.11.	Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) Kenar ayak Görünüşü.....	199
Şekil 5.12.	Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) Kenar ayak Görünüş.....	199
Şekil 5.13.	Köprü Yaklaşım dolgusu (Doğal Zemin Altı)	201
Şekil 5.14.	Köprü Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada)	202
Şekil 5.15.	Köprü Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada)	203
Şekil 5.16.	Altgeçit / Menfez Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üstü).....	204
Şekil 5.17.	Menfez Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Üzeri (Dolguda)	206
Şekil 5.18.	Menfez Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Üzeri (Dolguda)	206
Şekil 5.19.	Altgeçit / Menfez Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Altı)	208
Şekil 5.20.	Altgeçit Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada)	210
Şekil 5.21.	Altgeçit Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada)	210
Şekil 5.22.	Altgeçit Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada)	211
Şekil 5.23.	Menfez Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada) Zayıf zeminin Jeokompozit (Jeotekstil + Jeogrid) ile iyileştirilmesi.....	211
Şekil 5.24.	Menfez Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada) Zayıf zeminin Jeokompozit (Jeotekstil + Jeogrid) ile iyileştirilmesi.....	212
Şekil 5.25.	Menfez Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada) Zayıf zeminin Jeokompozit (Jeotekstil + Jeogrid) ile iyileştirilmesi.....	212
Şekil 5.26.	Menfez Yaklaşım Dolgusu. Sol Taraf Doğal Zemin Üzeri(Dolguda) Sağ Taraf Doğal Zemin Altı (Yarmada)	213
Şekil 5.27.	Altgeçit Yaklaşım Dolgusu Bir Taraf Doğal Zemin Üzeri(Dolguda) Bir Taraf Doğal Zemin Altı (Yarmada)	213
Şekil 5.28.	Altgeçit Yaklaşım Dolgusu Bir Taraf Doğal Zemin Üzeri(Dolguda) Bir Taraf Doğal Zemin Altı (Yarmada)	214
Şekil 5.29.	Geçiş Plağı Tip Kesit.....	215

Şekil 5.30.	İki tünel arası betonarme geçiş plağı.....	216
Şekil 5.31.	İki tünel arası betonarme geçiş plağı.....	216
Şekil 5.32.	İki tünel arası betonarme geçiş plağı.....	217
Şekil 6.1.	Hat yatağında oluşan sorunlar	219
Şekil 6.2.	250 km/saat hıza göre alman dolgu modeli	221
Şekil 6.3.	250 km/saat hıza göre Fransız dolgu modeli.	221
Şekil 6.4.	Sayısal analiz uygulama adımları.....	223
Şekil 6.5.	Kaya tabanlı yaklaşım dolgusunda düşey gerilmeler (Fransız 20 m)	225
Şekil 6.6.	Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında toplam yer değiştirmeler (Fransız 20 m)	226
Şekil 6.7.	Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında gerçekleşen düşey oturma değerleri	226
Şekil 6.8.	Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte düşey yüklerden gerçekleşen oturma değerleri.....	227
Şekil 6.9.	Kum tabanlı yaklaşım dolgusu ortam düşey gerilmeler (Fransız 20 m)	236
Şekil 6.10.	Kum tabanlı yaklaşım dolgularında toplam yer değiştirmeleri (Fransız 20m)	228
Şekil 6.11.	Kum tabanlı yaklaşım dolgularında düşey yüklerden oluşan oturma değerleri	237
Şekil 6.12.	Kum tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte düşey yüklerden gerçekleşen oturma değerleri.....	229
Şekil 6.13.	Kil ortam düşey gerilmeler	238
Şekil 6.14.	Kil tabanlı yaklaşım dolgularında toplam yer değiştirmeler (Alman 20 m)	230
Şekil 6.15.	Kil tabanlı yaklaşım dolgularında düşey yüklerden oluşan oturma değerleri	239
Şekil 6.16.	Kil tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte düşey yüklerden gerçekleşen oturma değerleri.....	231
Şekil 6.17.	Kaya Ortam düşey gerilmeler	233
Şekil 6.18.	Kaya ortam toplam yer değiştirmeler	242
Şekil 6.19.	Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında ekdende gerçekleşen toplam oturma değerleri.....	234
Şekil 6.20.	Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte gerçekleşen toplam oturma değerleri.....	243
Şekil 6.21.	Kum ortam düşey gerilmeler	235
Şekil 6.22.	Kum ortam toplam yer değiştirmeler	244
Şekil 6.23.	Kum tabanlı yaklaşım dolgularında gerçekleşen toplam oturma değerleri	236
Şekil 6.24.	Kum tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte gerçekleşen toplam oturma değerleri.....	245
Şekil 6.25.	Kil ortam düşey gerilmeler	237
Şekil 6.26.	Kil ortam toplam yer değiştirmeler	246
Şekil 6.27.	Kil tabanlı yaklaşım dolgularında gerçekleşen toplam oturma değerleri.....	238
Şekil 6.28.	Kil tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte gerçekleşen toplam oturma değerleri.....	247

TABLolar DİZİNİ

Tablo 3.1. Jeofizik yöntemler ve elde edilen veriler.....	90
Tablo 3.2. Schmidt Çekici Değerlerine Göre Kaya Sertliği Tanımlamaları.	110
Tablo 3.3. Laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen veriler	119
Tablo 4.1. Zemin kalite geoteknik sınıflandırma	178
Tablo 4.2. Zemin kalite sınıfları	183
Tablo 6.1. Sayısal analizlerde kullanılan parametreler	222
Tablo 6.2. Düşey yüklerden kaynaklanan boyuna oturmalar.....	234
Tablo 6.3. Boyuna toplam yer değiştirme.....	232



SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

γ_{n1}	: Yaş yoğunluk (proktor deneyinden), (gr/cm ³)
μV	: Poisson oranı
c	: Kohezyon, (KPa)
D	: Örselenme faktörü
D _e	: Eşdeğer boyut
E	: Elastisite modülü, (GPa)
e	: Boşluk oranı, (%)
Em	: Deformasyon modülü, (MPa)
E _{v2}	: Plaka yükleme deneyinde 2. yükleme ile elde edilen deformasyon modülü
J _v	: Hacimsel eklem sayısı
m_b	: Kaya kütlelerine ait boyutsuz malzeme sabiti
m_i	: Kayaç malzemesine ait boyutsuz malzeme sabiti
n	: Gözeneklilik, (%)
o	: İçsel sürtünme açısı, (°)
P	: Yenilme yükü
SCR	: Süreksizlik yüzey koşulu puanı
SR	: Yapısal özellik puanı
S _r	: Doğunluk derecesi
γ	: Birim hacim ağırlık, (kg/cm ³)
σ	: Basınç direnci, (MPa)
σ_1	: En büyük asal gerilme
σ_3	: En küçük asal gerilme
σ_c	: Tek eksenli basınç direnci, (MPa)
σ_{ci}	: Kaya malzemesinin tek eksenli sıkışma dayanımı, (MPa)

Kısaltmalar

C _C	: Derecelenme Katsayısı
C _U	: Uniformluk Katsayısı
GSI	: Jeolojik Dayanım İndeksi
ISRM	: Uluslararası Kaya Mekaniği Derneği
J _a	: Eklem Ayrışma Sayısı
J _n	: Eklem Takımı Sayısı
J _r	: Eklem Pürüzlülük Sayısı
J _v	: m ³ 'teki Toplam Eklem Sayısı
J _w	: Eklem Suyu İndirgeme Sayısı
K	: Geçirgenlik Katsayısı
Km	: Kilometre

kNm	: KiloNewtonmetre
kW	: Kilowatt
mm	: Milimetre
MPa	: Megapaskal
n	: Porozite
PR	: Anlık İlerleme
Q	: Kaya Kütle Kalitesi
RMR	: Kaya Kütle Sınıflaması
RQD	: Kaya Kalite İndisi
SRF	: Gerilme İndirgeme Faktörüdür
TCDD	: Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demir Yolları
UCS	: Kayaç Malzemesinin Tek Eksenli Sıkışma Dayanımı



YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR VE YAKLAŞIM DOLGU MODELLERİ

ÖZET

Yüksek hızlı demiryollarının yapımında, yüksek geometrik standartlar (maximum eğim üst sınırı, minimum kurp çapı alt sınırı) oturma ve ondülasyonlara yol açmayacak, sağlam altyapı, özel dizayn ve yüksek mukavemetli malzemeler ile üstyapı ve elektrifikasyon sistemlerin oluşturulmasını gerektirir. Yüksek hızlı demiryollarının yapımında, yüksek geometrik standartların sağlanması için, ülkemizin dağlık topografik durumundan dolayı, tünel, viyadük, altgeçit, üstgeçit gibi, yoğun sanat yapısı bulunan hatlar kaçınılmaz olmaktadır. Yüksek hızlı demiryollarının yapımından sonra, işletme aşamasında, dinamik yükler (frenaj ve demeraj) ve statik yükler (dolgu) altında hatta oturmalar muhtemeldir. Yüksek hızlarda, emniyetli ve konforlu bir ulaşımın sağlanması için, muhtemel oturmaların önüne geçilmesi gerekmektedir. Bu çalışmaların işletmecilik aşamasından önce, yapım aşamasında, tespit ve yapılması gerekmektedir. Özellikle rijit sanat yapıları ile rijit olmayan yarma, dolgu geçişlerinde, farklı oturmalarından kaynaklanan sıkıntılar, yüksek hızlarda aşırı hissedilmekte, emniyet ve konfor açısından büyük problem olarak karşımıza çıkmaktadır. Bunun çözümü için, farklı ülkelerin kendi hatlarının ve zemin özelliklerinin durumuna göre geliştirmiş oldukları farklı çözüm uygulamaları mevcuttur. Bu çalışmada, farklı zemin yapılarına göre, farklı uygulamalar ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Geoteknik Çalışmalar, Yaklaşım Dolgu Modelleri, Yüksek Hızlı Demiryolları.

GEOTECHNICAL STUDIES IN HIGH SPEED RAILWAYS AND APPROACH FILL MODELS

ABSTRACT

The fast railway lines, geometry, infrastructure, superstructure and electrification facilities to be built have different features than conventional lines in order to ensure safe and comfortable access at high speeds. In the construction of high-speed railways, high geometric standards (maximum slope upper limit, minimum curve diameter lower limit) require the construction of superstructure and electrification systems with robust infrastructure, special design and high strength materials that will not lead to seating and undulations. In order to achieve high geometric standards in the construction of high-speed railways, lines with dense artistic structures such as tunnels, viaducts, underpasses and overpasses are inevitable due to the mountainous topographical situation of our country. After construction of high-speed railways, dynamic loads (braking and de-embedding) and static loads (fill) are likely to sit down even during operation. In order to ensure safe and comfortable access at high speeds, it is necessary to avoid possible seating. These works need to be identified and done before the operational phase, during the construction phase. Particularly in rigid artworks, non-rigid splitting, filling passages, disturbances caused by different seats are over-felt at high speeds, and there is a big problem in terms of safety and comfort. To solve this, different countries have different solutions for their own lines and background properties that they have developed according to the situation. In this study, different applications are dealt with according to different ground structures.

Keywords: Geotechnical Studies, Approach Fill Models, High Speed Railways.

GİRİŞ

Ulaşım ile kentsel gelişme arasında; fiziksel ilişkiler (yoğunluk artışı, alansal büyüme vb.), önemli ekonomik faktörler (arazi fiyatı, kira değeri, rant, vb.), sosyal faktörler (eşitlik ve dağılım vb.) ve çevresel etkiler (yaşam kalitesi, vb.) bulunmaktadır. Bütün bu faktörler üzerinde kurgulanan ulaşım ve kentsel gelişme arasındaki etkileşimi anlamak için; etken olan bu faktörlerin etkileşim biçimlerinin kentsel ölçekte yansımaları değerlendirilmelidir.

Bu bağlamda demiryollarının projelendirilmesinde amaç; bazı genel kriterlerin yerine getirilerek, demiryollarının sosyal, ekonomik ve ticari hayata olumlu etkiler katmasını sağlamak olmalıdır. Bu amaçlar aşağıda basit şekilde:

- Ülkenin ulaşım sorunlarına uzun süreli çözümler getirilmesi,
- Yapılan proje ile Ülkenin bir demiryolu sistemi ile birbirine bağlanması,
- Ülkenin güvenli, konforlu, dayanıklı şehir içi ve şehirlerarası modern bir demiryolu sistemine kavuşturulması,
- Yolculuk sürelerinin kısalması ve tren yolcusuna daha konforlu bir yolculuk sağlanması,
- Motorlu taşıtlardan çıkan egzoz gazlarından kaynaklanan hava kirliliğinin azalması ve İstanbul'un hava kalitesinin artırılması,
- Ülkedeki araç sayısının azaltılarak tarihi ve kültürel çevrenin korunmasına katkı sağlanması,
- İş ve kültür merkezlerine kolay, rahat ve çabuk ulaşım sağlayarak ülkenin değişik noktalarını birbirlerine yaklaştıracak ve kentin ekonomik yaşamına da canlılık katacak olması,
- Mevcut trafik yükünün hafifletilmesi, Vs. şeklinde sıralanabilir.

Bahsedilen sebeplerden dolayı demiryolu yapımı önem kazanmaktadır. Yüksek Hızlı Demiryolların yapımı ise zaman ve konfor yönünden avantajlarından dolayı, dünyadaki teknik gelişmelerle birlikte son yıllarda hızlanmıştır. Konvansiyonel hatlara göre daha özel tasarım kriterlerine sahip olan yüksek hızlı demiryollarının

tasarım, yapım ve işletmeciliğinde daha fazla teknik ayrıntı ile birlikte, kısıtlı toleranslardan dolayı daha hassas bir yapı söz konusudur.

Bu çalışmada yüksek hızlı demiryollarının yapımında en hassas bölgeler olan yaklaşım dolguları ile geoteknik çalışmalar ele alınmıştır.



1. GENEL BİLGİLER

1.1. Yüksek Hızlı Demiryolu Projeleri

Yüksek hızlı demiryolu projelerinin yapım ve uygulanmasında, yüksek hızlarda güvenli ve konforlu bir taşımacılık yapabilmek için kendine has proje kriterleri ortaya çıkmaktadır.

Bu proje kriterlerinin sağlanması zorunludur ve ülkemiz coğrafyasının özelliklerinden dolayı bu kriterleri sağlayabilmek için yarma - dolgu - tünel- viyadük sanat yapılarının yoğun olduğu projeler kaçınılmaz hale gelmektedir.

1.1.1. Proje kriterleri (Hız- Minimum kurp yarıçapı- Maximum eğim)

Belirlenen güzergah üzerinde arazi koşulları, sanat yapılarının durumu vb. unsurlar göz önüne alınarak proje kriterleri olan maksimum hız, minimum kurp yarıçapı, maksimum eğim miktarları belirlenir. Ülkemizde yapılmış olan Hızlı demiryolu hatlarında uygulanmakta olan maksimum hızlar Ankara-İstanbul hattında 250 km/sa, Polatlı-Konya hattında ise 300 km/sa olup, yapılacak yeni projelerde ise 350 km/sa. lik maksimum hız düşünülmektedir. Bu hız kriterine göre minimum kurp yarı çapı belirlenmektedir. Yine ülkemizdeki yüksek hızlı tren hatlarında minimum kurp yarıçapı 3500 m. olarak belirlenmiştir. Maksimum eğimde ise tüm ülkelerde bir sınırlama getirilmiş olup eğim miktarı % 1,6 olarak belirlenmiştir.

1.1.2. Topoğrafyadan doğan yapılar (yarmalar-dolgular-viyadükler-tüneller)

Ülkemiz yüzey şekilleri bakımından oldukça engebeli bir yapıya sahip olduğundan, yapılacak yüksek hızlı tren güzergahlarında çok miktarda sanat yapılarının bulunmasına yol açmaktadır. Bu aşamada karşılaşılan sanat yapıları köprü ve viyadükler, tüneller ve dolgu ve yarmalardır. Köprü, viyadük, tünel ve istinat yapıları gibi sanat yapılarının gerekliliği güzergah tayini sırasında belirir.

Yine planlanan sanat yapısı uzunluğu güzergah da geometrik zorunlulukların öngördüğü miktarda olacaktır. Köprü, viyadük veya tünel gibi platform genişliğine

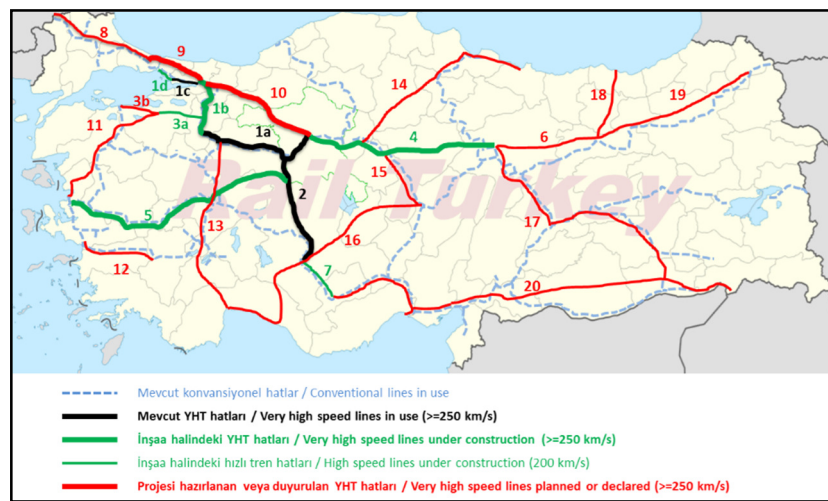
sahip olan yapılarda, platform genişliği hat sayısı, üzerinde seyredecek, araç tipi ve proje hızına bağlı olarak tespit edilecek dinamik gabariye göre belirlenecektir. Köprü, viyadük, tünel ve istinat yapılarında, tüm alternatif tipler - ilk yapım maliyeti - yıllık bakım onarım gideri - inşaat süresi göz önünde tutularak değerlendirilecek ve bu yapılar haritalar üzerine işlenerek hat profilleri oluşturulur.

1.2. Ülkemizdeki Yüksek Hızlı Tren Projeleri

Tüm dünyada demiryolları, ulaşım politikaları açısından, birçok kendine has özelliklerinden dolayı, öne çıkan ve teknolojik gelişmelerle birlikte yenilenerek gelişen bir ulaştırma sistemidir.

Dünya coğrafyasında Avrupa Birliği ülkeleri ve Japonya'nın önderliğinde başlayan yüksek hızlı demiryolu yapımı, tüm dünya ülkelerinin dikkatini çekmiş, avantajları ve teknolojik transferlerinin sayesinde adeta ülkeler arası rekabet ve gelişmişlik unsuru haline gelmiştir.

Ülkemizin de dünyada altıncı ülke olarak yüksek hızlı demiryolu yapında yerini alması gurur vericidir. İlk olarak 2005 yılında ülkemizin iki en büyük kenti olan Ankara – İstanbul arasında yapımına başlanan yüksek hızlı demiryolları çalışmaları, doğudan – batıya, kuzeyden-güneye tüm yurdu saracak şekilde projelendirme ve yapım olarak devam etmektedir (Şekil 1.1, Şekil 1.2).



Şekil 1.1. Türkiye demiryolu ağ haritası [1]

Türkiye'nin işletmeye açılan, çalışmaları devam eden, proje aşamasında olan veya sadece deklere edilmiş tüm hızlı tren hatları [1].

- 1-Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Hattı
- 2-Polatlı-Konya Yüksek Hızlı Tren Hattı
- 3-Osmaneli-Bursa-Bandırma Hızlı Tren Hattı
- 4-Ankara-Sivas Yüksek Hızlı Tren Hattı
- 5-Polatlı-Afyon-İzmir Yüksek Hızlı Tren Hattı
- 6-Sivas-Erzincan Hızlı Tren Hattı
- 7-Konya-Karaman Hızlı Tren Hattı
- 8-Halkalı-Kapıkule Hızlı Tren Hattı
- 9-Gebze-Halkalı Hızlı Tren Hattı
- 10-Sincan-Köseköy Sürat Demiryolu Hattı
- 11-Bursa-Balıkesir-Çandarlı Hızlı Tren Hattı
- 12-Selçuk-Denizli Hızlı Tren Hattı
- 13-Eskişehir-Burdur-Antalya Hızlı Tren Hattı
- 14Delice-Çorum-Samsun-Fatsa Hızlı Tren Hattı
- 15-Yerköy-Kayseri Hızlı Tren Hattı
- 16-Antalya-Konya-Nevşehir-Kayseri Hızlı Tren Hattı
- 17-Sivas-Malatya-Mardin Hızlı Tren Hattı
- 18-Erzincan-Trabzon Hızlı Tren Hattı
- 19-Erzincan-Kars Hızlı Tren Hattı
- 20-Karaman-Mersin-Gaziantep-Habur Hızlı Tren Hattı



Şekil 1.2. TCDD'nin kullanıma başladığı ilk hızlı tren setleri [1]

1.3. Çalışma Bölgesi ve Konusu İle İlgili Genel Bilgi

“Yüksek Hızlı Demiryollarında Geoteknik Çalışmalar ve Yaklaşım Dolgu Modelleri” adlı bu tez içeriğinde anlatılan çalışmalar için uygulama bölgesi Ankara – İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesinin 2.etap olarak adlandırılan Eskişehir, İnönü ilçesi ile İzmit İli Köseköy Bölgesi arasında kalan yaklaşık 158 km lik kısımdır. İlk etap olan Ankara – Eskişehir arasından sonra ülkemizde 2. olarak yapımına başlanan hat olan bu kesim topografik yapısından ve bölgesel özelliklerinden dolayı yoğun sanat yapısı ve zemin iyileştirmeleri içermektedir. Bu sebeple bu bölgede projelendirme ve yapım aşamasındaki geoteknik çalışmalar tezin hazırlanmasında model alınmış ve uygulamadaki sanat yapıları yaklaşımları incelenmiştir.

1.3.1. Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesinin tanıtımı

Türkiye Cumhuriyeti Devletinin ilk hızlı demiryolu projesi olan Ankara- İstanbul yüksek hızlı tren Projesinin toplam uzunluğu yaklaşık 533 km olup, proje 10 ayrı bölümden oluşmaktadır.

Projenin yapım ve işletmeciliği Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları (TCDD) tarafından ünlendirilmiştir (Şekil 1.3). Bu bölümler:

- Ankara-Çınan : 24 Km
- Ankara-Hızlı Tren Garı
- Çınan-Esenkent : 15 Km
- Esenkent-Eskişehir : 206 Km
- Eskişehir Çar Çeşisi
- Eskişehir-İnönü : 30 Km
- İnönü-Vezirhan : 54 Km
- Vezirhan-Köseköy : 104 Km
- Köseköy-Gebze : 56 Km
- Gebze-Haydarpaşa : 44 Km



Şekil 1.3. Ankara – İstanbul yüksek hızlı demiryolu projesi ve etapları [1]

1.3.2. İnceleme alanı ile ilgili genel bilgiler

Bu çalışmaya konu yaklaşım dolgularının bulunduğu bölge; Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi, 2.etap olarak adlandırılan Eskişehir İli İnönü ilçesi ile Bilecik İli Vezirhan İlçesi arasında kalan yaklaşık 54 Km lik bölge (kesim 1) ve Bilecik İli Vezirhan İlçesi ile İzmit ili Köseköy Bölgesi arasında kalan 104 Km lik bölge(kesim 2) olmak üzere yaklaşık 158 km dir (Şekil 1.4).



Şekil 1.4. Ankara – İstanbul 2. Etap proje kesimleri [1]

2. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARININ YAPIM ÇALIŞMALARI

Kesin güzergahı belirlenerek projeleri hazırlanmış olan bir demiryolu inşaatının yapımı üç ana aşamadan oluşmaktadır. Bu aşamalar;

Alt yapı çalışmaları: Tüneller, viyadükler, yarmalar, güzergah dolguları ve yaklaşım dolguları, küçük sanat yapıları(alt geçit- üst geçit ve menfezler), zemin iyileştirme çalışmaları, hat yatağının oluşturulması, drenaj çalışmaları.

Üstyapı çalışmaları: Balastın serilmesi, ray-travers bağlantılarının yapılması, ray kaynağı, hat ekartman ayarları.

Elektrifikasyon ve Sinyalizasyon çalışmaları: Kataner direklerinin dikilmesi, Taşıyıcı konsolların ve elektrik kablolarının tesisi, Sinyal kablo kanallarının ve kabloların döşenmesi, Güç trafo tesisi ve telekomand birimlerinin kurulması.

2.1. Altyapı Çalışmaları

Yüksek hızlı demiryollarında altyapı çalışmaları, detaylı geoteknik çalışmalar sonucu projelendirilmiş olan tüneller, viyadükler, yarmalar, güzergah dolguları ve yaklaşım dolguları küçük sanat yapıları (alt geçit-üst geçit ve menfezler), zemin iyileştirme çalışmaları, hat yatağının oluşturulması, drenaj, gibi yapıların araziye uygulanmasıdır.

Ön projelendirme ve kesin projelendirme kapsamında yapılan çalışmalar ışığında oluşturulmuş projelerin araziye uygulanmasında, yani yapım aşamasında, uygulama sahasındaki vaziyet ile projedeki durumun her zaman tam olarak birbirini karşılması mümkün değildir. Yol projeleri gibi yüzlerce km lik güzergâhı kaplayan büyük projelerde, projelendirme zamanının ve proje bütçesinin yeterli tutulması gerekmez. Aksi takdirde çok fazla belirsizlik ve yeniden projelendirme zaman ve ekonomik yönden büyük kayıplara sebep olabilir.

Belirtilen sebeplerden dolayı ve işin yapım metodolojisinde bulunması itibarı ile yapım aşamasında da geoteknik çalışmalar devam eder (Şekil 2.1).



Şekil 2.1. Tünel, yarma, dolgu, altgeçit, viyadük ve drenaj yapılarının bir arada görüntüsü

2.1.1. Güzergah işleri

Yüksek hızlı demiryolu hat yatağını oluşturulması ve istenilen yerüstü kotunda ilerlenebilmesi için yarmalar, dolgular ile dinamik ve statik yükler altında hat yatağının stabilitesi için gerekli olan zemin taşıma gücünü sağlamak için zemin iyileştirmeleri yapılır.

2.1.1.1. Yarmalar

Demiryolu hat yatağının gerekli kotta oluşturulabilmesi için kazı yapılan bölgelerdir. Kazı yüksekliği arttıkça stabilite problemleri başlar ve şev projelendirmeleri yapılır. Kazılacak bölgenin geoteknik özelliklerine göre tasarım yapılır (Şekil 2.2, Şekil 2.3). Uygulama boyunca sürekli bölgenin takip edilmesi, değişen koşullara göre uygun yarma ıslah yöntemlerinin belirlenip uygulanması gerekmektedir (Şekil 2.4, Şekil 2.5).



Şekil 2.2. İki taraflı hendek yarmanın kazılması, kaya bulonu + püskürtme beton ve çelik hasır ile tahkimatı.



Şekil 2.3. Gabyonlar ile kaplanmış çift taraflı yarma



Şekil 2.4. Gabyonlar ile yarma şev koruma imalatı



Şekil 2.5. Gabyonlar ile kaplanmış çift taraflı yarma

2.1.1.2. Dolgular

Demiryolu hat yatağının gerekli kotta oluşturulabilmesi için uygun özelliklerdeki malzemeler ile yapılan yükseltilmiş bölgelerdir. Zemin taşıma gücü, yüksekliği, kullanılan malzemenin özellikleri ve yapım aşamaları önem taşır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. İki tünel arasında kademeli olarak serme+ sıkıştırma+ sulama ile yapılan kaya dolgular

Güzergah Dolguları:

Demiryolu hat kotunun istenilen seviyeye getirilmesi çalışmaları olup, zemin taşıma özelliklerine göre ıslah edilmiş zemin üzerine, özel gradasyon ve efsaftaki malzemenin kademeli olarak serme, sıkıştırma, sulama, kompaksiyon gibi işlemlerle serilmesidir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Demiryolu hat döşeme seviyesine getirilmiş güzergah dolgusu

Yaklaşım Dolguları:

Yüksek hızlarda emniyetli ve konforlu ulaşımın sağlanabilmesi için uygun geometrik yapının oluşturulması gerekmektedir. Topografik yapı sonucu, uygun geometrinin sağlanabilmesi için yapılması gereken tünel – viyadük gibi sanat yapıları ile hidrolik amaçlı menfezler ile alt geçitlerin demiryolu hat dolguları ile birleşim noktaların, rijit-rijit olmayan yapılar arasında emniyetli ve konforlu geçişi sağlamak amacıyla yapılan dolgular “Yaklaşım Dolguları”dır.

Farklı ülkelerin farklı tasarımlar sonucu geliştirdikleri yaklaşım dolgu modelleri mevcuttur. Bu tez çalışmasında yaklaşım dolgu modelleri ayrıntılı olarak incelemeyecektir.

2.1.1.3. Zemin iyileştirmeler

Yüksek hızlı demiryollarında hat yatağının oluşturulduğu yani üzerine oturduğu zeminin yeterli taşıma gücüne sahip olması, stabil olması gerekmektedir.

Bunu sağlamak içinse zemin koşullarına göre teknik olarak uygun yöntemler seçilerek bir veya birkaçı birlikte uygulanabilir (Şekil 2.8, Şekil 2.9).

Bu yöntemler genel olarak sıralandığında;

- Jet grouting
- Taş kolonlar
- Stabilizasyon (Katkı malzemeleri ile zemin ıslahı)
- Kompaksiyon
- Zemin donatıları



Şekil 2.8. Yüksek Hızlı demiryolu güzergahında Jet Grouting ile zemin iyileştirilmesi



Şekil 2. 9. Jet grouting deneme kazıklarının oluşturulması ve kontrolü

2.1.2. Viyadükler

Yüksek hızlı demiryollarında yapılan viyadüklerin tasarım kriterleri diğer viyadük inşaatlarına göre daha yüksektir. Gerekli taşıma kriterlerinin sağlanması için genellikle zemin yüzeye oturan viyadük temelleri kazıklı olarak projelendirilir.

İmalat aşamasında her bir kazığın yapımı için deliğin açılması, kazı boyunca birimlerin tanımlanması, soket boylarının belirlenmesi, kazık boyunun yerinde karar verilmesi gereken bölgelerde gerekmektedir.

Yani imalat aşamasında geoteknik çalışmalar ve kontroller devam etmektedir (Şekil 2.10, Şekil 2.11, Şekil 2.12, Şekil 2.13, Şekil 2.14).



Şekil 2.10. Kazık makinası ile delgi ve donatının yerleştirilmesi



Şekil 2.11. Viyadük ayak temeli donatısının döşenmesi ve fore kazık filizlerine bağlanması



Şekil 2.12. Viyadük temeli ve ayak elevasyon donatılarının döşenmesi



Şekil 2.13. Elevasyon ve başlık kirişi tamamlanan viyatüklere ön germeli kirişlerin konulması



Şekil 2.14. İmalatı tamamlanan yüksek hızlı tren viyadüğü

2.1.3. Tüneller

Demiryolu hat yatağının gerekli kotta oluşturulabilmesi için yeraltında kazı ve tahkimat ile oluşturulan sanat yapılarıdır. Ülkemizin topografik özelliklerinden dolayı, yüksek hızlı demiryolunun gerekli geometrik özelliklerde imalatının yapılabilmesi için önemli miktarlarda tünel yapıları ortaya çıkmaktadır. Tünel yapıları yüksek maliyetleri ve yapım sürelerinin uzunluğundan dolayı projelerin yapımında en etken sanat yapıları olarak karşımıza çıkmaktadır.

Demiryollarının projelendirme ve yapım aşamalarında en fazla geoteknik çalışma tüneller için yapılmaktadır. Sebebi ise yeraltı yapıları olan tünellerin belirsizlik durumlarının en aza indirgenerek, doğru tahkimat modelinin belirlenmesi ve tünelin sıkıntısız bir şekilde, en ekonomik olarak yapımının sağlanmasıdır.

Açıldığı zemin koşullarına bağlı olarak uygulanan, farklı tahkimat modelleri arasında yapım maliyetleri olarak birbirlerini katlayan maliyet farklılıkları ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple tünellerde yapılacak geoteknik çalışmalar büyük önem taşımaktadır ve ileriki bölümlerde ayrıntılı olarak incelenecektir.

Tam kesit tünel açma makinaları (TBM- Tunnel Boring Machine) ile yada klasik yöntem olan kademeli kazı ve tahkimat yöntemi (NATM - New Austria Tunneling Method) ile tünel imatları yapılır.

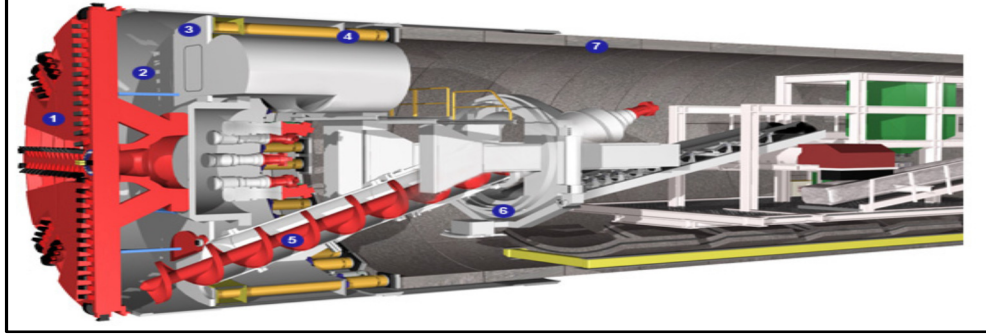
2.1.3.1. Tam kesit tünel açma makinaları (TBM- Tunnel Boring Machine) ile tünel açma

Gelişen teknoloji ile farklı jeolojik koşullarda hızlı ve ekonomik tünel kazımı için geliştirilmiş, kazı ve tahkimatı aynı anda yapabilen tam kesit tünel açma makinaları ile başarılı bir şekilde tünel açmak mümkün hale gelmiştir (Şekil 2.15.).

Makine tasarımları farklı jeolojik- jeoteknik özelliklere göre yapılmaktadır. Uygulanacak bölgede sorun yaşanmaması için bölgenin özelliklerinin tam olarak belirlenmesi ve uygun TBM tipinin seçimi önemlidir.

Genellikle ilk yatırım maliyetinden dolayı uzun tünellerde ekonomik olmakla beraber, farklı zemin koşullarında hızlı bir yöntem olmasından dolayı tercih edilmektedir.

Uygulamada karşılaşılabilecek olumsuzlar karşısında metod değiştirilemeyeceği için diğer yöntemlere göre daha fazla risk içerir (Şekil 2.16, Şekil 2.17).



Şekil 2.15. Tünel delme makinasının boy kesit görünüşü

Tek kalkanlı tünel açma makinesi ve parçaları:

- 1- Kesici kafa,
- 2- Kazı bölmesi,
- 3- Basınç bölümü,
- 4- İtme silindirleri,
- 5- Burgu konveyör,
- 6- Erektör,
- 7- Prekast beton segmentlerdir.



Şekil 2.16. Yüksek hızlı demiryolu yapımında kullanılan TBM'in tünel giriş ağzında montajdan sonra boy görünümü



Şekil 2.17. Yüksek hızlı demiryolu yapımında kullanılan TBM'in kesici kafa ön görünüşü

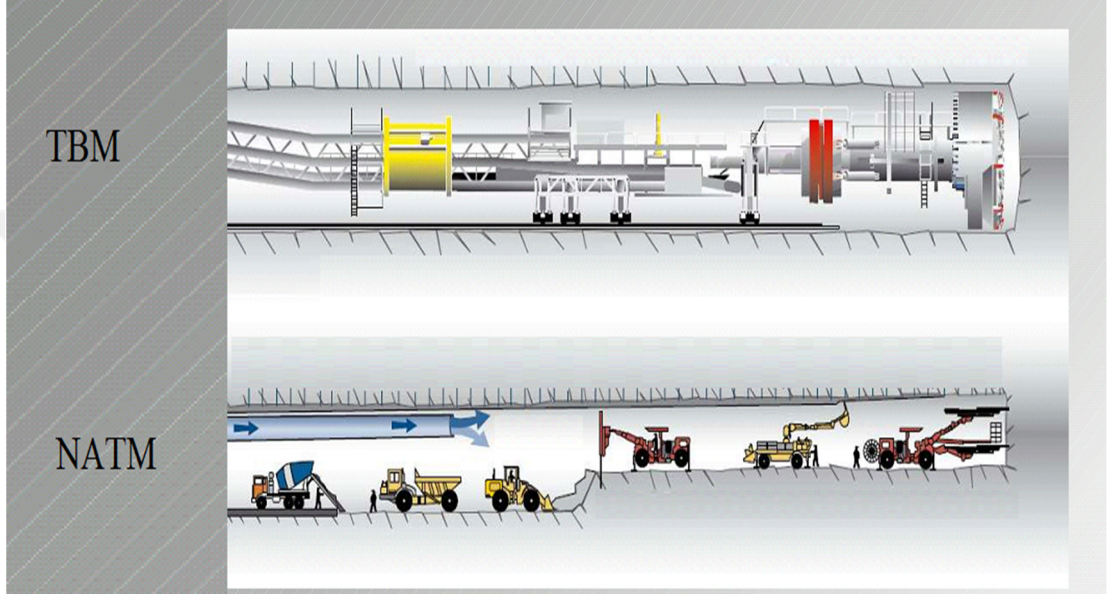
TBM ve Geleneksel yöntemin yapılış metodolojisi Şekil 2.18 de gösterilmiştir. Jeolojik şartların uygun olması durumunda makine ile tünel açılmasının üstünlükleri:

1. Düzgün, pürüzsüz bir yüzey elde edilir. Bu şekilde bir kesit en yüksek duyarlılığı ve gerilmelerin tünel etrafında en uygun dağılımını sağlar.
2. Patlatma tahribatı olmadığından tünel etrafındaki kaya ilk kaya hali ile kalır. Bunun sonucu olarak daha az bir iksa gerekir.
3. Yerleşme ve sanayi alanlarının yakınında veya içindeki sık tüneller, tahribata sebep olabileceğinden patlatma ile açma yerine, ekonomik olup olmadığına bakılmaksızın makine ile açma işlemi uygulanır.
4. Daha az insan gücüne ihtiyaç duyulmasıdır.

TBM nin kullanımını sınırlayan durumlar ise aşağıda sıralanmıştır;

1. Başlangıçta yatırılacak para, makinenin maliyeti dolayısı ile çok fazladır. Bu nedenle kısa tünellerde ve orta uzunlukta olan çok geniş tünellerde kullanışlı değildir.
2. Kayanın yumuşak kesiminde tünel doğrultu ve eğiminin kontrolü zor olabilir.
3. Aynada çalışılabilecek olan genişlik çok sınırlıdır.

4. Kaya şartlarının değişmesi durumunda gerekli teknik ve malzeme ayarlamaları daha zordur.
5. Çok sert kayalarda makine ile tünel açımının maliyeti yüksektir.
6. TBM'lerinin hareket kabiliyeti alışıgelmiş tünelcilikte kullanılan ekipmanlara göre daha azdır. Bu tür hareket kabiliyetini, küçük çaplı dönüşler olması halinde veya baca ile açılan tünellerde önemli bir sakınca olabilir.



Şekil 2.18. TBM ve NATM yöntemin yapılış metodolojisi

2.1.3.2. Konvansiyonel tünel açma yöntemi (NATM - New Austria Tunneling Method)

Tünelcilikte, yeni bir anlayışın ortaya çıkmasına yol açan "Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM)" tünelin, içinde açıldığı kaya ortamına kendi kendini taşıtma ilkesine dayanır.

Yöntemin prensibi, en uygun kazı ve sağlamlaştırma yöntemleri kullanılarak kazı sonrasında oluşacak ikincil gerilme ve deformasyonların, kaya yapısının stabilitesini bozmayacak şekilde denetlenmesi, yönlendirilmesi ve kayaçların ilk sağlamlığını olabildiğince koruyarak boşluğu çevreleyen bölgenin kendi kendini tutan ve taşıyan bir statik sistem oluşturulmasıdır. Yöntemde kayacın yük taşıma kapasitesi kullanılır hale getirilerek kayaç yük oluşturulan ortamdaki yük taşıyıcı ortama dönüştürülür.

Tünel açımı tünel giriş portalının hazırlanması ile başlar. Bunun için tünel alın sevi ve yan palyeler imal edilirler (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Tünel portal yapısının oluşturulması

Tünele emniyetle girebilmek ve giriş-çıkış aynalarını oluşturulmak amacıyla projesine uygun olarak portal yapıları oluşturulur (Şekil 2.20).



Şekil 2.20. Tünel portal yapısının oluşturulması

Portal yapılarının kazı ve şev desteklemeleri tamamlandıktan sonra tünele girmek için kanopi yapısı oluşturulur. Tünel eksenini işaretlenir ve güvenli bir şekilde tünele girilebilmesi için süren uygulaması eksen boyunca yapılır (Şekil 2.21)



Şekil 2.21. Tünel Kanopi Yapısının Oluşturulması

Üstyarı kazısından önce kanopi kapısı oluşturulur. Çelik iksalar kısa aralıklarla birleştirilir ve püskürtme beton uygulamasının yapılabilmesi için ince delikli tel örgüler kullanılır (Şekil 2.22).



Şekil 2.22. Kanopi yapısının bir kısmı portal dışında oluşturularak ayna giriş emniyeti sağlanır

Kanopi iksalarının kurulması tamamlandığında tünel aynası hazır hale gelmiş olur ve kazı işlemine başlanılır.

Tünel Aynası Üstyarı Kazısı:

Tünel aynası oluşturulduktan sonra sağlam zeminlerde patlatma ile, zayıf zeminlerde iş makineleri ile üstyarı kazısı yapılır.

Patlatma ile kazılan tünellerde patlatma paterni önem taşır. Tünelin istenilen geometride kazılabilmesi uygun patlatma dizaynı ile mümkün olur. Hatalı patlatma tünel geometrisini bozabileceği gibi maddi zararlarada yol açar. İstenilenden küçük çapta patlatma ilave makinalı kazı gerektirdiği gibi, istenilenden büyük çapta patlatma fazla beton ve tahkimat malzemesi demektir (Şekil 2.23, Şekil 2.24, Şekil 2.25,).



Şekil 2.23. Patlayıcı malzemenin deliklere doldurulması sonrasında gecikmeli kapsüller ile sıralı patlatma yapılması için patlatma bağlantılarının yapılması



Şekil 2.24. Sağlam kaya sınıfında patlatma sonrası oluşan pasa



Şekil 2.25. Zayıf zeminde hidrolik kırıcı kafalı makine ile kazı işlemi

Kazı esnasında operatöre yerde görevli, uzman bir çalışan eşlik ederek zemin davranışına göre kazı şeklini belirler (Şekil 2.26).



Şekil 2.26. Çıkan pasanın nakli lastikli veya paletli yükleyiciler ve kamyonlar ile sağlanır

Tünel Üstyarı Tahkimatı:

Kullanılan tahkimat elemanları çelik iksalar, çelik hasır, püskürtme betonu, kaya bulonları ve boru sürenlerdir (Şekil 2.27-Şekil 2.46).



Şekil 2.27. Üst yarı çelik hasır ve iksasının montajı



Şekil 2.28. Üst yarı kaya bulon deliklerinin hazırlanması



Şekil 2.29. Üst yarı kaya bulon deliklerinin çimento+su enjeksiyonu ile doldurulması



Şekil 2.30. Üst yarı kaya bulonlarının sürülmesi



Şekil 2.31. Altyarının sağ ve sol taraflı ilerletilmesi



Şekil 2.32. Altyarının sağ ve sol taraflı ilerletilmesi. Kazı sonrası tahkimatın yapılması. Çelik iksa, çelik hasır ve püskürtme beton uygulaması



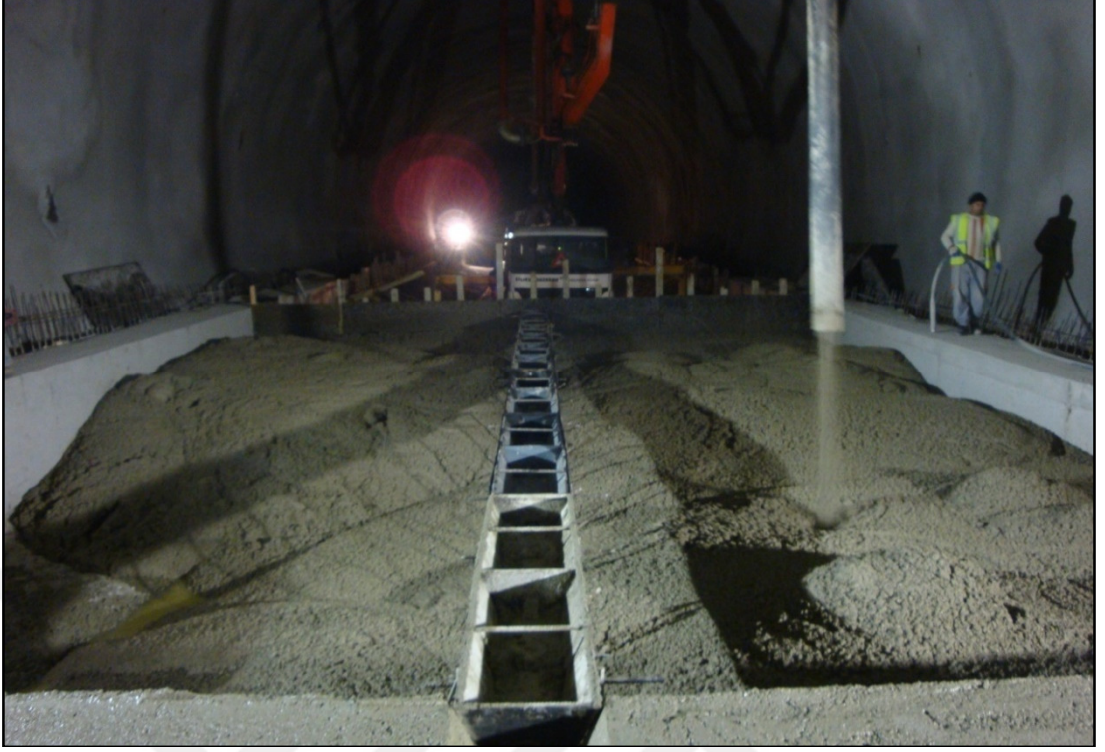
Şekil 2.33. Tünel üstyarı ve altyarı görünüş



Şekil 2.34. Tünel üstyarı + altyarı + invert kazısı tamamlanmış



Şekil 2.35. Tünel taban (invert) donatılarının döşenmesi



Şekil 2.36. Tünel taban (invert) donatılarının döşenmesi ve beton dökümü



Şekil 2.37. Su yalıtımı için membran uygulaması



Şekil 2.38. Membran uygulaması sonrası nihai kaplama kemer betonu donatısının döşenmesi



Şekil 2.39. Yürüyen kalıp ile kaplama kemer betonu yapımı



Şekil 2.40. Yürüyen kalıbın dışarıda görünüşü



Şekil 2.41. Yürüyen kalıp ile kaplama kemer betonu yapımı



Şekil 2.42. Tünelin nihai hali



Şekil 2.43. Aç-kapa ve flüt yapılarının imalatı



Şekil 2.44. Aç-kapa ve flüt yapılarının imalatı



Şekil 2.45. Aç-kapa ve flüt yapılarının imalatı



Şekil 2.46. Tünel nihai hali (Kablo kanallarının ve demiryolu üst yapısının döşenmesi)

2.1.4. Küçük sanat yapıları

Demiryolu platformunun altından ve üzerinden çeşitli amaçlarla geçişlerin sağlanması için yapılan sanat yapılarıdır. Genellikle hidrolik geçişler ve aktarma yapıları (doğalgaz , su, elektrik vs.) için menfezler, hayvan, insan ve araç geçişleri içinse alt ve üst geçitlerin imalatları yapılır.

2.1.4.1. Alt geçitler

Hayvan, insan ve araç geçişlerin sağlanması amacıyla yapılırlar. Kullanım özelliklerine göre çeşitli büyüklüklerde ve üzerindeki dolgu yükü ile tren dingil basıncı yükleri hesap edilerek tasarlanırlar. Devamlı surette dinamik yüklerin etkisinde olacağından genellikle tabanlarında iyileştirme yapılarak imalatları gerçekleştirilir. Her iki taraflarında da yaklaşım dolgu imalatları yapılmalıdır (Şekil 2.47).



Şekil 2.47. Demiryolu alt geçidi

2.1.4.2. Üst geçitler

Genellikle araç geçişlerin, demiryolu üzerinden sağlanması amacıyla yapılırlar. Demiryolu ulaşım servis yolları ve imar yollarının geçişlerinin de kapsayacak şekilde tasarlanırlar.

Yüksek voltajlı elektrifikasyonlu hatlar olduğu için üzerinde gerekli tedbirler alınmış şekilde projelendirilirler (Şekil 2.48).



Şekil 2.48. Demiryolu üstgeçit toprakarme imalatı

2.1.4.3. Menfezlerler

Hidrolik amaçlı yapılan geçişlerdir. Yerüstü yağmur sularının geçişlerin ve drenajlarının sağlanması için havza hesapları yapılarak gerekli görülen boyutlarda tasarlanırlar. Devamlı surette dinamik yüklerin etkisinde olacağından genellikle tabanlarında iyileştirme yapılarak imalatları gerçekleştirilir. Her iki taraflarında da yaklaşım dolgu imalatları yapılmalıdır (Şekil 2.49).



Şekil 2.49. Demiryolu altında hidrolik menfez

2.1.5. Hat yatağının oluşturulması (alttemel- seçme malzeme ve subbalast)

Demiryolu üst yapısının (balast- travers - ray) üzerine oturacağı, dolayısıyla milimetrik ölçüde hassas olarak, özel gradasyon ve efsaftaki malzeden, özel yöntemlerle serilerek imal edilen, aynı zamanda demiryolu alt yapısını koruyan tabakalardır. İleriki bölümde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

2.1.6. Drenaj çalışmaları

Demiryolu hatlarını, yerüstü yağmur suları, nehir taşkınları, sel gelmesi, gibi tehlikelerden korumak amacıyla demiryolu hatları kenarlarına, yarma şevleri ve tünel portal üstlerine yapılan drenaj hendekleri ile yeraltı su seviyesinin yüksek olduğu

bölgelerde mümkün olan yerlerde hat yatağının korunması amacıyla yapılan derin derenej yapılarıdır.

2.2. Üst Yapı Çalışmaları

Demiryollarında; altyapı platformu üzerine oturan, üzerinde trenlerin hareket etmesini sağlayan, trenlerin ağırlığını platforma aktaran, ray, travers, balast ve bağlantı malzemelerinin tamamına üstyapı denir.

Üstyapının görevleri:

- Demiryolu taşıtlarının hareketini sağlayacak, sürtünmenin en aza indirildiği bir yuvarlanma yüzeyi sağlamak,
- Demiryolu taşıtlarından gelen yükleri platforma aktarmak,
- Demiryolu yatay ve düşey eksenlerini ve yol açıklığını korumak olup üstyapının kendisini etkileyen kuvvetlere dayanabilmesi için üstyapı elemanlarının sahip olması gereken özellikler şunlardır;
- Ray kesitlerinin bu kuvvetleri karşılayacak şekilde seçilmesi gerekir.
- Rayların birbirleriyle ve traverslerle bağlantıları yeterince esnek olmalıdır.
- Traversler, etkisi altında kalacağı yüklere dayanacak kesitlere sahip olmalı ve yeterli bir sıklıkla yerleştirilmelidir.
- Balast kohezyonu iyi olmalı, travers-ray çerçevesi yatay kuvvetlere dayanmalı ve yola gerekli esnekliği sağlamalıdır.
- Yolun bakımı, yolun sürekli olarak belirli düzgünlükte korunmasını sağlamalıdır.

Klasik anlamda ifade edilen bir demiryolunda; Demiryolu taşıtlarının tekerlekleri “ray” adı verilen sürekli, iki sıra metalik çubuk üzerinde yuvarlanma hareketi yaparlar.

Raylar da “travers” adı verilen ve rayların altında, onlara dik yönde, belirli aralıklarla yer alan sömellere oturtularak tespit edilmişlerdir. Böylece raylarla traversler çerçeveleri oluştururlar.

Traversler ise “balast” denen bir kırma taş tabakası içine üst yüzeylerine kadar gömülmüşlerdir. Balast tabakası altyapı platformu üzerine serilmiştir. Ayrıca gerek

2.2.1. Balastın serilmesi

Traversler tarafından iletilen tüm etkileri kalıcı çökmelere uğramadan ve daneleri arasındaki sürtünme ile yayarak platforma ileten ve yol çerçevesine elastik bir yatak oluşturan; 30-60 mm. ebadında kırılmış, keskin köşeli ve keskin kenarlı sert ve sağlam taşlara balast denir. Şekil 2.51’de bazalt nitelikli balast gösterilmiştir.



Şekil 2.51. Bazalt nitelikli balast

Yukarıda ki tanımdan da anlaşılacağı üzere demiryolu yapımında kullanılan balastın bazı görevleri vardır. Balastın başlıca görevleri şunlardır:

- Traversten gelen yükleri, platform üzerinde daha geniş alana, homojen olarak yayar.
- Yol çerçevesine elastik bir yatak oluşturur ve yerinde tutar.
- Yolun esnekliğini sağlar.
- Yolu ottan korur.
- Yağmur sularını süzerek dışarı atar ve platformu çamurdan korur.
- Platformu dona karşı korur.
- Traversin toprakla ilişkisini önleyerek çürümesini önler.

Doğada bulunan her kaya malzemesini balast olarak kullanmak mümkün değildir. Granit, siyanit, bazalt, diyabaz, diyolit, sert kalker gibi kayalardan balast yapılabilir. Ancak en ideal balast taşı granit ve bazaltdan elde edilen taşlardır. Balastı oluşturan taşların türleri, dane boyutları, dane şekilleri ve granülometresi ile bu taşların tek olarak ve tabaka halindeki fiziksel ve mekanik özellikleri, yukarıda belirtilen görevleri yerine getirmesi konusunda karar verici faktörlerdir. Bunların yanı sıra iyi bir balast malzemesi bazı özellikler taşmalıdır. İyi bir balastta bulunması gereken özellikler şunlardır:

- Sağlam ve damarsız taştan yapılmalıdır.
- Su geçirimli olmamalı, çok az su emmelidir.
- Aşırı sıcak, soğuk ve yağış gibi hava etkenlerine karşı dayanıklı olmalıdır.
- Çok köşeli, çok yüzlü olmalı, birbirine kaynaşmamalıdır.
- Çok fazla iri ve çok ufak taneli olmamalı, 6 cm. çapındaki elekten geçip 3 cm. çapındaki elekten geçmemelidir.
- Homojen olmalı; içinde toz, toprak, cüruf, ot ve kök parçaları bulunmamalıdır.
- Darbelere karşı dayanıklı olmalıdır.

Klasik demiryolu üst yapısının göstergesi, yol çerçevesinin balast yatağı içinde “yüzer” şekilde yerleştirilmesidir. Balastlı üst yapının bu özelliği; yol çerçevesinin çok hızlı ve kolay şekilde döşenebilmesini, hat geometrisinin, hızların ve ağırlıkların arttırılması hallerinde, son derece basit şekilde değiştirilebilmesini sağlar. Çeşitli balast ocaklarından elde edilen balast malzemesi hatta serilmeden önce, hatta yakın yerlerde fiğüre edilerek depolanırlar. Depolanan bu balastlar kamyonlar veya demiryolu araçları ile (balast vagonları) hatta serilmek üzere taşınırlar (Şekil 2.52).

Subbalastı serilerek altyapısı tamamlanan platform üzerine balast iki aşamada serilir ve 1. ve 2. Tabaka balast serimi olarak adlandırılır. 1. tabaka balastın serimi ise yine yöntemle yapılır. Bunlardan biricisi daha iptidai bir yöntem olan balastın platform üzerine kamyonlarla damp edildikten sonra grayderler ile serilmesi, diğeri ise finisher adı verilen makineler ile serilmesidir. Balastın finisherler vasıtasıyla serilmesi daha uygun bir yöntem olmakla beraber diğeri yöntem de sıklıkla uygulanmaktadır.



Şekil 2.52. Balastın demiryolu araçları ile nakliyesi

Her iki yöntemde de balast tabakası kalınlığı 30 cm. olup, serilen balastın kotları sık sık kot kazıkları yardımı ile kontrol edilmelidir. Balast serimi sırasında en çok dikkat edilecek konulardan bir tanesi de balastın toz ve cüruftan arındırılmış olarak temiz bir şekilde serilmesini sağlamaktır. Balastı sermeden önce subbalast tabakası üzerinde deformasyonlar olup olmadığı kontrol edilmeli, eğer deformasyonlar var ise bunların düzeltilmesinden sonar silindirler yardımıyla subbalastın sıkıştırılarak balastın daha sonra serilmesi sağlanmalıdır. Balast serim aşamaları Şekil 2.53 den Şekil 2.58'e kadar olan şekillerde verilmiştir.



Şekil 2.53. Tabaka balastın kamyon ve grayder vasıtasıyla serilmesi



Şekil 2.54. Serilen balast tabakası kalınlığının kot kazıkları yardımı ile kontrolü



Şekil 2.55. Finisher ile birinci tabaka balast serilmesi



Şekil 2.56. Serilen birinci tabaka balastın silindir ile sıkıştırılması (vibrasyonsuz)

1. Tabaka balast serildikten sonra üzerine ray ve traverslerin döşenerek bir hat oluşturulması gereklidir. Bunu amaç 2. Tabaka balastı serilebilir. Hat oluşturulduktan sonra demiryolu araçları yardımı ile 2. Tabaka Balastın serilmesine başlanır.



Şekil 2.57. İkinci tabaka balast serilmesi



Şekil 2.58. İkinci tabaka balastın hatta serilmiş durumu

2.2.2. Ray-travers bağlantılarının yapılması

Ray ve Traverslerin birbine bağlanması ve hatta döşenmesi işi iki yöntemle yapılmaktadır. Bunlardan birincisi yol serme makinası ile yolun döşenmesi, diğeri ise daha iptidai bir yöntem olan travers ve rayların hatta ayrı ayrı getirilerek birbirine bağlanmasıdır. Bu yöntemde ilk yöntemle oranla daha fazla işçi gücüne ihtiyaç duyulmakta olup, iş süresinin de daha uzun olacağı aşikardır.

Makinalı yol serme makinası ile yol serme işlemi daha kısa sürede yapılmaktadır. Ancak bu yöntemde de yol serme işleminin yapılabilmesi için panel adı verilen 36 m.lik parçalar halinde şantiyede montajlandıktan sonra hatta sevk edilmesi gerekmektedir. Panelleri montajlamak üzere şantiyede traverslerin konulacağı yerleri gösteren bir şablon hazırlanır. Hazırlanan bu şablon yardımıyla paneller hazırlanarak hatta sevk edilmek üzere vagonlara yüklenir. Hatta gelen paneller yol serme makinası ile hatta döşenir (Şekil 2.59- Şekil 2.66).



Şekil 2.59. Yol serme makinası ile panellerin döşenmesi



Şekil 2.60. Yol serme makinası ile panellerin döşenmesi



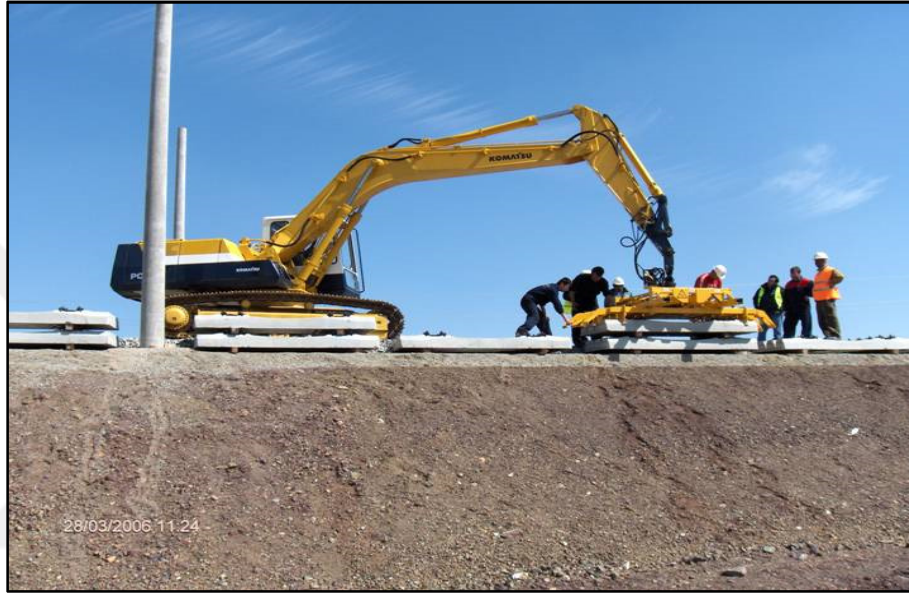
Şekil 2.61. Yol serme makinası ile panellerin döşenmesi



Şekil 2.62. Yol serme makinası ile panellerin döşenmesi

İkinci yöntemde ise ray ve traversler ayrı ayrı hatta sevk edildikten sonra 1. Tabaka balast üzerinde birbirine bağlantıları sağlanır. Bu yöntemde hattın döşenmesini kolaylaştırmak amacıyla bazı basit aparatlardan da faydalanılır.

Bu aparatlardan bir tanesi traversleri altışarlı grup halinde alabilmek amacıyla hazırlanmış olan travers aparatıdır. Bu aparat traversleri 60 cm aralıklarla dizebilmek amacıyla tasarlanmış olup, bir defada 4-6 traversi hatta koyabilmektedir.



Şekil 2.63. Travers aparatı ile travers döşenmesi



Şekil 2.64. Travers aparatı ile travers döşenmesi

Traversler döşendikten sonra hata getirilmiş olan rayların montajı yapılır. Bunun için yine bazı makine ve aparatlardan yararlanılır. Hatta getirilerek traverslere bağlantıları yapılan 36m.'lik raylar "küçük yol malzemesi" adı verilen malzemeler ile birbirine bağlanır. Şekil 2.65 ve 2.66'da rayların hatta döşenmesi çalışmaları gösterilmiştir.



Şekil 2.65. Rayların hatta döşenmesi



Şekil 2.66. Rayların hatta döşenmesi

2.2.3. Ray kaynağı

Ray ek yerleri demiryolunun kuruluşundan beri sorun olmaktadır. Sorunun çözümü için önceleri daha dayanıklı cebireler geliştirilmekte aranmış, ancak yine de yararlı olmamıştır. Dolayısıyla rayların kaynaklanması gündeme gelmiştir.

Ray ek yerleri yolun bozulması açısından sorun yaratmakta, yolun bozulmasının yanı sıra kaynak yapılmayan contalar yolun alt yapısını da bozmakta, ayrıca çeken ve çekilen araçlarda da hasar ve yıpranmalara yol açmaktadır.

Bunun yanı sıra çevre kirliliği (gürültü kirlenmesi) ve çekim gücü zorlukları da yaratmaktadır. Bütün bunlar tamir, bakım ve işletme masraflarını artırmaktadır. Bu nedenle ray kaynağı yapılarak birçok yararlar sağlanmaktadır.

Ray kaynağının esas amacı alt ve üst yapı uygun ise yoldaki hızı artırmaktır. Bunun yanı sıra:

- Yolun tamir ve bakım masraflarını azaltmak
- Contalarda meydana gelen ray kırılmalarını önlemek
- Üst yapı malzemelerinin yıpranmasını önlemek
- Çeken ve çekilen araçlardaki arıza ve yıpranmaları önlemek
- Çevre kirliliği ve sebeplerini ortadan kaldırmak
- Contalarda meydana gelen çekim zorluklarını ortadan kaldırmak
- Konforlu bir seyahat temin etmek gibi başkaca amaçları da mevcuttur

Rayların birbirine kaynaklanmalarını:

- Aliminotermite ray kaynağı
- Elektrikli direnç alın kaynağı
 - Sabit ark-alın kaynağı, (fabrika kaynağı)
 - Mobil alın kaynağı (Seyyar Makine kaynağı) dır.
- Elektrikli ark kaynağı (Dolgu kaynağı)
- Gaz kaynağı

şeklinde sıralayabiliriz.

2.2.3.1. Alüminotermite ray kaynağı

Termit denilen malzemenin ateşe dayanıklı potalar içerisinde eritilerek iki ray arasında bırakılan kaynak aralığına akıtılmak suretiyle yapılan kaynağa alüminotermite ray kaynağı denir (Şekil 2.67-Şekil 2.73).



Şekil 2.67. Contaların kaynağa hazırlanması



Şekil 2.68. Kaynak öncesi masterlama işleminin yapılması



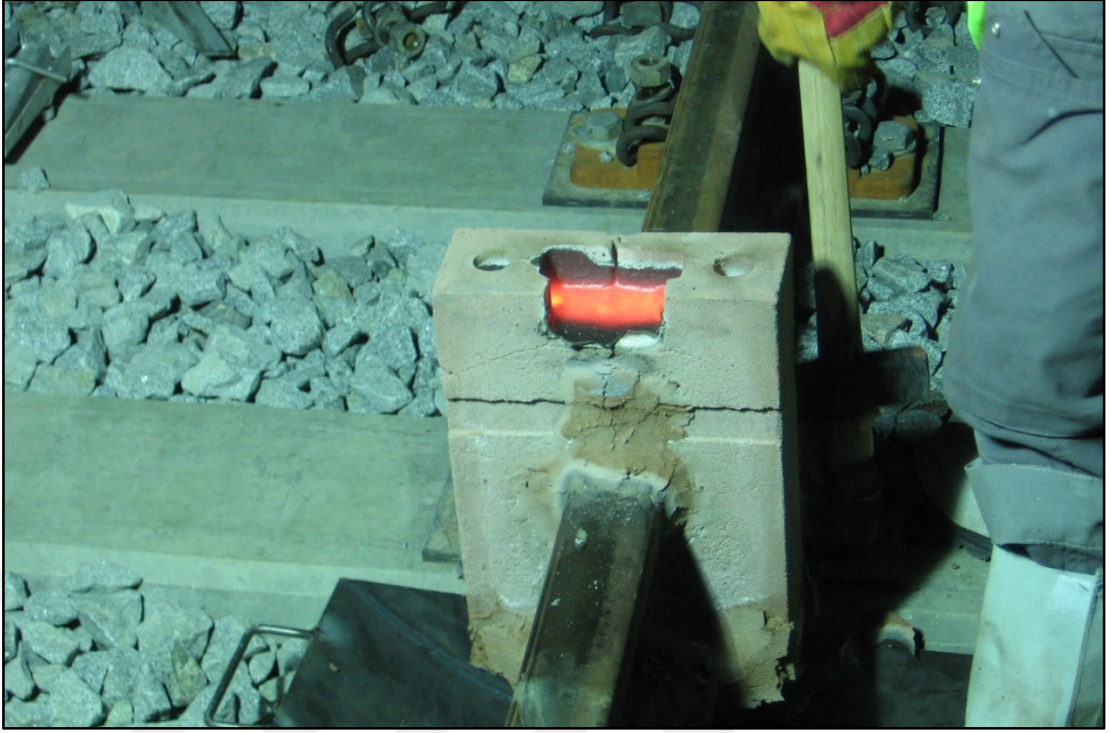
Şekil 2.69. Kaynak kalıbının bağlanması



Şekil 2.70. Kaynak potasının hazırlanması



Şekil 2.71. Kaynak potasındaki termitin yakılarak kaynak yapılması



Şekil 2.72. Eriyik halindeki alümino termitin soğumaya bırakılması



Şekil 2.73. Kaynak fazlalıklarının kabaca alınması

2.2.3.2. Elektrikli direnç alın kaynağı

Elektrikli direnç alın kaynağı iki usulde yapılır; bunlardan ilki sabit ark-alın kaynağı; Fabrikalarda sabit kaynak makineleri ile raylar belirli uzunluğa kadar (168 veya 180 m gibi) kaynaklanır. Kaynaklanan bu raylar özel taşıma vagonları ile kullanım yerlerine sevk edilir. Kullanım yerleri de raylar daha uzun hale getirilmek istendiğinde aliminotermite veya seyyar direnç alın kaynak makineleri ile kaynak yapılır.

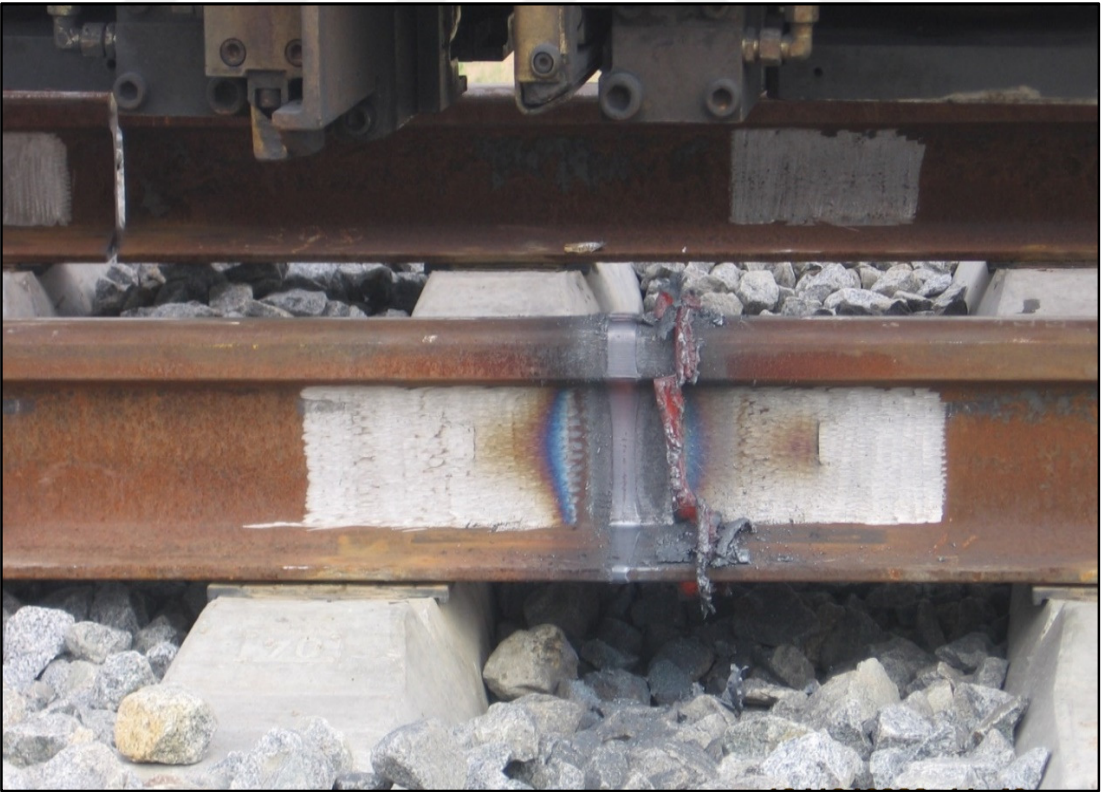
Fabrikalarda yapılan kaynaklar zaman, hava şartları, arazi şartları gibi olumsuzluklar olmadığı için daha ekonomik ve kalitelidir. Tek olumsuz yönü kullanım yerlerine gönderilmede yaşanan gecikme olabilir de diğer avantajların yanında göz ardı edilebilir. Kaynak yapım aşamaları Şekil 2.74 ile Şekil 2.77 arasındaki şekillerde gösterilmiştir.



Şekil 2.74. Mobil makinalı alın kaynağı yapılması



Şekil 2.75. Mobil ray aln kaynağı makinası



Şekil 2.76. Elektrikli direnç aln kaynağı



Şekil 2.77. Kaynakların taşlanması

2.2.4. Hat ekartman ayarları

Demiryolları iki ray iç yanakları arasında kalan mesafeye göre dar hat, geniş hat, normal hat olarak sınıflandırılır. Dünyada genel olarak normal hat kullanılır. İki ray arasında kalan mesafe 1435 mm olduğunda normal hattan bahsedilir. Demiryollarında ki üst yapı ve makinelerin ölçüleri bu değere göre belirlenir.

Ekartman iki döşeli ray arasında, ray mantarı iç yanakları arasındaki yatay mesafeye denir. Ekartman ray mantarı üst seviyesinden 14 mm aşağıdan rayın aşınmamış yerinden ölçülür.

Her traversste ölçülen ekartmanlar arasındaki fark 2 mm'den fazla olmamalıdır. K ve N tipi bağlantılı traverslerde ekartman ölçümünde, varsa selet gezinti payları ölçülen ekartmana ilave edilir. Selet gezintileri en çok dar yarıçaplı kurpların dış ray tarafında görülür.

Doğru yollarda normal hat açıklığı 1435 mm'dir. Ekartman ölçüsü 1426 mm'den az ve 1490 mm'den fazla olduğunda vagon veya makineler deray eder. Yol bakım ve

tamiratında esas olan yolu konfor yol açıklığı toleransı içinde tutmaktır. Bu toleranslar dışına çıkan yol açıklıklarında gerekli müdahaleler yapılmalıdır.

Konfor yol açıklığı toleransının üst sınırı olan 1465 mm yi geçen yol açıklıklarında yola seyir kısıtlaması konularak gerekli tamirat yapılmalıdır. 1465 mm geçen yol açıklığında trenlerin lase hareketleri (yatay gezinti) artacağından selet gezintilerine neden olur ve bu durum gizili yol açıklığına sebep olur. Bu nedenle yola seyir kısıtlaması (Tekayyüdat) konulmalı ve en kısa zamanda tamirat yapılmalıdır.

2.3. Elektrifikasyon Ve Sinyalizasyon Çalışmaları

Yüksek hızlı demiryollarında ulaştırma için kullanılan “hızlı tren seti” olarak tabir edilen araçlar elektrik enerjisi ile hareket etmektedir. Yaklaşık 25000-30000KW lık enerji havaii hat ile yol boyunca demiryolu üzerinde direkler ve taşıyıcı sistemler ile sürekliliği sağlanmaktadır. Hızlı tren setleri üzerinde bulunan pantograph adı verilen iletken çubuğun sürekli olarak enerji taşıyan hatta sürtünmesi ile setlere enerji nakli sağlanmış olur. Oluşturulan bu enerji nakil sistemi elektrifikasyon sistemi olarak adlandırılır.

Demiryolu hatları üzerinde hareket eden demiryolu araçlarının emniyetli bir şekilde trafiğinin düzenlenmesi için kullanılan trafik denetleme sistemlerine genel olarak sinyalizasyon sistemi adı verilir.

2.3.1. Kataner direklerinin dikilmesi

Sahada direk ve ankraj temellerinin yerlerinin ve tiplerinin tespitinin yapılması için harita ekibi, piketaj planı ve temel karnesine göre sahada direk ve ankraj temellerinin yerini tespit eder ve işaretlemesini yapar (Şekil 2.78).

İnşaat ekibi, işaretleme yapılan temelerde, temel karnesindeki direk tipine ve ankraj temeline göre belirtilen ölçülerde çukur kazısını yapar ve çıkan hafriyatı bölgeden uzaklaştırır (Şekil 2.79, Şekil 2.80).



Şekil 2.78. Direk ve ankraj Temelerinin İşaretlenmesi



Şekil 2.79. Kazısı yapılmış direk temeli



Şekil 2.80. Direk temeli karotu ve akraj temeli demiri

İnşaat ekibi, temel karnesindeki direk tipine göre belirtilen ölçülerde karot kalıbının kurulumunu yapar ve terazisini alır. Eğer temel ankraj temeli ise demir çubukları yerleştirilir.

Temel betonlarının dökülmesi: İnşaat ekibi direkler ve ankrajlar için proje şartnamesi ve ilgili standartlara bağlı kalarak hazır beton dökümünü gerçekleştirir ve tesfiyesi alınır (Şekil 2.81).



Şekil 2.81. Direk Temeline Beton Dökümü

Direklerin dikilmesi: İnşaat ekibi, dökülen beton kurduktan sonra karot kalıbını söker ve temel karnesinde belirtilene göre direk dikimini yapar. Direk projesine uygun olarak dikildikten sonra kumlama işlemi yapılır. Son olarak kumlama işleminden sonra direklerin sabit kalması için çember betonları yapılır. Bu aşamalar Şekil 2.82, Şekil 2.83, Şekil 2.84’de gösterilmiştir.



Şekil 2.82. Karot Kalıbı Sökülmüş direk Temeli



Şekil 2.83. Kumlası Yapılmış Direk



Şekil 2.84. Çember Beton

2.3.2. Taşıyıcı konsolların ve elektrik kablolarının tesisi

Çok fazla küçük malzemenin ve hassas ayarların yapıldığı sistemin montajı özet olarak aşağıdaki işlemleri içermektedir (Şekil 2.85-Şekil 2.93).

- Konsol-hoban takımları için bağlantı parçalarının, direkler üzerine montajlarının yapılması (Sabit parça montajı) .
- Topraklama bağlantılarının yapılması (Alüminyum irtibatlar)
- Portalların montajı
- Portallar üzerine Şezlerin montajı
- Direklerin, şezlerin ve bağlantı parçaları pozisyonlarının ölçümü
- Lentelerin montajı
- Ankraj direkleri üzerine ankraj bağlantılarının montajı
- Geri dönüş iletkeni/toprak teli çekilmesi
- Geri dönüş iletkeni/toprak teli mekanik gerginliğinin ayarlanması ve bağlantı klemenslerine bağlanması
- Katener sistemi konsol-hoban takımlarının atölyede imalatı, (ön montaj)
- Konsol-hoban takımlarının direklere ve şezlere montajı
- İletken çekilmeden önce Konsollar dönmemesi için gerekli önlem alınması
- Antişöminmanların çekilmesi ve sabitlenmesi
- Portör telinin çekilmesi ve ankraj noktalarına bağlantısının (Regularize ise Otomatik Gergi Cihazına, Fix ise Sabit bağlantı parçasına) yapılması
- Otomatik Gergi Cihazlarının ayarlanması

- Portör telinin Konsol-Hoban takımlarına, dönme açısı pozisyonları ayarlanarak sabitlenmesi (bağlanması)
- Pandüllerinin atölyede imalatı
- Pandüllerin montajı
- Seyir telinin çekilmesi ve ankraj noktalarına bağlantısının (Regularize ise Otomatik Gergi Cihazına, Fix ise Sabit bağlantı parçasına) yapılması
- Otomatik Gergi Cihazlarının ayarlanması
- Ekipman besleme bağlantılarının yapılması,
- Kesici ve ayırıcıların montajı
- IS lerin montajı
- Katener geometrisinin ayarlanması
- Üst geçitlerde ve gerekli olan yerlerde koruma panellerinin tesisi
- Katener Sistemi destek yapılarının çevre tesisatlarının tamamlanarak sisteme bağlanması
- Katener Sisteminin test edilmesi ve işletmeye alınması
- Topraklama İstasyonlarının yapılması



Şekil 2.85. Çift konsollu direk sabit parça montajı



Şekil 2.86. Portal Montajı



Şekil 2.87. Montajı tamamlanmış portallar



Şekil 2.88. Enerji kablolarının çekilmesi



Şekil 2.89. Enerji kablolarının çekilmesi



Şekil 2.90. Enerji kablosunun bağlantılarının yapılması



Şekil 2.91. Tamamlanmış elektrifikasyon sistemi



Şekil 2.92. Tünel içi şez imalatı



Şekil 2.93. Tamamlanmış elektrifikasyon sistemi viyadük üzerinde

2.3.3. Sinyal kablo kanallarının ve kabloların döşenmesi

2.3.3.1. Sinyal kablo kanallarının döşenmesi

Katener direk temellerinin arkasından geçecek şekilde yol boyunca, mümkün olduğunca düz olacak şekilde kablo kanalları döşenir. Kanal için öncelikle bobcat veya bir kepçe ile yüzeyden 40-45 cm kazı yapılır. kanalın boyu (kapak dahil) 25 cm dir. Kazı yapıldıktan sonra 10 cm kazı yapılan yere özel bir kum serilir.

Kum serildikten sonra kuma sıkıştırma işlemi uygulanıp, tesfiye yapılır. Tesfiye işleminin sebebi kanallar arasında kot farkının oluşmamasıdır. Kot farkı oluşursa kablo serim esnasında kablonun kanaldan sürünerek götürülmesi durumunda kabloda yara ve yırtılma oluşabilir.

Daha sonrasında kanallar aralarında boşluk olmayacak şekilde kazı alanına döşenir. Kablolar serildikten sonra kapaklar aralarında boşluk kalmayacak ve kanalın üzerine tam oturacak şekilde kapatılır.

Eğer kurp ya da başka sebeplerden ötürü kanallar düz gitmeyip belli yerlerde eğri gitmek zorunda kaldıysa, bir kenarı arasında boşluk olmayıp diğer kenarı arasında boşluk kalan kalan kanalların boşluğu küçük miktarda ise önemsenmez.

Eğer haşerat vb. girecek büyüklükte ise ya dış koşullara uygun köpük, harç, parça kanal kullanılır ya da gerek görülmemesi durumunda kapak kapatıldıktan sonra sub-balast dökülmeden önce üzeri kanal-kapak üzeri boşluğu örtecek şekilde naylon serilir.

Kapakların kapatılması işleminden sonra kanalların üzerine 10 cm ya da derinliğin biraz daha fazlalığına göre sub-balast malzeme atılır ve üzerinden kompaktör ile sıkıştırma işlemi uygulanır. sub-balast malzeme ve sıkıştırma işlemi uygulanmasının sebebi malzemenin uzun süre yağmur kar gibi hava koşullarından ötürü akıp kablo kanalını açığa çıkmasının istenmemesidir.

Kanal menhole ya da ek odasına geldiği zaman menhol ve ek odası penceresinin içine pencere bitimine kadar girer. kanal eni 36 cm boyu 25 cm derinliği 40 cm'dir (Şekil 2.94, Şekil 2.95).



Şekil 2.94. Viyadük üzeri kablo kanallarının döşenmesi



Şekil 2.95. Dolgu üzeri kablo kanallarının döşenmesi

2.3.3.2. Sinyal kablolarının serimi

Ekipmana göre kabloların quad ve damar sayıları değişir. Kanal dōřenmesi bittikten sonra öncelikle kanal içlerinin temizliği yapılır. Kanalda herhangi bir balast taşı ve küçük, ince, sivri taş, çöp bulunmaması gerekmektedir.

Kabloların serimi düzgün bir şekilde, sonrasında reklaja ihtiyaç duyulmayacak şekilde yapılması faydalı olur. kablo planına göre serim yapılacağı esnada planlamanın düzgün yapılması önemlidir. Mümkün olduğunca ek noktasının çıkması gerekir.

Ardışık bakır kablo ekleri arasındaki mesafe için en az 30 m, fiber için en az 300 m'ye ihtiyaç vardır. Bakır kabloda ek noktalarının çok yakın olmalarının teknik açıdan bir mahzuru yoktur. Arada mesafe istenmesinin sebebi her ek noktasının potansiyel arıza noktası olmasıdır. Fakat fiber ekleri arası mesafenin 300 m altı olması ışık sinyalinde yansımalara sebep olmasından ötürü 300 m altına müsaade edilmemektedir.

Kablonun serimi esnasında katener direkleri eğer dikilmiş vaziyette ise yol paralelinde giden servis yolunda traktör, vb. benzeri araç ile kablo serimi yapılır. Eğer henüz dikili değilse ray üstü araç üzerinden de yapılabilir. Kablo makaraları makaranın ortasındaki delikten geçen bir boru ile eşek isimli bir araca oturtulur. Bu işlem yapılırken makaranın zarar görmemesine dikkat edilmelidir. Eşek traktör veya kepeçeye bağlanır.

Kablo için termine edileceği ilgili ekipmanın klemensinden sonra 50 cm kadar soyma payı bırakılır ve ekipmanın büyüklüğüne göre kablo kanalı çıkışından klemense kadar yeterli pay bırakılır. Kablonun ucuna diğer kablolarla karışmaması için kolay silinmeyecek kalemle kablo etiketi, quad sayısı gibi bilgiler yazılıp yazının üzeri koli bantı ile güzelce bantlanır. Bu işlem ek noktasında ve hedef ekipmanda da tekrarlanır.

Sonrasında traktör hareket eder ve makaranın başında 1 veya 2 kişi makarayı döndürür. diğer işçiler kabloyu kanala taşıyıp kanalın içine yatırır. Bu işlem kablo bitene kadar ya da kablonun hedef ekipmanına kadar devam eder. Pay işlemleri hedef ekipmanda da aynen tekrarlanır. Kablo teknik binaya giriyorsa da bu işlem aynen geçerlidir.

Kanaldan kablonun çıkışı için yeterli büyüklükte spiral ile beton kanalda kesim yapılır. Kablo ilgili ekipmana çelik spiral veya hava hortumu ile girer. Bakır kablo ve fiber

için ek noktalarında ek odaları yapılır. Bakır kablo için beton kanal yanına birkaç adet beton kanal döşenmesi suretiyle ek odası yapılabilir.

Fiber kablo için menhol tipi ek odası yapılır. Kablo serilirken kabloların menhole girip ray altı geçişlerden karşıya geçişlerinde ve ek odalarında bakır ve fiber kabloların kırılmaması ve zırhlarının içten kabloyu yırtmamaları için kablolar quad ve damar sayılarına göre belli açılarla döndürülmelidir.

Döndürülebilecekleri açılı kablo data-sheetlerinde mevcuttur. Kablolar serilirken makaranın döndürülüp kablonun salınması suretiyle kanala serilmesi uygun yöntemdir. Kabloya asılıp, çekerek kabloyu sermek bakır kablo için de uygun olmasa da çok sorun teşkil etmeyebilir. Fakat fiberde uygulanmamalıdır.

Kablo serimi için müsaade edilen minimum sıcaklık 5 derecedir. Fakat havanın sertliğine göre 0 dereceye kadar müsaade edilebilir. 0 derecenin altında kablo serimi yapılamaz. Kablonun izolasyonu zarar görebilir.

Kablo serilirken kanala yatırılması uygun olmalıdır. Mecbur kalmadıkça kablo kanalın içinde sürüyerek serilmemelidir. Bu kanalın dış izolasyonuna bundan da kötüsü yırtılma gibi durumlara sebep verebilir. Kablo serilirken tünel, viyadük, köprü gibi sanat yapıları ve şev, dere gibi engel teşkil edebilecek durumlar hesaba katılarak uygun planlama yapılmalıdır.

Kablonun ek noktasında veya ekipmanlarda uzun gelmesinden ötürü kesilmesi gerekirse testere veya kablo makası ile kablo kesildikten sonra ucu mutlaka kablo kepi veya eriyen bant ile dış ortamdan izole edilmelidir. Eğer bu yapılmazsa yağmur, nem gibi hava koşullarından ötürü kablo içinden su ilerleyip ek noktalarında arızalara, kabloda korozyona sebep olup kablonun kullanılamamasına sebep olabilir (Şekil 2.96., Şekil 2.97, Şekil 2.98).



Şekil 2.96. İstasyon girişi cüce sinyal



Şekil 2.97. Anayol sinyal sistemleri



Şekil 2.98. İstasyon giriş sinyalleri

2.3.4. Güç trafo tesisi ve telekomand birimlerinin kurulması

Katener hattı üzerinden iletimi sağlanan, hızlı tren araçlarının hareketi için yaklaşık 30.000 volt gerilimin hat boyunca temini için oluşturulmuş trafo merkezleri bulunmaktadır. Ayrıca demiryolu trafiğinin emniyetli biçimde sağlanması için kurulmuş haberleşme sistemleri bulunmaktadır (Şekil 2.99, Şekil 2.100, Şekil 2.101).



Şekil 2.99. Güç trafosu



Şekil 2.100. Güç trafo tesisi



Şekil 2.101. Haberleşme sistemi teknik bina iç donanım

3. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLLARINDA GEOTEKNİK ÇALIŞMALAR

Demiryollarında geoteknik mühendisliğinin başlıca çalışma alanları:

- Güzergah seçimi ve geoteknik özelliklerinin belirlenmesi için gerekli araştırma sondajlarının yapılması
- Sondajlardan elde edilen numuneler ile gerekli laboratuvar deneylerinin yapılması ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi
- Arazi deneyleri ile zeminlerin yerinde geoteknik özelliklerinin belirlenmesi
- Projelendirme ve yapım için gerekli olan geoteknik raporların hazırlanması,
- Yapım yönteminin belirlenmesi ve yapım esnasında uygulama adımları ile alınacak önlemlerin belirlenmesi, drenaj için gerekli sistemin seçimi
- Demiryolu üstyapısının dinamik ve statik yüklerinin zemine aktarılmasını güvenle sağlamak için hat boyunca zemin niteliklerinin belirlenmesi ile dolgu ve zemin niteliklerinin iyileştirme projelendirmeleri
- Viyadük ayaklarının temel (kazıklı – kazıksız) tasarımları ve nehir geçişlerinde yapılacak köprü ayaklarının temel tasarımı,
- Deprem durumunda, zemin sıvılaşmasına karşı tasarımlar ve viyadük deprem izalatörlerinin tasarımı
- Demiryolu altyapılarında büyük dolgu işlemlerinin gerçekleştirildiği projelerde en uygun sıkıştırma özelliklerinin seçimi ve yapım sonrası oturmaların sınırlandırılması
- Demiryolu için açılacak tünellerin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi, uygun delme ve tahkimat yöntemlerinin seçilmesi
- Yarmalarda şev stabilitesine uygun kazı ve destek sisteminin belirlenmesi
- şeklinde sıralanabilir.

3.1. Projelendirme Aşamaları

Projelendirme kriterleri ve topografyadan doğan yarma- dolgu- tünel ve viyadük yapıları ile hızlı demiryolu güzergahı ortaya çıkar.

Bunların projelendirilmesi ve yapımında geoteknik çalışmalar, üç aşama olarak ön projelendirme, uygulama projeleri ve yapım aşamalarında devam eder.

3.1.1. Ön projelendirme

3.1.1.1 Ön proje jeolojik etüt raporu

Aday güzergahların incelenmesi ve değerlendirilmesindeki esaslar dahilinde yürütülen jeolojik-jeoteknik çalışmalar sonucunda oluşturulan tüm bulgu ve veriler bir "Koridor Jeolojik Jeoteknik Raporu" ile raporlanır. Raporda yapılan çalışmalar ve uygulanan yöntemlerle birlikte kaynak olarak faydalanılan önceki çalışmalar özetlenecek ve ulaşım sonuçlarına göre koridor veya koridorlar için oluşturulan jeolojik model veya modeller çerçevesinde:

- Genel jeoloji ve hakim tektonizma,
- Stratigrafi,
- Yapısal jeoloji, faylar, kırıklıklar, tabakalanma ve süreksizlikler,
- Aktif, pasif ve/veya potansiyel heyelan ve kayma alanları,
- Ve yeraltı suyu

bir bütünlük içerisinde açıklanacak ve yapım aşamasında karşılaşılabilecek jeoteknik güçlükler ve uygulanacak önlemler tahmin edilir.

Güzergâh araştırmaları sonucunda 1/2000 – 1/200 ölçekli jeolojik haritalar (plan ve profiller) hazırlanır [2].

3.1.1.2. Ön proje hidrojeolojik etüt raporu

Proje dolayısıyla etkilenecek tabii seyir ve akımları kesilen mecrâ, dere ve akarsuların bu akım ve seyirlerini uygun bir şekilde devam ettirmek, mücavir alanlardan güzergaha isabet eden her türlü suyu güzergahın fonksiyonunu zedelemeyecek şekilde toplamak, taşımak, kanalizasyon ve deşarj etmek için gerekli sanat yapısı, derivasyon ve diğer elemanların tip ve ebatları belirlenebilmesi amacıyla gerekli her tür hidrolik ve hidrojeolojik araştırma ve değerlendirme yapılmalıdır.

Belirlenen güzergah için 1/5.000 ölçekli haritalar üzerinde havzalar tespit edilmeli ve hidrolik hesaplamalar yapılmalıdır. Havza planı üzerinde akış mesafeleri, akış kotları, menfez kilometreleri ve yağış alanları bulunmalıdır [2].

3.1.1.3. Ön proje mühendislik jeolojisi etüt raporu

Mühendislik jeolojisine ait testler yapılarak ve sondaj uygulamaları gerekli görüldüğü takdirde artırılarak, önemli bölgelerde gerekli derinliklerde yapılarak sondaj logları üzerine işlenerek, sonuçları değerlendirilir.

Jeoteknik etüt kapsamında Jeolojik Etüt, Hidrojeolojik Etüt ve Mühendislik Jeolojisi çalışmaları sonucunda elde edilen verileri yorumlanarak, harita ve kesitler üzerinde belirtilir.

Toprak stratigrafisinin ortaya çıkarılmasıyla, yüzeye yakın jeolojik birimlerin tespitinde, fay, kırık ve çatlakların haritalanmasında, yer altı karstik boşlukların aranmasında, zemin araştırmalarında, tünel araştırmalarında GPR (Ground Penetrating Radar) veya diğer jeofizik yöntemleri kullanılarak imalat öncesinde veya sonrasında kontroller güzergah boyunca yapılır.

Hat yapımında kullanılacak malzeme ocaklarının (dolgu, kum-çakıl, taş ve su temin yerlerinin) etütleri, incelenen güzergahın malzeme ihtiyacını eksiksiz, optimum kalitede ve maksimum ekonomi sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Dolgu malzemelerinde teknik kriterlerin sağlanması için gerekli her türlü deneyler yapılmalıdır [2].

Temel araştırmaları ile temel kaya ve zeminin jeolojik özelliklerinin sayısal olarak ifade edilmesi, zeminin stratigrafik ve litolojik özelliklerinin tespit edilmesi ve yeraltı suyu durumu ile ilgili bilgi edinilmesi amacıyla yeterli sayıda ve derinlikte temel sondajı yapılmalıdır.

Zeminin taşıma gücünün tayini ve zeminin standart uca göstereceği penetrasyon mukavemetinin saptanmasına yönelik SPT deneyleri yapılır. Kaya ve zemin mekaniği deneyleri yapılır. Açılan sondaj kuyularında, Tünel Sondajlarında kırmızı kottan yukarı yaklaşık 30 metrelik zonda açılacak sondaj kuyularında, basınçlı (kaya ortamında) ve basınçsız (zemin ortamında) su deneyleri yapılacak, sahada

örselenmemiş numune alınmalı, kaya ortamlarında ise yeteri kadar numune alınmalı ve bu numuneler üzerinde laboratuvar çalışması yapılarak kayaların uluslararası kabul görmüş sistemler olan RQD, RMR, Q, GSI sistemine göre sınıflandırılması yapılacak ve tasarım parametreleri belirlenmelidir [2].

3.1.1.4. Ön proje jeoteknik etüt ve raporu

Jeolojik etüt, Hidrojeolojik etüt ve Mühendislik Jeolojisi etüdü sonuçlarının birlikte ayrıntılı jeoteknik değerlendirilmesi yapılır. Hazırlanacak harita ve kesitler aşağıda belirtilen detayda, duraysızlık sorunlarının olduğu kesimleri, zayıf zeminler ile tünel, köprü, yüksek yarma/dolgu v.b. mevcut tüm yol bileşenlerini kapsamalıdır:

- Birimlerin litolojileri, ayrışma, bozuşma, sertlik, dayanım v.b. özellikleri,
- Şev duraylılığını etkileyecek süreksizliklerin konumları, gruplandırılması, yorumlanması ve bu amaçla süreksizliklerin; konumu, sayısı, aralıkları, açıklıkları, devamlılığı, pürüzlülüğü,
- Dolgu malzemesinin cinsi ve özellikleri, su durumu, süreksizlik içindeki dolgu malzemesinden örnek alınabiliyorsa bu malzemenin laboratuvar değerleri, süreksizlik yüzeyi kesme deneyi,
- Kayaçların, uluslararası kabul görmüş (Q, RMR, RQD, GSI, v.b.) sistemlere göre sınıflandırılması,
- Yarma malzemelerinin dolgularda kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi,
- Dolgu şev eğimlerinin stabilite analizleri ile desteklenerek belirlenmesi,
- Birimlerin kazı zorluğu ve sıkışma-kabarma oranları; arazi ve laboratuvar verileri birlikte değerlendirilerek; kayalar Q, RMR, RQD, GSI'ya göre, zeminler ise sıkılık, tane boyutu dağılımı dikkate alınarak sınıflandırılması,
- Yarma/dolgu şev oranlarının (eğimlerinin) ve yarmadan çıkan malzemelerin dolgu şev oranlarının belirlenmesi,
- Sıkışma/kabarma ve yarma-dolgu şev klas tablosunun hazırlanması,
- Kütle hareketlerinin oluştuğu veya oluşabileceği potansiyel ve fosil heyelan alanlarının sınırları, derinliği, kayma yüzeyi ve kayma mekanizmasının belirlenmesi,
- Birimlerin jeoteknik değiştirgeleri (parametrelerin: c, kPa; ϕ ; E, GPa; σ , kPa; ν , CBR, LL, PI, w_n , γ , v.b.) arazi gözlemleri, zemin-kaya sınıflamaları, yerinde deneyler ve laboratuvar çalışmaları birlikte değerlendirilerek belirlenmesi, alansal

ve derinliğe göre dağılımı, sırasıyla harita ve kesitler üzerinde gösterilerek jeolojik-jeoteknik profilin oluşturulması,

- Suyu hassas kaya gurubunda çalışılıyorsa (mekanik davranışını etkileyecek miktarda kil veya suya hassas malzeme bulunuyorsa örneğin; marn, killi kireçtaşı, tebeşirli kireçtaşı, jips, anhidrit v.b.) slake dayanıklılık deneylerinin (su ortamı içinde malzemenin aşınmaya karşı davranışı) yapılması (ulaşılacak sonuçlar tasarım parametresi de dikkate alınacaktır),
- Zayıf zemin geçişleri çözüm önerileri
- Dolgu, köprü yaklaşım dolgusu taban zemini, köprü temeli zeminleri için oturmaların hızlandırılması, azaltılması, taşıma gücünün artırılması, şev stabilitesinin artırılması için gereklidir [2].

3.1.2. Kesin projelendirme

3.1.2.1. Kesin proje jeolojik etüt raporu

Güzergâh ve tünel geçişleri için ayrıntılı bir ölçekte jeolojik-jeoteknik haritalar hazırlanmalıdır.

Jeolojik birimler tanımlanarak, her bir birimin jeoteknik karakteristikleri, kaya karakteristikleri, bağlantı ve dirençlerinin geometrisi, kayanın jeo-mekanik karakteristikleri (sınıflandırma, direnç, deformasyon), hafriyat güçlükleri, kısa vadeli destek (iksa) gereksinimleri, uzun vadeli destek gereksinimleri, geçirgenlik durumları, su sızıntı araştırmaları yapılarak elde edilen bilgiler, hafriyat güçlükleri, şevlerde eğim önerileri, kazılarda alt kısımlardaki dolgular, malzemelerin yeniden kullanımı, toprak dolgu için jeoteknik kriterleri, mevcut malzemeler, temel şartları, toprak dolgularda üst kotlar, yapılarla ilgili jeoteknik rapor, her bir yapı için arazi kullanım açıklamaları, mevcut coğrafi ve doğa koşulları, dayanım, deformasyon (İlerde oluşabilecek oturmalar dahil), her bir yapı için jeoteknik profiller, her bir yapının temeli ile ilgili öneriler, temel tipi (yüzeysel veya derin), iksa kotları, zemin taşıma gücü (konsolidasyon veya oturma hesapları), zemin iyileştirmesi yapılacak yerler ve buna bağlı olarak getirilecek çözümler belirlenmelidir [2].

3.1.2.2. Kesin proje hidrojeolojik etüt raporu

Jeolojik Etüd aşamasında elde edilen verilerin hidrojeolojik açıdan özet yorumu yapılmalıdır. Bölgenin yer altı su seviyesinin (YASS) derinliği, mekaniği ve hidrolojisi (yağış durumu, göl, dere, kaynak, akarsu v.b.) değerlendirilmeli, YASS'nin mevsimsel değişimlerinin projeye etkilemesi araştırılmalı ve stabilite problemi olması durumunda çözüm önerilerine raporda yer verilmelidir. Kaynak, sızıntı ve ıslak alanların dağılımına, başka havzalardan çalışma alanı havzasına aktarılan su ile çalışma alanından başka havzalara aktarılan su durumları etüt edilmelidir. Yol bileşenlerini etkileyen drenaj sistemleri şekillerle açıklanmalıdır [2].

3.1.2.3. Kesin Proje Mühendislik Jeolojisi Etüt Raporu

- Düzenlenecek mühendislik jeolojisi etüt raporu;
- Mühendislik jeolojisine ait çalışmalara ve sonuçlarının değerlendirilmesine
- Jeolojik Etüt ve Hidrojeolojik Etüt sonucunda elde edilen verilerin yorumlarını ve harita - kesitler üzerinde sunulmasını,
- Jeolojik birimlerin litolojisi, rengi, dokusu, çimentolanması ve dayanımlarının niteliksel olarak açıklanmasını,
- Birimlerin kütleli dayanım ve ayrışma dereceleri, çimentolanma derecesini,
- Güzergahın ana bileşenleri (tünel, köprü, yarma, dolgu v.b.) duraylılığı üzerinde etkili olabilecek su-süreksizlik-kil ilişkisinin ortaya çıkarılmasını,
- Güzergah bileşenlerini olumsuz yönde etkileyecek oturma, farklı oturma, sıvılaşma, taşıma gücü ve benzeri sorunlu alanların belirlenmesini
- Yol yapımında kullanılacak malzeme ocaklarının (dolgu, kum-çakıl, taş ve su temin yerlerinin) etütleri incelenen güzergahın malzeme ihtiyacını eksiksiz, optimum kalitede ve maksimum ekonomi sağlayacak arazi çalışmalarını,
- Dolgu malzemelerin kriterlerinin tespiti için yapılan her türlü deneyleri ve sonuçlarını, içermelidir [2].

3.1.2.4. Kesin proje jeoteknik etüt ve raporu

Jeolojik etüt, Hidrojeolojik etüt ve Mühendislik Jeolojisi etüdü sonuçlarının birlikte ayrıntılı jeoteknik değerlendirilmesi yapılmalıdır. Hazırlanacak harita ve kesitler

aşağıda belirtilen detayda, duraysızlık sorunlarının olduğu kesimleri, zayıf zeminler ile tünel, köprü, yüksek yarma/dolgu v.b. mevcut tüm yol bileşenlerini kapsamalıdır. Bunlar:

- Birimlerin litolojileri, ayrışma, bozuşma, sertlik, dayanım v.b. özellikleri,
- Şev duraylılığını etkileyecek süreksizliklerin konumları, gruplandırılması, yorumlanması ve bu amaçla süreksizliklerin; konumu, sayısı, aralıkları, açıklıkları, devamlılığı, pürüzlülüğü, dolgu malzemesinin cinsi ve özellikleri, su durumu, süreksizlik içindeki dolgu malzemesinden örnek alınabiliyorsa bu malzemenin laboratuvar değerleri, süreksizlik yüzeyi kesme deneyi,
- Kayaçların, uluslararası kabul görmüş (Q, RMR, RQD, GSI, v.b.) sistemlere göre sınıflandırılması,
- Yarma malzemelerinin dolgularda kullanılabilirliğinin değerlendirilmesi, dolgu şev eğimlerinin stabilite analizleri ile desteklenerek belirlenmesi,
- Birimlerin kazı zorluğu ve sıkışma-kabarma oranları; arazi ve laboratuvar verileri birlikte değerlendirilerek; kayalar Q, RMR, RQD, GSI'ya göre, zeminler ise sıklık, tane boyutu dağılımı dikkate alınarak sınıflandırılması,
- Yarma/dolgu şev oranlarının (eğimlerinin) ve yarmadan çıkan malzemelerin dolgu şev oranlarının belirlenmesi,
- Sıkışma/kabarma ve yarma-dolgu şev klas tablosunun hazırlanması,
- Kütle hareketlerinin olduğu veya oluşabileceği potansiyel ve fosil heyelan alanlarının sınırları, derinliği, kayma yüzeyi ve kayma mekanizmasının belirlenmesi,
- Birimlerin jeoteknik değişirgeleri (parametrelerin: c, kPa; ϕ ; E, GPa; σ , kPa; v, E, CBR, LL, PI, w_n , γ v.b.) arazi gözlemleri, zemin-kaya sınıflamaları, yerinde deneyler ve laboratuvar çalışmaları birlikte değerlendirilerek belirlenmesi, alansal ve derinliğe göre dağılımı, sırasıyla harita ve kesitler üzerinde gösterilerek jeolojik-jeoteknik profilin oluşturulması,
- Suya hassas kaya gurubunda çalışılıyorsa (mekanik davranışını etkileyecek miktarda kil veya suya hassas malzeme bulunuyorsa örneğin; marn, killi kireçtaşı, tebeşirli kireçtaşı, jips, anhidrit v.b.) slake dayanıklılık deneylerinin (su ortamı içinde malzemenin aşınmaya karşı davranışı) yapılması (ulaşılacak sonuçlar tasarım parametresi de dikkate alınmalıdır.),
- Zayıf zemin geçişleri çözüm önerileri detaylı olarak raporda sunulacaktır. Zayıf zemin iyileştirmeleri dolgu, köprü yaklaşım dolgusu taban zemini, köprü temeli

zeminleri için söz konusu olup esas olarak oturmaların hızlandırılması, azaltılması, taşıma gücünün artırılması, şev stabilitesinin artırılması için gereklidir [2].

3.2. Zemin Araştırma Çalışmaları

3.2.1. Kazılar

3.2.1.1. Sığ gözlem çukuru

Gözlem çukurları geçici olarak desteksiz durabilen zeminlerde, çoğunlukla bir hidrolik kepçe aracılığıyla 4 ila 5 metreye kadar yapılabilen kazılardır (Şekil 3.1). Kazılan mesafedeki birim özelliklerinin, süreksizliklerin, nebati - zemin - kaya birim geçişlerinin, yeraltı yüzey suyu derinlikleri gibi özelliklerin tanımlanmasında kullanılırlar.

Ayrıca direkt numune alınıp laboratuvar testleri ile birimlerin geoteknik özelliklerinin belirlenmesi sağlanabilir.



Şekil 3.1. Gözlem çukuru açılması

3.2.1.2. Şaftlar

Zemin koşullarında büyük burgular kullanılarak açılan yaklaşık bir metre çapındaki gözlem kuyularıdır. Bir traktör arkasına bağlanan şaft sistemi ile yaklaşık 3 metreye kadar açılabilirler. Ekonomik yöntem olmakla beraber kısıtlı veri elde edilir.

3.2.2. Sondajlar

Sondajlar kaya – zemin etüdünde ve cevher arama çalışmalarında jeoteknik veri toplamak için kullanılan en yaygın yöntemdir. Sondaj yeraltında belirli çaplarda açılan deliklerden çeşitli özelliklerde numuneler alınması ve bu numuneler üzerinden veri sağlanması işidir.

Elde edilen numuneler ile jeoteknik loglar hazırlanır. Bu loglarda:

- Jeoteknik birimlerin derinlikle değişimi
- Kaya ve zemin birimlerinin bazı mühendislik özelliklerini tanımlama
- Süreksizliklerin durumu
- Yeraltı suyu verileri

kaydedilir. Ayrıca alınan numuneler üzerinde laboratuvar çalışmaları yapılarak mühendislik özellikleri belirlenir.

Sondaj ile ilerleme parça koparma şeklinde olursa kırıntılı ilerleme, belirli çapta tam numune elde etme amaçla yapılırsa karotlu ilerleme şeklinde isimlendirilir.

Teknolojik gelişmelere bağlı olarak çok çeşitli sondaj makineleri geliştirilmiş olmakla birlikte mantık olarak ana sistem aynı mantıkla oluşturulmuştur. Genel mantık olarak sondaj sistemi, vinçli bir kule ortasından yeraltına yönlendirilmiş dönen bir sistemin yeraltında ilerletilerek numune elde edilmesidir.

Darbeli veya döner sistem ile yada her ikisinin kullanıldığı sistemler ile yer altında ilerletilen tijler sondaj karotları elde edilir (Şekil 3.2, Şekil 3.3).



Şekil 3.2. Karotlu zemin sondaj makinesi, kule vinç ve karotijer tij boruları



Şekil 3.3. Karotlu zemin sondaj makinesi, sondör ve helezon tij boruları

Alınan karot numuneleri, karot sandıklarına usulüne göre yerleştirilerek sondaj loglarına işlenmek ve laboratuvar testleri için muhafaza edilirler (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Karot sandıkları, numaralandırılması ve karot yerleşimi

Karot sandıkları üzerinde şüphe oluşturmayacak şekilde, literatürde belirtildiği gibi tüm bilgiler işlenerek muhafafaza edilir.

Geoteknik amaçlı sondaj ile yapılan başlıca işler şunlardır:

- Karot veya sediman numune alma işleri.
- Yeraltı su seviyelerinin ölçülmesi
- Basınçlı su deneyi yapılması
- Sızma deneyi (permeabilite deneyi)yapılması
- Standart penetrasyon deneyi
- Örselenmiş veya örselenmemiş numune alma işleri

3.2.3. Jeofizik yöntemler

Jeofizik yöntemler yeraltı özelliklerinin tanımlanmasında fizik prensiplerini kullanan bilimsel teknik çalışmalardır. Portatif aletlerin gelişimi ile son yıllarda daha fazla arazi

uygulamalarında kullanılmaya başlanmıştır. Gelişen teknoloji ile jeoteknik çalışmalarda jeofizik uygulamalarının kolaylaşması ve alınan olumlu sonuçlar ile tekniğin önemi daha iyi anlaşılmıştır. Jeoteknik mühendisliğinin uygulama bölgeleri için jeofizik yöntemler aşağıda belirtilen problemlere ışık tutulmaktadır. Bunlar:

- Yeraltı tabakalarının topografyası,
- Jeolojik birimlerin yayınımları,
- Ezilme zonları, kayma zonları, faylar
- Yeraltı boşlukları,
- Yeraltı suyu seviyesi ve zeminlerin nem durumları,
- Sismik dalga hızları,
- Zemin hakim periyodu, zemin büyütmesi, kayma modülü, Poisson oranı vb gibi zeminin fiziksel özellikleri.

Jeofizik yöntemler jeolojik birimlerin fiziksel özelliklerinin farklılığı esasına dayanır. Çalışmada hangi jeofizik yöntemin ve ölçüm tekniğinin kullanılacağı, uygulama alanının iyice tanınması ile belirlenir.

Jeofizik yöntemler ile sondaj maliyetleri azaltılarak daha fazla veri elde edilmesi de sağlarlar.

Yer altı koşullarının belirlenmesinde kullanılan jeofizik yöntemler şunlardır:

- Sismik Yöntemler
- Jeoelektrik Yöntemler
- Mikrotitreşim Ölçümleri
- Gravite
- Magnetik
- VLF
- Zemin Penertasyon Radarı/Georadar
- Isı ölçümleri
- Radiometrik Ölçümler

3.2.3.1. Sismik Yöntemler

Yeryüzünde veya yüzeye yakın bir noktada üretilen sismik dalgaların yeraltında değişik birimlerde (zamanın fonksiyonu olarak) yayınımları, kırılıp ve/veya yansıtıp

yüzeide yerelan kayıt cihazında (jeofon) kaydedilmeleri ölçüm tekniğinin temelini oluşturur.

Sismik dalga kaynağı olarak darbe – patlayıcı ve titreşim kullanılır.

Darbe Kaynak balyozun yere aniden vurulması ile yapılmaktadır.

Patlayıcı Kaynak: Patlayıcılar ile güçlü sismik enerji üretilir.

Vibratör Kaynak (Titreşim Aracı): Özel hazırlanmış ve belirli frekanslarda dalga üretimi için kullanılan kaynaklar da vardır.

Değişik birimlerde yol alan sismik dalgaların hızları, bu birimlerin yoğunluk ve sertliklerinin fonksiyonu olarak değeriir.

Verilerin değeriendirilmesi için kaydedilen dalga tipine göre, kırılma ve yansıma olmak üzere farklı iki yöntem vardır.

1. Kırılma Yöntemi bir kaynaktan üretilen sismik dalgaların yeraltında elastik özellikleri değerişik birimlerde yayınması ve kırılarak yeryüzüne ulaştıklarında jeofonlar tarafından kaydedilmesidir.

Bu yöntem kullanılarak sağlanabilecek olan veriler şunlardır:

- Jeolojik birimlerin kalınlık ve derinlikleri,
 - Kırılma ve kayma zonları,
 - V_p ve V_s hızları, yerel zemin parametrelerinin hesabı (Poisson oranı, kayma modülü, sönüm oranı, elastik modül, taşıma gücü vb)
 - Yeraltı boşluklarının belirlenmesi,
 - Birimlerin sertlik dereceleri, sökülebilirlik/kazılabilirlik değeriileri,
 - Zemin hakim periyodunun hesaplanması,
2. Yansıma yöntemi, bir kaynaktan üretilen sismik dalgaların yeraltında yayınarak akustik özellikleri farklı birimlerden yansıyıp (yeryüzünde kaydedilmesi saha uygulamasının esasını oluşturur. Kullanım alanları;
 - Jeolojik birimlerin kalınlık ve derinlikleri,
 - Kırılma ve kayma zonları,
 - Kum ve kil lensleri, vb.

3.2.3.2. Jeoelektrik yöntemler

Jeoelektrik yöntemlerin temeli, jeolojik birimlerin değişik elektriksel özelliklere sahip olması ve bunların ölçülerek yeraltıdaki oluşumun öngörülmesine dayanır. Bu yöntemlerde kayaçların /jeolojik birimlerin kullanılan özellikleri;

- Resistivite (özdirenç) ve/veya iletkenlik,
- Elektrokimyasal etkinlik (yeraltındaki birimlerin ve yeraltı suyunun kimyasal bileşimlerine bağlı),
- Dielektrik sabiti (birimlerin elektrik şarjı ve boşalımına bağlı).
- Kullanım alanı :
- Jeolojik tabakaların kalınlık ve derinliklerinin belirlenmesi,
- Yeraltıdaki anomalilerin belirlenmesi (faylar, ezilme/kırılma zonları),
- Yatay litolojik değişimler,
- Yeraltı su düzeyi ve tatlı/tuzlu su sınırı,
- Yeraltı boşlukları, vb.

3.2.3.3. Mikrotitreşim

Zemin doğal ve yapay etkiler (rüzgarlar, dalgalar, trafik, endüstri, vs) nedeniyle sürekli titreşir. Bu titreşimlerin genlikleri birkaç mikrondan daha düşük olup, periyotları ise 0.02 - birkaç saniye aralığındadır. Mikrotremor ölçümlerinde gündüz ile gece arasında değişim gözlenir. Sert zeminlerde periyot ve genlik değerleri yumuşak yerlere nazaran daha küçüktür. Bu değerlerde en üstteki katman daha etken olmaktadır. Kayıtların analizinden hangi frekansların baskın olduğu ve zemindeki gürültü düzeyi anlaşılır ve zemin hakim periyodu belirlenebilir.

3.2.3.4. Sismoloji

Deprem oluşumu, sismik dalgaların yayılımı, yeraltı yapısı, deprem ve yapay sarsıntı kayıtlarının analizleri, yerel ve global yapı, vb problemlerle uğraşan ve sonuçları insanlığın yararına sunan sismoloji, jeofizik biliminin bir alt dalıdır. Mühendislik çalışmalarında proje sahasının depremselliği ve riski sismolojik araştırmalarla aydınlatılır. Bu kapsamda yapılan araştırmalar şunlardır:

- Yerel ve bölgesel deprem etkinliği, sismotektonik harita,
- Deprem oluşum özellikleri, odak mekanizması, dönüş periyodu,
- Kayıt süresi, max. genlik, (İvme ve hız), azalım ilişkileri,
- Deprem odak derinliği - hasar - magnitüd - yapım özellikleri,
- Magnitüd - ivme - yırtılma boyutu ilişkileri,
- Sismogenik bölgeler ve iskan alanlarına etkileri,
- Mikrodeprem etkinliği, mevcut ve/veya muhtemel faylara ilişkileri,
- Sismik risk hesabı, vb.

3.2.3.5. Gravite

Gravite ölçümleri ile kayaç yoğunluklarındaki farklılıklardan ileri gelen arzın çekim alanındaki yerel değişimleri belirlenir. Bu değişimler son derece küçük olduğundan ölçümler mikrogal düzeyinde yapılmaktadır.

Kullanım alanı:

- Standart gravite ölçümleri bölgesel jeolojik yapıların özelliklerinin belirlenmesinde kullanılır,
- Mikrogravite ölçümleri yerel bazda değişimlerin belirlenmesinde kullanılır (taban kaya topografyası, yeraltı boşlukları, yoğunluk değişimi).
- Mühendislik projeleri kapsamında genel olarak kullanılan jeofizik yöntemler ve elde edilen veriler Tablo 3.1’de özet olarak verilmektedir.

Yukarıda özetlenen yöntemler, özellikle sismik yöntemler jeoteknik araştırmalarda ağırlıklı olarak kullanılmaktadır. Hangi yöntem ve ölçüm tekniği kullanılırsa kullanılsın, yeraltının üç boyutlu durumunu daha rahat görebilmek için jeofizik kesitler hazırlanmalı ve bunların jeolojik yorumları yapılmalıdır.

Tablo 3.1. Jeofizik yöntemler ve elde edilen veriler

Yöntemler	Bulgular
Sismik Yöntemler	-Vp ve Vs hızları, Poisson oranı, kayma modülü, jeolojik birimlerin yatay ve düşey dağılımları, faylar, kırılma ve kayma zonları, taban kaya derinliği, yeraltı boşlukları, sökülebilirlik/kazılabilirlik, vb.
Jeoelektrik Yöntemler	-jeolojik birimlerin yatay ve düşey dağılımları, faylar, kırılma ve kayma zonları, yeraltı suyu seviyesi, doyunluk, tuzluluk, yeraltı boşlukları, vb.
(Mikrotitreşim)	-zemin hakim periyodu, zemin büyütmesi, gürültü (Mikrotitreşim) seviyesi, vb.
Sismoloji	-deprensellik, sismik risk, vb.
Gavite	-yeraltı boşlukları, yoğunluk değişimi, vb.
Georadar	-Yeraltı yapısının aydınlatılması için kullanılır.

3.2.4. Yeraltı suyu

Yeraltı su basınçlarının zemin davranışı üzerinde çok büyük etkisi olması nedeniyle, zeminle ilgili inşaat işleri sırasında ve sonrasında, bu basınçların seviyelerinin belirlenmesi hayati önem taşır.

Özellikle, geçirimsiz tabakalar ile ayrılmış zemin katmanları içerisinde farklı yeraltı suyu basınçları mevcut olabilir. Bunun sebebi artezyen basıncı veya su tablasının aşırı geçirgen zemin tabakası içerisindeki yeri olabilir.

Derin kazılarda ya da tünel inşaatı gibi durumlarda su basıncının ölçülmesi, bununla ilgili özel önlemlerin alınması gerekeceği için daha önemlidir.

Yeraltı su basıncının doğru olarak ölçülebilmesi için, piyezometre adı verilen özel ölçme aletleri kullanılır.

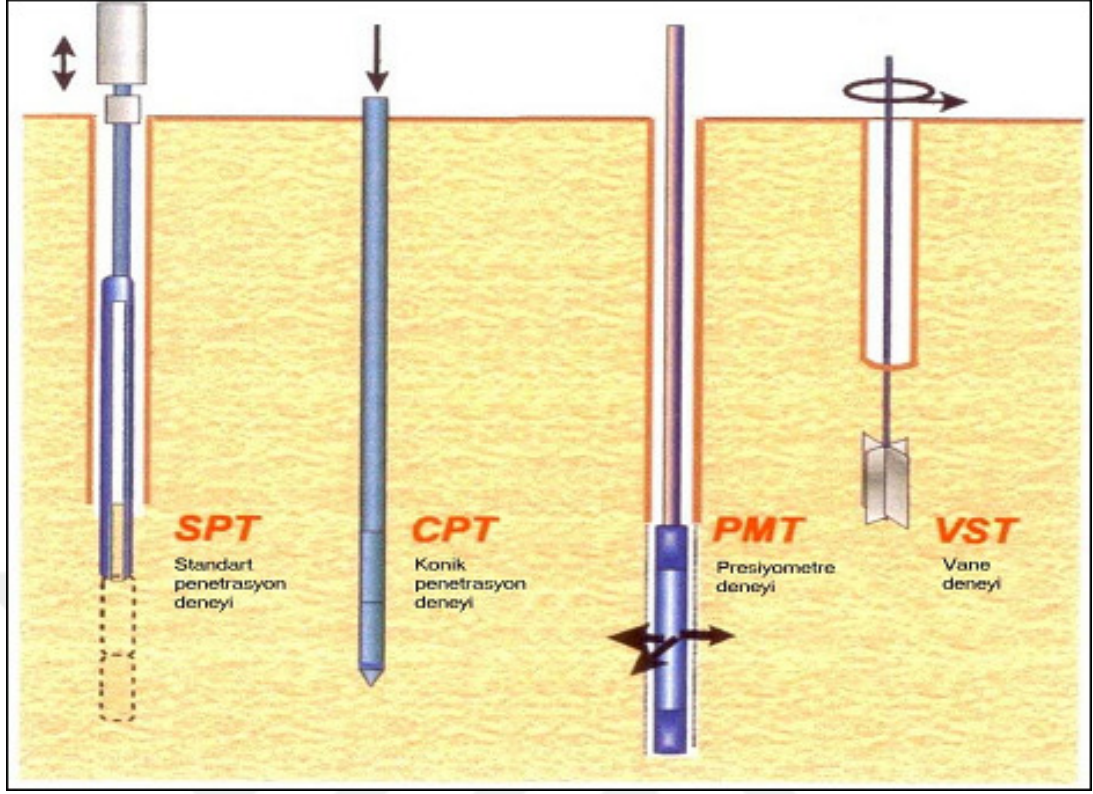
Yeraltı su basıncı mevsimsel olarak veya başka sebeplerden dolayı değişebileceğinden, geniş zaman aralıklarında ölçüm yapmak gerekebilir.

3.3. Yerinde Deneyler

Geoteknik çalışmalar için, araziden çeşitli yöntemlerle numuneler alınmaktadır ve ne kadar özenle yapılsada killi zeminlerde numune örselenmektedir. Kumlu taneli zeminlerde numune alınması daha zordur. Bu sebeple numunenin örselenmesi mahzurlarından kaçınmak için, laboratuvar deneyleri yerine, yerinde arazi deneyleri tercih edilmektedir .

Yerinde deneyler, laboratuvar numunelerinin hazırlanmasında bazı güçlükler nedeniyle tercih edilir. Bunlar:

- Zemini tanımlayacak olan numunenin laboratuvar test aletlerine göre çok büyük olması sebebiyle
- Zeminin mekanik özelliklerinde numune alınmasında meydana gelebilecek değişikliklerden dolayı.
- Zeminin boşluk suyu basıncı, doygunluk derecesi ve gerilmeler gibi özelliklerinin saha koşullarındaki değerlerinin laboratuvarda deney öncesinde yeniden düzenlenmesinin zor olduğu durumlarda.
- Bekleme ve taşınma sürecinde numunenin örselenmesi olasılığı olduğu durumlarda.
- Sıkça uygulanan arazi deneyleri şunlardır:
- Standard Penetrasyon Deneyi (SPT)
- Konik Penetrasyon Deneyi (CPT)
- Presiyometre Deneyi (PMT)
- Vane deneyi (VT) (Şekil 3.5)



Şekil 3.5. Arazi deneyleri [3]

3.3.1. Standard penetrasyon deneyi (SPT)

Genellikle her tür zeminde uygulanabilmekle beraber, bloklı zeminlerde yanıltıcı sonuçlar verebilmektedir. Deney ile kumlu zemine girişine gösterilen direnç ölçülmekte ve örselenmemiş numune alınabilmektedir.

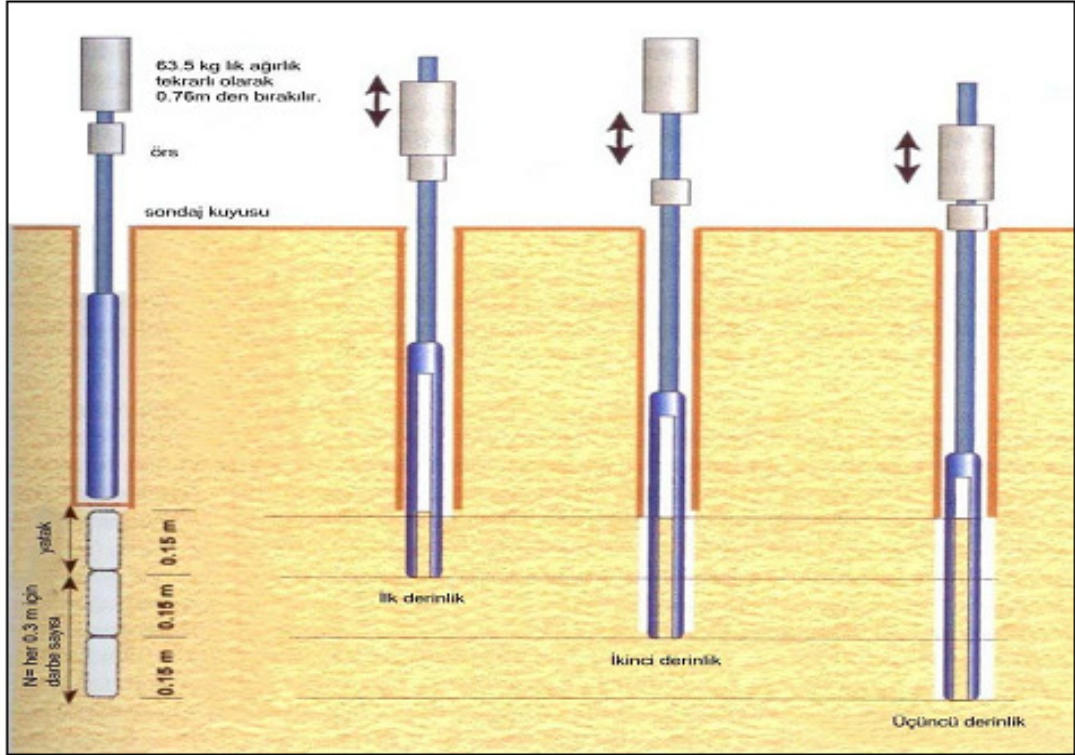
Ortalama çapı 20mm den büyük çakıllı veya taş içeren zeminlerde uygulanması durumunda yanıltıcı sonuçlar verebileceğinden böyle durumlarda uygulanmamalıdır.

Zeminlerin indeks, mekanik özelliklerini belirlemede, sıvılaşma analizlerinde, temellerin taşıma gücü ve oturma hesaplarında kullanılır.

Deneyin Yapılışı: 63,5 kg ağırlığında bir şahmerdan 76 cm yükseklikten bir yastık üzerine düşürülür. Verilen bu enerji ile ucu yarık numune alıcının (standart numune alıcı veya SPT kaşığı) zemin içine 15'er cm penetrasyon için gereken darbe adedi sayılır. Deneye 3 kez 15'er cm lik (toplam 45 cm) ilerleme sağlanıncaya kadar devam edilir.

SPT-N değeri son 30 cm ilerleme için kaydedilen darbe sayısı olarak belirlenir. Deney genellikle ilk 1,50 m derinlikte ve sonraki her 1,50 m'de ve değişen her birimde

tekrarlanır, SPT deneyine son iki darbe sayısının toplamı SPT-N=50 oluncaya kadar devam edilir [5] (Şekil 3.6).



Şekil 3. 6. Standard penetrasyon deneyi (SPT) yapılışı [3]

Deneyin avantajları:

- Deney ile numune elde edilmesi.
- Basit ve kolay uygulanabilmesi.
- Farklı zemin özelliklerinde kullanılabilmesi.
- Yumuşak ve zayıf kayalarda uygulanabilir olması.
- Yaygın olarak yapılabilir olması [5].

Deneyin dezavantajları:

- Alınan numunelerin örselenmiş olması ve sadece tanımlama deneylerinde kullanılması
- Sert killer ve molozlu - bloklü zeminlerde yanıltıcı sonuçlar vermesi.
- Sondaj firmalarına göre değişiklik göstermesi [5].

3.3.2. Konik penetrasyon deneyi (CPT)

Özellikle numune almanın çok zor olduğu yumuşak killer, şiltler ve kumlu zeminlerde uygulanır. Penetrometreler arasında en başarılı yöntemdir. Bunun nedeni, okumaların her 2 cm'de alınması ve deneyi yapanın alınan okumalara müdahale olanağının alt düzeyde olmasıdır. Zeminlerin sınıflandırılması, kayma mukavemeti parametreleri ile temellerin taşıma gücü ve oturma tahminlerinde kullanılmaktadır [5].

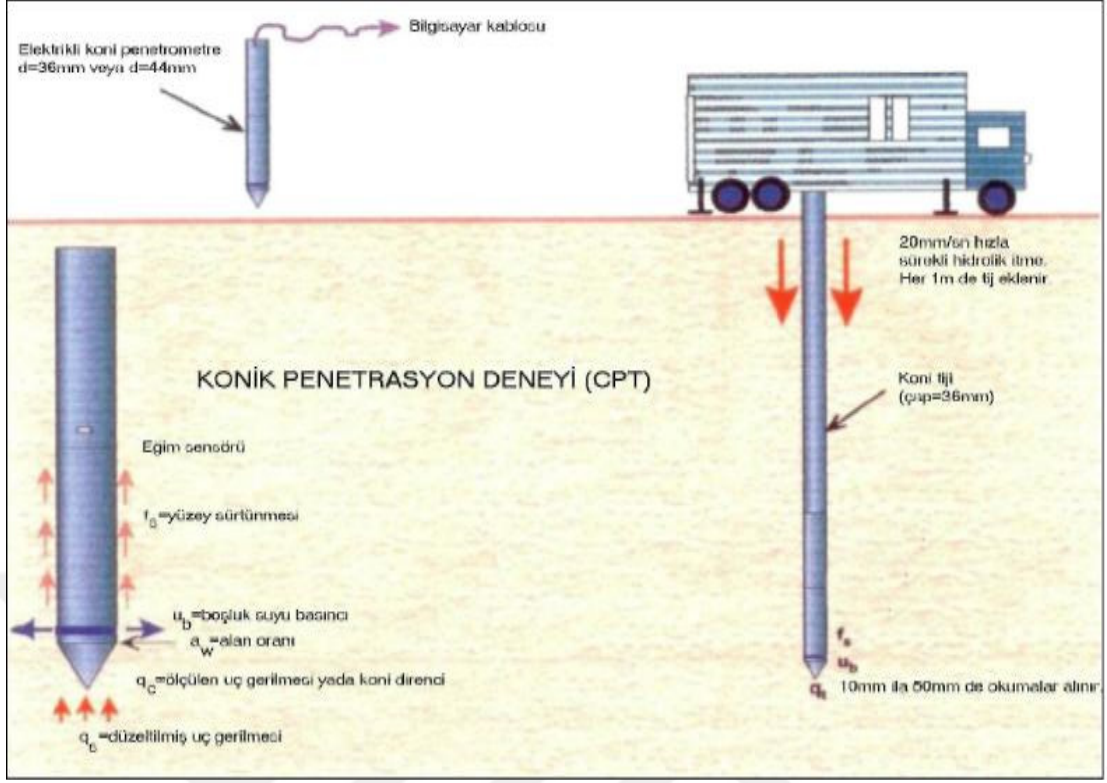
Deneyin yapılışı: Silindirik çelik bir prob zemine 20 mm/sn hızla itilerek sokulur. Prob'un zemine itilmesi sırasında üzerindeki algılayıcılarla uç direnci (q_c), çevre sürtünmesi (f_s) ve bazı modellerde boşluk suyu basıncı (u) ölçülerek kaydedilir [5] (Şekil 3.7.).

Deneyin Avantajları:

- Hızlı olması ve zemin profilinin sürekli olarak belirlenebilmesi.
- Sonuçların deneyi yapan operatöre bağlı olmaması.
- Numune alımı çok zor olan yumuşak killer ve siltli zeminler için uygun olması.
- Deney sonuçlarının yorumlanmasında dünyada çok yaygın olarak kullanılan teorisi kuvvetli yöntemlerin bulunması [5].

Deneyin Dezavantajları:

- Ülkemizde ekipmanın sınırlı olması.
- Bu konuda uzman bir operatör tarafından yapılmasının gerekliliği.
- Belirli aralıklarla ölçümleme gerektirmesi.
- Zemin numunesi alınamaması.
- Çakıllı ve bloklu zeminlerde uygulanamaması [5].



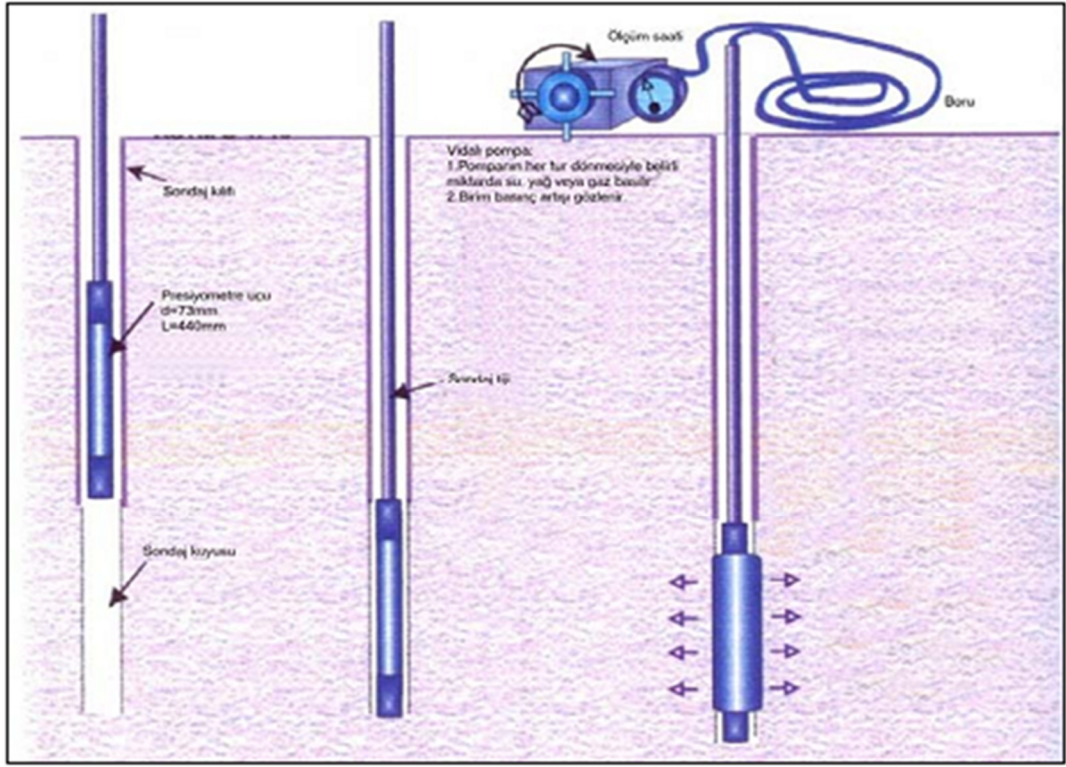
Şekil 3.7. CPT deneyi [3]

3.3.3. Presiyometre deneyi (PMT)

Özellikle numune almanın zor olduğu, sert killer ve ayrıışmış, çatlaklı yumuşak kayalarda uygulanır. Çoğunlukla her türlü zemin koşullarında uygulanabilen deney, özellikle örselenmemiş numune almanın zor olduğu çok çatlaklı kayalar ve katı killerde deformasyon ve mukavemet parametrelerinin belirlenmesi için yapılır [5].

Deneyin Yapılışı:

- 2 ucu gaz, ortası su ile şişebilen silindirik bir prob sondaj kuyusu içinde şişirilir (Şekil 3.8).
- Bu işlem sırasında prob içine giden sıvının miktarı ve basınç deneyin her safhasında ölçülerek kaydedilir.
- Sıvı miktarı ve basınç kullanılarak yapılan teorik hesaplar sonucunda zeminin gerilme deformasyon eğrisi elde edilir [5].



Şekil 3.8. PMT deneyi [3]

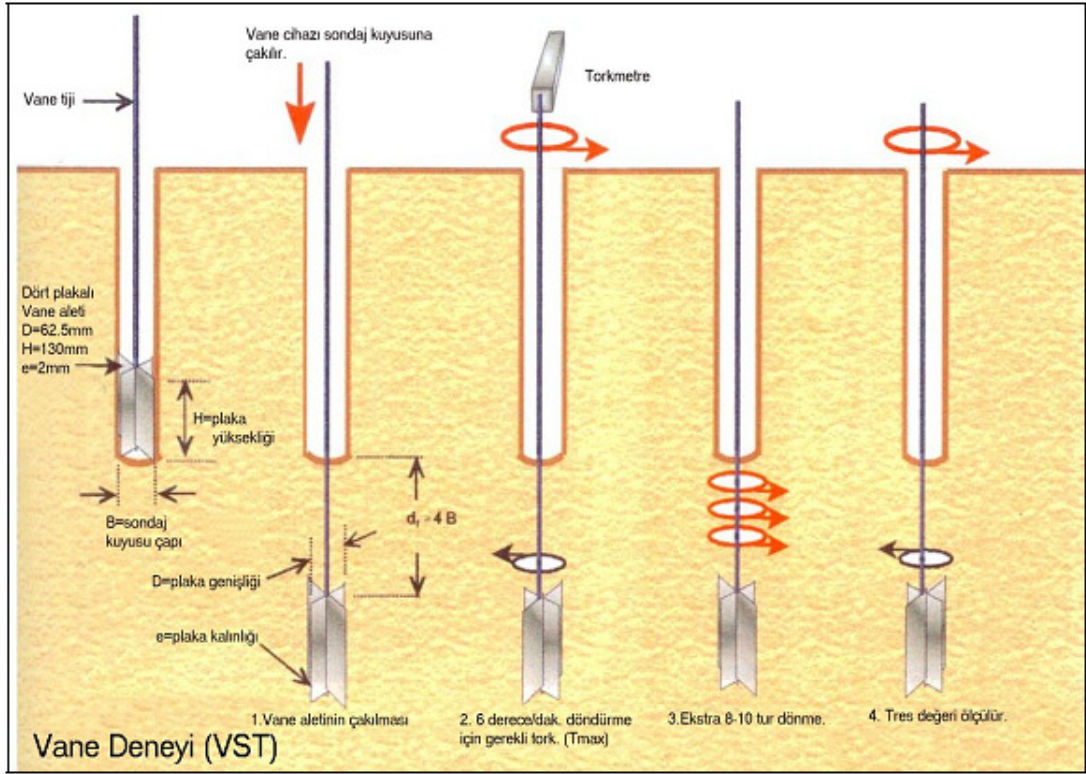
3.3.4. Arazi veyn deneyi (VST)

Arazi Veyn deneyi yumuşak-sert killer ve şiltlerin yerindeki (in-situ) drenajsız kayma mukavemetinin bulunmasında kullanılır.

Genellikle 1 m düşey aralıklarla yapılır. Dört kanatlı veyn aleti zemine batınlarak düşey eksenini etrafında belirli bir hızla döndürülerek, deney sırasında ölçülen tork ve veyn aletinin boyutlarından drenaj sız kayma mukavemeti hesaplanır [5] (Şekil 3.9).

Deneyin Avantaj ve Dezavantajı:

- Deneyin en büyük avantajı basit ekipmanlarla yapılabilir olmasıdır.
- Dezavantajları arasında, yumuşak-sert killerle sınırlı olması, kum bantlarından etkilenmesi en belirginleridir.



Şekil 3.9. VST deneyi [3]

3.4. Laboratuvar Çalışmaları

Laboratuvar deneyleri yapılmalarının görece kolaylığı ve düşük maliyeti nedeni ile çoğunlukla tercih edilmektedir. Ancak gereğince uygulanmadıkları ve araziden gelen numunenin amaca uygun olmaması durumunda sonuçlar yanıltıcı olmaktadır. Bu deneyler, TS 1900/2005 veya karşılıkları olan ASTM standartlarına göre gerçekleştirilir. Deneylerde en önemli husus numunelerin doğadaki özelliklerinin korunmasıdır. Bu amaçla örselenmiş zemin numuneleri ağzı parafinlenmiş cam veya plastik 500ml kaplarda veya çift plastik torbaya koyulup üzerleri sabit kalemle işaretlenerek, örselenmemiş numuneler ise benzer biçimde işaretlenmiş özel tüplerinde değişmez sıcaklık (20 °C) ve rutubette saklanır. Örselenmemiş numuneler ve kaya karotları araziden laboratuvara özel koruma kutusunda taşınmalıdır. Numuneler laboratuvarında iki haftadan fazla saklanacaksa ısı/rutubet kontrollü odada tutulmalıdır. Kaya numuneleri tortul kayaktan alınmış ise su içeriğini yitirmemeleri için karot kutusuna yatırılmadan örselenmiş zemin numuneleri gibi çift kat plastik torbaya konulmalıdır. Çatlaklı ortamdan alınmış kaya karotlarının süreksizlikler boyunca ayrılmaması için bunların kuyu başında bantlanması ve yönlendirilmesi gerekir [4].

Laboratuvar deneylerinin ana başlıklarıyla, uygulama bölümleri aşağıda verilmiştir [5].

Zeminde Sınıflandırma Deneyleri:

- Doğal su muhtevasının ölçümü (w_n)
- Kıvam limitlerinin ölçümü (Çarpmalı aletle veya konik penetrasyon deneyi ile likit limit ölçümü w_L , plastik limit w_p , büzülme limiti w_s)
- Dane boyutunun ölçümü (Elek ve hidrometre analizi)
- Zeminin Mekanik Özellikleri
- Zeminin fiziksel özelliklerinin ölçümü (Porozite n / Boşluk oranı e , Doğal su muhtevası w_n , dane özgül ağırlığı G_s)
- Zeminlerin sıkışabilirliği ($C_c / M, c_u$)
- Kumun kayma mukavemet parametresi (f, ϕ)
- Killi zeminin drenaj sız kayma mukavemeti (c_u)
- Konsolidasyonlu drenaj sız (CD) deneylerle mukavemet ölçümü (c', ϕ)
- Konsolidasyonlu drenajlı (CU) deneylerle mukavemet ölçümü ($c_u, \phi \gg I c', t_y$)

Kayaların Sınıflandırılması:

- Porozite (n)
- Elastisite modülü (E)
- Poisson oranı (ν)
- Basınç dayanımı (q_u)

Kaya Sınıflandırma Sistemleri:

- Suda dağılma yeteneğine göre
- Basınç dayanımına göre sınıflandırma
- Basınç dayanımı ve elastisite modülüne göre sınıflandırma
- Kaya kitlesinin sınıflandırılması

Kayanın Mekanik Özellikleri:

- Çekme mukavemetinin doğrudan ölçümü
- Çekme mukavemetinin yarma deneyi ile ölçümü
- Yenilme eğrisinin üç eksenli hücrede tayini
- Kaya çatlağının rijitlik ölçüsü.

3.4.1. Zemin mekaniği deneyleri

Zemin olarak nitelendirilen malzeme, birleşimi bakımından farklı birçok malzemeyi bünyesinde bulundurur. Bu yüzden zeminlerin arazideki yüklemeler (mühendislik yapıları) altındaki davranışlarını analiz etmek, mühendislik tasarımı için gerekli parametreleri bulmak ve tüm zeminler için geçerli bir davranış modeli kurmak son derece güçtür. Bu nedenle zemini belirli standart sistemlere göre sınıflandırmak gerekir [6].

Zeminleri sınıflandırmanın amacı, zeminleri özelliklerine göre gruplandırmaktır. Belli tür zeminlerin belli özelliklerinin olacağı aşikârdır. Zeminin sınıfı bilindiğinde, özellikleri de genel olarak belli olur. Bilindiği üzere; zemin, hem zemin altında taşıyıcı ortamdır, hemde örneğin toprak barajlarda olduğu gibi malzeme olarak kullanılır. Ayrıca geoteknik alanında yapılan çalışmalar, araştırmalar, zeminin sınıfı (zeminin cinsi) belirtilerek yayınlanmaktadır. Zeminin sınıfı belirtilmezse, bilgilerin birikimi veya geleceğe aktarılması imkânsız hale gelir [7].

Zeminler genel olarak; dane, su ve hava olmak üzere üç fazlı bir yapıdadır. Bu üç unsurun birbirleriyle olan ilişkileri ve bu ilişkilerin hem hacimsel hemde ağırlıksal olarak belirlenmesi zeminlerin tanımlanması ve sınıflandırılmasında önemli yer tutar. Zeminler oluşumları açısından iki gruba ayrılır. Bunlar mekanik ve kimyasal aşınmadır. Mekanik aşınma; fiziksel kuvvetler sonucu ana kayanın ufalanması, Kimyasal aşınma ise suların, asitlerin, alkali malzemelerin ana kaya ile reaksiyona ana kayayı ufalamasıdır [6].

Zeminin içyapısı, zemin içinde organik madde miktarı, bağlayıcı madde (çimentolaşma) varlığı, zeminin endeks özelliklerini etkiler. Zeminler, en genel olarak doğada ince daneli ve iri daneli zeminler olmak üzere ikiye ayrılabilir. İri daneli zeminlerde yerçekim kuvvetleri etken olurken ince daneli zeminlerde ise, zeminin bir parçası olarak içini ve çevresini saran su tabakasından dolayı çekim kuvvetleri etkindir. Bundan dolayı; daneleri birbirinden ayrık şekli, boyutları ve miktarları önem teşkil eden iri daneli zeminleri sınıflandırmak için, elek analizi kullanılır. Bunun yanında, ince daneli zeminleri sınıflandırmak için, ince daneli zeminde önemlilik arzeden su muhtevası miktarları belirlenerek ve sedimantasyon deneyi (Hidrometre veya Pipet analizi) yapılarak sınıflandırılır. İnce daneli zeminlerden olan fakat yapısı ve davranışı

farklı olan ayrıca alt bir sınıf olarak tanımlanabilir olan Organik Zeminler söylenebilir. En çok kullanılan endeks özellikleri; daneye bağlı olarak su muhtevası (w), boşluk oranı (e), kuru birim hacim ağırlığı (γ_k), dane birim hacim ağırlığı (γ_s), doygunluk derecesi (S_r), relatif sıklık (D_r) ve dane dağılımı, suya bağlı olarak da likit limit (w_L), plastik limit (w_p), rötire limiti (w_s), yapışma limiti, lineer rötire (L_s), şişme kapasitesi gibi özelliklerdir [6].

3.4.1.1. Sınıflandırma deneyleri

Elek analizi:

İri daneli zeminlerde dane çapı dağılımını belirlemek için kullanılan deney yöntemidir. Bu amaçla zemin numunesi, değişik büyüklükte açıklıkları olan bir seri standart elekten geçirilmekte ve değişik boyutlar arasında kalan danelerin ağırlık yüzdesi (toplam kuru ağırlığa oranı) saptanmaktadır. Zemin sırasıyla en büyük açıklıklı elekten en küçük açıklıklı eleğe doğru bir seri elekten geçirildiği zaman, bir elekten geçip diğeri üzerinde kalan danelerin içinde kaldığı çap sınırları belirlenmiş olmaktadır [8].

Hidrometre deneyi:

200 nolu elekten geçen ince daneli zeminlerin (şiltler ve killer) dane çaplarının belirlenmesi amacıyla kullanılmaktadır. Bu deney çalışmasında, belli bir ağırlıktaki zemin numunesi mekanik bir karıştırıcı ile karıştırılarak suda bir süspansiyon haline getirilir. İyice karıştırılan süspansiyon çökmeye bırakılarak değişik zaman aralıkları ile yoğunluk ölçümleri gerçekleştirilir. Bu sayede zemin içerisindeki danelerin çap dağılımları belirlenmiş olmaktadır [8].

Kıvam limitleri deneyleri:

İnce daneli zeminlerin mühendislik özellikleri boşluklarında bulunan su miktarına bağlı olarak değişmektedir. İnce daneli zeminlerin su muhtevası değiştikçe kıvamı da değişmektedir. Belirli bir sınır su muhtevası değerine kadar katı kıvamda bulunan zeminler, bu sınır su muhtevası değerinden belirli bir sınır su muhtevası değerine kadar plastik davranış sergilemektedir. Bu sınır su muhtevalarının hepsine birden kıvam limitleri denilmektedir. Kıvam limitleri ilk olarak Atterberg (1911) tarafından önerildiğinden Atterberg Limitleri olarak da adlandırılmaktadır [9]. Kıvam limitlerinin küçükten büyüğe doğru aldıkları isim ise sırası ile rötire limiti, plastik limit ve likit

limit'dir. Kıvam limitleri, aşağıda verilen deneyler yardımıyla laboratuvar ortamında tespit edilebilmektedir [8].

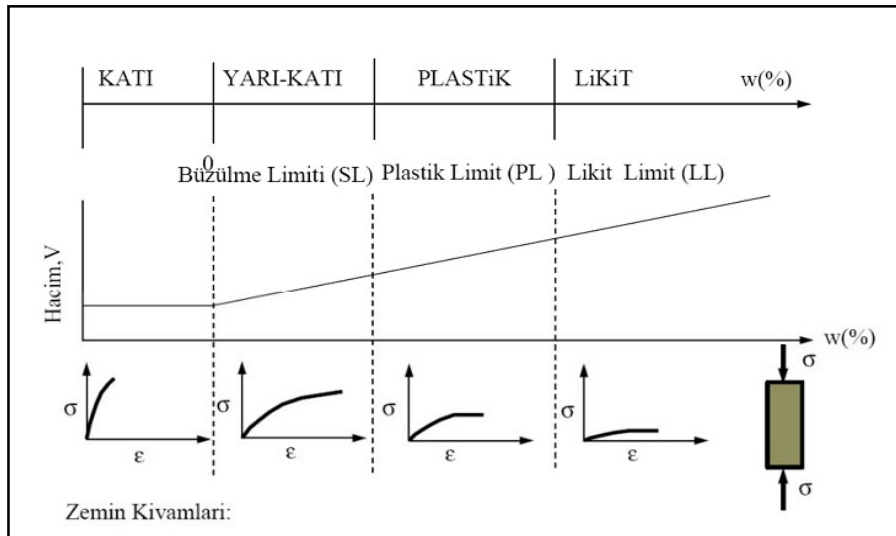
Likit Limit, viskozitesi yüksek bir sıvı gibi akışkanlığa sahip zeminin plastik duruma dönüştüğü su muhtevasıdır. Yani bir zeminin kendi ağırlığında akabildiği minimum su muhtevasıdır. Bulunacak likit limit değeri zeminlerin sınıflandırılması yanında, yaklaşık olarak sıkışma katsayısının da bulunmasını sağlar.

Plastik Limit Islak zeminin yoğrulma sırasında yüzeyinde çatlakların belirdiği andaki su muhtevasıdır.

Plastisite indisi, PI daha önce de belirtildiği gibi likit limit, LL ile Plastik limit, PL arasındaki farktır. Eğer herhangi bir sebepten dolayı likit limit veya plastik limit belirlenemezse örnek plastik değil, NP olarak tanımlanmalıdır. Plastik limit değeri likit limit değerinden büyük veya eşitse örnek yine plastik değil, NP olarak tanımlanmalıdır (Şekil 3.10).

Plastik limit bir zeminin plastik olarak davranabileceği son sınırdır. Dane çapı düştükçe plastik limitin sayısal değeri artma eğilimindedir.

Büzülme Limiti deneyi ile zeminin tek eksenli büzülme oranının ölçülmesini sağlar.



Şekil 3.10. İnce daneli zeminlerin kıvamı ve kıvam limitleri

3.4.1.2. Zeminin kayma direnci karakteristiklerini ölçen deneyler

Zemin tabakaları içinde, gerek kendi ağırlıklarından gerekse zemin üzerine uygulanan yüklerden dolayı gerilmeler oluşmaktadır. Uygulanan yükler altında zeminlerde ortaya çıkan gerilmeler ise zeminin şekil değiştirmesine yol açmaktadır. Diğer birçok inşaat malzemesine göre zeminlerin gerilme-şekil değiştirme davranışı genellikle çok daha karmaşık olmaktadır. Zeminler üzerine uygulanan yüklerin yol açtığı gerilmeler belirli sınır değerlerini aştığında, zeminde göçme meydana gelmektedir. Zeminlerde göçme meydana gelmesi için, olası bir kayma düzlemi boyunca kayma direncinin aşılması gerekmektedir. Zeminin kayma mukavemeti ise, göçmeye meydan vermeden karşı koyabileceği en büyük kayma gerilmesi olarak ifade edilebilir[8].

Diğer zemin problemlerinde olduğu gibi zemin etüt çalışmalarında da zeminlerin gerilme ve şekil değiştirme davranışının incelenmesi amacıyla kullanılan deneysel yöntemler aşağıda açıklanacaktır.

Kesme kutusu deneyi:

Kesme kutusu deneyinde, zemin numunesi dikdörtgen veya dairesel kesitli ve iki parçadan oluşan rijit bir kutu içine yerleştirilmektedir. Uygulanan bir kesme kuvveti altında, kutunun alt parçası sabit tutulurken üst parçası yatay bir düzlem üzerinde hareket edebilmekte ve böylece numunenin ortasından geçen yatay düzlem boyunca zemin kaymaya zorlanmaktadır [8].

Numune üzerine normal gerilme uygulamak, ve böylece kesmeden önce zeminin konsolide olması ve kesme sırasında normal gerilmelerin kontrol altında tutulması mümkün olmaktadır. Bu deneyde, zemin önceden belirlenmiş (numunenin ortasından geçen) yatay bir düzlem boyunca kırılmaya (göçmeye) zorlanmaktadır. Belirli bir normal gerilme altında, uygulanan kesme kuvveti ile meydana gelen yatay yer değiştirmelerdir. Deney sırasında ulaşılan en büyük kayma gerilmesi veya göçme, kabul edilebilecek şekil değiştirmelere yol açan kayma gerilmesi zeminin belirli bir normal gerilme altında tekrarlanarak mukavemet zarfını elde etmek mümkün olmaktadır [8].

Kesme sırasında oluşan boşluk suyu basıncı artışlarını ölçmenin mümkün olmaması, göçmeye ulaşılmadan önceki gerilme seviyelerinde asal gerilme doğrultularının

belirsiz olması ve kurulma düzlemi boyunca gerilme dağılımının üniform olmaması bu deneyin kısıtlayıcı yönlerini oluşturmaktadır. Uygulamada, kesme kutusu deneyi daha çok kumların kayma mukavemetini saptamak için kullanılmaktadır. Kum zeminler için elde edilen kayma mukavemeti açısı (f) drenajlı yükleme durumları için olup, arazi koşulları ile uyumlu olduğu kabul edilebilir. Deney numunesinin arazi boşluk oranına sahip olacak şekilde hazırlanmasına dikkat etmek gerekmektedir[8].

Serbest basınç deneyi:

Serbest basınç deneyinde silindirik bir zemin numunesi yalnızca eksenel doğrultuda yüklemeye tabi tutulmaktadır. Eksenel yük artışları altında meydana gelen numunenin boy kısalması (eksenel şekil değiştirme) ölçülmekte gerilme-şekil değiştirme eğrileri elde edilmektedir. Eksenel gerilmenin en büyük değeri (veya göçme kabul edilebilecek şekil değiştirme seviyesine karşılık gelen değeri) zeminin serbest basınç mukavemeti (q_u) değerini vermektedir. Numunede oluşan kayma düzleminin alt ve üst yükleme başlıkları ile kesişmemesi için, boy uzunluğu/çap oranının, $h/d > 2$ olarak seçilmesi uygun olmaktadır [8].

Serbest basınç deneyi ancak herhangi bir yan destek olmaksızın kendi kendini dik olarak ayakta tutabilecek özelliklere sahip zeminler üzerinde uygulanması mümkün değildir, yalnızca killi zeminler için kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır. Deney sırasında numunenin drenaj koşulları kontrol edilmediği için, hızlı yükleme yapılarak zeminin drenaj sız kayma mukavemetinin elde edildiği kabul edilmektedir. Eksenel yüklemeye önce zemini konsolide etmek ve eksenel yükleme sırasında oluşan boşluk suyu basınçlarını ölçmek mümkün olmamaktadır. Bu kısıtlayıcı yönlerine karşın, serbest basınç deneyi killerin drenaj sız kayma mukavemetini belirlemede yaygın olarak kullanılan bir deney yöntemi olmaktadır [8].

Üç eksenli basınç deneyi:

Zeminlerin kayma mukavemetini saptamak için kullanılan laboratuvar deney yöntemleri arasında üç eksenli basınç deneyi en gelişmişlerinden biri olmaktadır. Bu deney düzeni ile, zeminin arazi koşullarında sahip olacağı kayma mukavemetini gerçeğe yakın olarak belirlemek mümkün olmaktadır. Üç eksenli basınç deneyinde kontrol edilebilen ve ölçülebilen parametreler şu şekilde sıralanabilir [8]:

- Zemin numunesi arazi gerilmeleri altında konsolide edilebilmekte ve doygunluk derecesi kontrol edilebilmektedir.
- Yanal ve eksenel gerilmeler uygulamak sureti ile arazi yükleme izlerine yakın yüklemeler yapılabilmektedir.
- Eksenel yükleme sırasında drenaj sız veya drenajlı koşullar geçerli kılınabilmektedir.
- Drenaj sız yüklemelerde numunede oluşan boşluk suyu basıncı artışları, drenajlı deneylerde ise meydana gelen hacim değişimleri ölçülebilmektedir.

Üç eksenli basınç deneyinde, silindirik bir zemin numunesi bir hücre içine yerleştirilmekte ve hücreye uygulanan basınç (hava veya su basıncı) vasıtası ile zemin numunesi üzerinde hidrostatik bir basınç uygulanabilmektedir. Numune etrafına geçirilen bir lastik kılıf zeminin hücreyi dolduran su ile temas etmesini önlemekte ve numune içine ve dışına ayrı ayrı basınçlar uygulanmasını mümkün kılmaktadır. Numune üst başlığına temas eden bir piston vasıtası ile eksenel gerilme uygulanmakta, numune alt ve üst başlıklarına bağlı ince kanallar vasıtası ile de deney sırasında drenaj durumu (zemin suyunun dışları çıkıp çıkmaması) kontrol edilebilmektedir[8].

Üç eksenli basınç deneyi iki aşamadan oluşmaktadır[8]:

1. Aşama: Zemin numunesi üzerine arazide yüklenmeden önce etkiyen gerilmelerin hücre basıncı vasıtası ile uygulanması. Bu aşamada drenaja izin verilirse numune konsolide edilebilmektedir.
2. Aşama: Eksenel basınç uygulanması. Bu aşama drenajlı ve drenaj sız olarak gerçekleştirilebilmektedir. Drenajlı deney yapılması durumunda, yükleme hızının zeminin permeabilitesine göre seçilerek, zemin içindeki suyun rahatlıkla dışarı çıkmasına, dolayısıyla boşluk suyu basıncı artışları oluşmamasına dikkat etmek gerekmektedir.

Yukarıdaki aşamaların her ikisinde de drenaj durumu kontrol edilerek, üç değişik türde üç eksenli basınç deneyi yürütmek mümkün olmaktadır:

- a) Konsolidasyonsuz-Drenajsız Deneyler (UU-deneyleri): Bu tür deneyde, zemin suyunun gerek hücre basıncı uygulanmasında gerekse eksenel yükleme sırasında numuneden dışları çıkmasına izin verilmemektedir.

- b) Konsolidasyonlu-Drenajsız Deneyler (CU-deneyleri): Birinci aşamada hidrostatik basınç altında zemin suyunun dışarı çıkmasına (numunenin konsolide olmasına) izin verdikten sonra, ikinci aşamada drenaj sız durumda eksenel yükleme yapılan deneyler.
- c) Konsolidasyonlu-Drenajlı Deneyler (CD-deneyleri): Her iki aşamada da (hidrostatik hücre basıncı uygulanması ve eksenel yükleme) drenaja izin verilen tür deneylerdir.

Değişik türde üç eksenli basınç deneyleri uygulanarak, arazideki zemin tabakalarının farklı yükleme ve drenaj koşulları altında gösterecekleri gerilme-şekil değiştirme davranışlarını ve kayma mukavemetlerini belirlemek mümkün olmaktadır [8].

3.4.1.3. Zeminin oturma ve sıkışma karakteristiklerini belirleyen deneyler

Üzerine yük uygulanan her malzemenin şekil değiştirme göstermesi gibi zeminler de yük altında şekil değiştirmeye maruz kalmaktadırlar. Uygulanan yükler zemin içerisinde gerek kayma gerilmelerine gerekse düşey ve yatay düzlemlere etkiyen normal gerilmelerde artışlara sebep olmaktadır. Uygulanan yüklerin yol açtığı düşey normal gerilme artışları ise zeminin kayma mukavemetini etkilemekle birlikte, zeminde düşey şekil değiştirmelere de yol açmaktadır. Yük altında kalan zemin tabakalarının düşey şekil değiştirmeleri toplamı zemin yüzeyinde ya da temel altında oturmalar meydana gelmesi sonucunu doğurur. Temeller altında meydana gelen bu tür zemin deformasyonları sonucunda; yapının güvenliği açısından tehlike oluşturacak durumlar meydana gelebilmektedir. Yük altında zeminde meydana gelecek şekil değiştirmelerini deneysel yöntemler ile belirlemek amacıyla çeşitli teknikler geliştirilmiştir. Zemin etüt çalışmalarında da yararlanılan bu laboratuvar deneylerine aşağıda kısaca değinilmiştir [8].

Konolidasyon deneyi:

Arazideki zemin tabakalarının düşey yüklemeler altında sıkışması esas olarak tek boyutlu bir sıkışma problemi oluşturduğu için, laboratuvar deney düzeneğinde zeminin yanal genişlemesine izin verilmemekte ve belirli düşey yükler altında zeminin boy kısalması ölçülmektedir. Ödometre cihazında rijit bir çelik halka içerisine yerleştirilen zemin numunesinin alt ve üst yüzeylerine konan geçirimsiz taştardan zemin

içerisindeki suyun düşey doğrultuda hareketle dışarı çıkmasına izin verilir. Uygulanan yük altında meydana gelen düşey şekil değiştirmeler okuma saati yardımıyla sürekli ölçülerek kaydedilir. Zemin numunesinin alanı sabit olduğundan, boy kısalması ölçümlerinden hacim değişiklikleri kolaylıkla hesaplanabilmektedir [8].

3.4.1.4. Diğer laboratuvar deneyleri

Zeminlerin özellikle kayma mukavemetlerinin laboratuvarında deneysel yöntemler yardımıyla belirlenmesi için yukarıda kısaca açıklanan deney çalışmaları yanında birçok farklı deney yöntemi de geliştirilmiştir. Burada, bu deney yöntemlerinden özellikle killerin drenaj sız kayma mukavemetinin belirlenmesi amacıyla zemin etüt çalışmalarında kullanılan iki yöntem kısaca açıklanacaktır [8].

Laboratuvar veyn deneyi:

Bu deneyde fırıldak (veyn) zemin içine batırıldıktan sonra, zemin içinde dönmeye zorlanmakta, zeminin direncinin aşılmasına karşılık gelen burulma momentinden zeminin kayma mukavemeti hesaplanabilmektedir [8].

Düşen koni deneyi:

Bu deneyde, standart boyutlarda ve ağırlıkta metal bir koni, sabit bir yükseklikten zemin numunesi üzerine düşürülmekte, zeminin drenaj sız kayma mukavemetinin koninin ağırlığı ile doğrudan, koninin zemin içine batma miktarının karesi ile tersten orantılı olduğu kabul edilmektedir. Aletin kalibrasyon tablolarından, zemin içine batma miktarından zeminin drenaj sız kayma mukavemeti elde edilebilmektedir. Bu deneyin de yalnızca yumuşak normal konsolide killerde güvenilir sonuç verdiği kabul edilmektedir [8].

3.4.2. Kaya mekaniği deneyleri

Kayaçların mühendislik amaçlarıyla sınıflandırılması ve mühendislik özelliklerinin belirlenmesi, kaya mekaniği biliminin ve bununla ilgili tasarım uygulamalarının ayrılmaz ve önemli bir parçasıdır. Mühendislik yapılarının veya içinde inşa edileceği kayaçların öncelikle litolojik ve mineralojik-petrografik anlamda tanımlanması ve bunu izleyen aşamada bunların indeks ve dayanım parametrelerinin saptanması gerekmektedir [10].

Süreksizliklerle bölünmüş kaya kütlelerinin iki elemanını oluşturan kayaç malzemesi ve süreksizliklerin indeks özellikleri ile dayanım ve deformasyon parametrelerinin saptanmasında laboratuvar deneylerinden faydalanılmakta, dayanım-deformasyon özellikleri için ayrıca arazi (in-situ) deney yöntemleri de uygulanmaktadır [10].

Kayaç malzemesini mühendislik sınıflaması açısından tanımlamaya yönelik özellikler, indeks özellikler olup, bunların arasında oldukça yüksek korelasyonların elde edilmesi mümkündür. Doğru indeks deneylerin seçilmesi koşuluyla, kökenine bakılmaksızın birbirine yakın indeks parametrelerine sahip kayaçların, benzer mühendislik davranışı göstermeleri beklenir [10].

Ayrıca indeks özelliklerin saptanmasında kullanılan deney yöntemleri basit, ucuz ve kısa sürede gerçekleştirilebilen yöntemler oldukları için, yaygın olarak tercih edilirler. Bu avantajları nedeniyle çok sayıda indeks deney, kayaçlardaki yanal ve düşey yönlerdeki değişimlerin değerlendirilmesi açısından da yararlıdır. Bununla birlikte, bu tür deneylerden elde edilen veriler mühendislik tasarımında doğrudan kullanılmamaktadır [10].

Kayaçların tek eksenli ve çevre basınçlı/üç eksenli sıkışma koşulları, çekilme ve makaslama kuvvetleri altındaki davranışları ve bunlarla ilgili parametreler ise mühendislik tasarımında dikkate alınan girdi parametreleri olup, bunların tasarım deneyleri olarak gruplandırılan deneylerle saptanması gereklidir [10].

Aşağıda yer alan Laboratuvar deneyleri için uluslararası standartlar ve önerilmiş yöntemler esas alınarak sonuçlarının değerlendirilmesi yapılmalıdır. Buna göre incelenecek laboratuvar deneyleri şunlardır;

Fiziksel Ve İndeks Özelliklerin Saptanmasına Yönelik Deneyler:

- Su içeriği saptanması
- Yoğunluk/birim hacim ağırlık ve porozite miktarlarının saptanması
- Ağırlıkça ve hacimce su emme deneyi
- Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneyi
- Schmidt çekici deneyi
- Nokta yükü dayanım indeksi deneyi
- Disk makaslama dayanım indeksi deneyi

- İslanma-kuruma deneyi
- Donma-çözülme deneyi

Tasarım Deneyleri:

- Doğrudan çekme deneyi
- Brazilian deneyi
- Tek eksenli sıkışma dayanımı deneyi
- Elastisite modülü ve poisson oranı saptanması
- Üç eksenli sıkışma deneyi
- Çift makaslama deneyi
- Süreksizlikler için taşınabilir kaya makaslama kutusu düzeneği ile deformasyon kontrollü doğrudan makaslama cihazıyla yapılan makaslama deneyi
- Sonik hız deneyi [10].

3.4.2.1. Fiziksel ve indeks özelliklerin saptanmasına yönelik deneyler

Su İçeriği Saptanması Deneyi:

Bu deneyin amacı doğal ortamdan alınan kayaç örneklerinin içerdiği suyun ağırlığının, etüvde kurutulmuş örneğin ağırlığına oranını belirlemektir.

Yoğunluk – Birim Hacim Ağırlık Saptanması (Kumpas Yöntemiyle):

Bu deney, düzenli bir geometriye sahip karot veya prizmatik kayaç örneklerinin kütleli (gözenekler de dahil) yoğunluğunun ve birim hacim ağırlığının saptanması amacıyla yapılır. Bu yöntemle yoğunluğu ve birim hacim ağırlığı saptanacak kayaç örnekleri, şişebilen ve ıslanma-kuruma sonucu kolaylıkla dağılabilecek özellikte olmamalıdır [10].

Ağırlıkça Ve Hacimce Su Emme Deneyi:

Bu deneyin amacı düzenli bir geometriye sahip kayaç örneklerinin, ağırlıklarına ve hacimlerine oranla, boşluklarının alabileceği su miktarını saptamaktır. Bu yöntem şişebilen ve ıslanma-kuruma sonucunda kolaylıkla dağılabilen kayaçlar için uygun değildir[10].

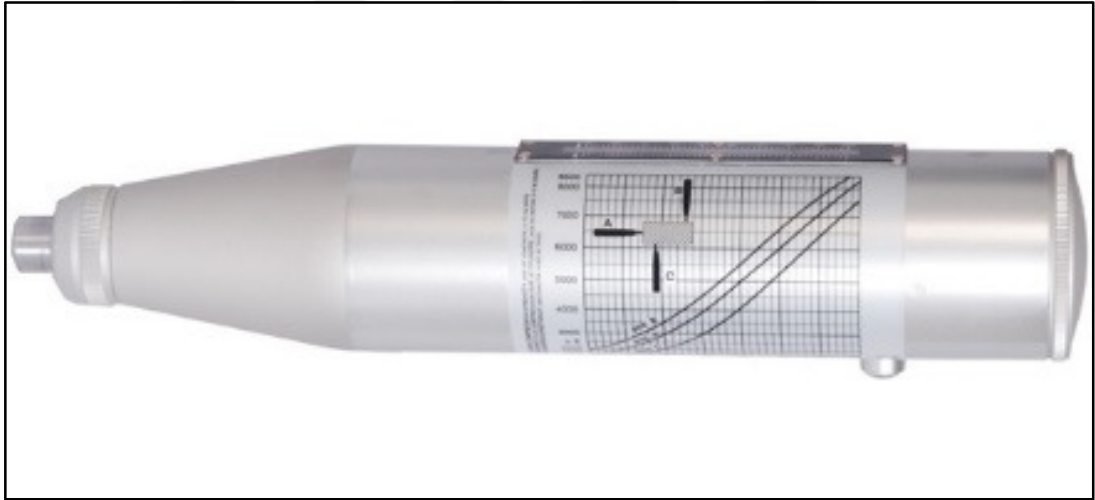
Suda dağılmaya karşı duraylılık indeksi deneyi:

Bu deneyin yapılmasındaki amaç, kayaç örneğinin standart iki çevrim süresince kurumaya ve ıslanmaya bırakılması durumunda, parçalanmaya ve zayıflamaya karşı gösterdiği duraylılığın belirlenmesidir [10].

Kaya sertliği belirleme (Schmidt Çekici) deneyi:

Bu deney Schmidt çekici kullanılarak, kayaçlarda schmidt geri sıçrama değerinin saptanması ve dolaylı olarak tek eksenli sıkışma dayanımlarının saptanması amacıyla yapılır. Schmidt çekici, çok zayıf ve çok sert kayaçlarda sağlıklı sonuçlar vermemektedir [10].

Schmidt Çekici; Bu aletin sertliği gösteren 0'dan 120'ye kadar bölünmüş ölçeği vardır. Kayaç örneğinin veya doğrudan kayacın yüzeyine dikey olarak uygulanır. Aletin kayaca temas ettiği noktadaki uç elmas bir uç olup 0,03 inç çapındadır. Schmidt Çekicinin N ve L tipi türleri vardır [11] (Şekil 3.11).



Şekil 3.11. Schmidt Çekici

Schmidt çekici değerlerine göre kaya sertliği tanımlamaları Tablo 3.2.'de gösterilmiştir.

Tablo 3.2. Schmidt çekici değerlerine göre kaya sertliği tanımlamaları [11].

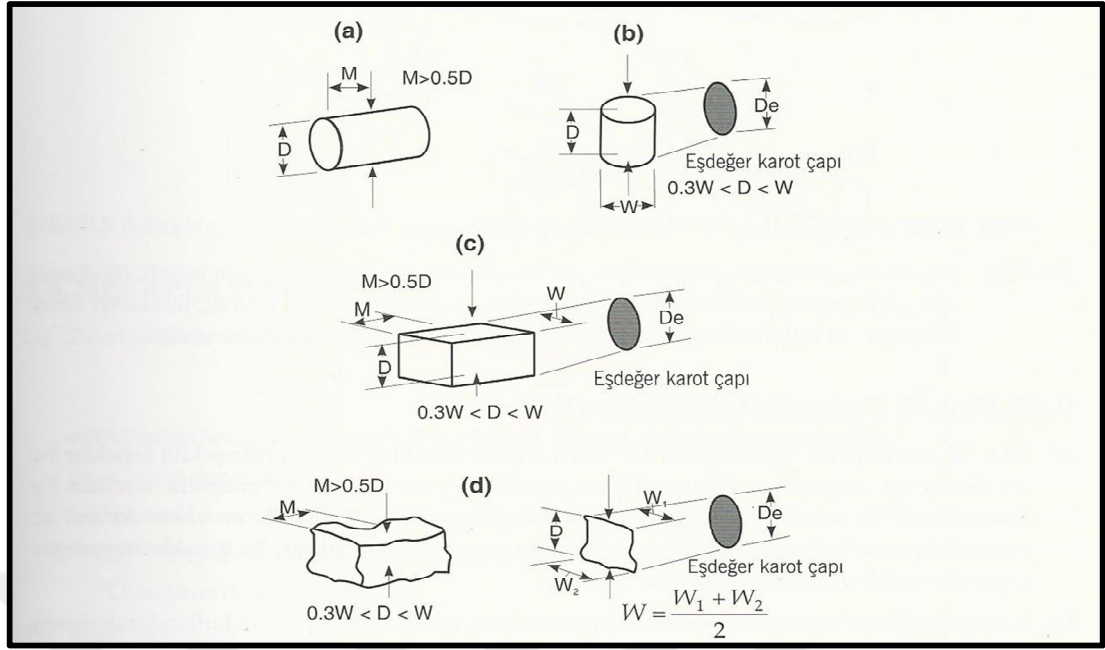
Schmidt Çekici Değeri	Tanımlama Terimi
0 - 10	Yumuşak
10 - 20	Az Yumuşak
20 - 40	Az Sert
40 - 50	Sert
50 - 60	Oldukça Sert
> 60	Çok Sert

Nokta yükü dayanım indeksi deneyi:

Bu deney kayaların dayanımlarına göre sınıflandırılmasında kullanılan nokta-yükü dayanım indeksinin saptanması amacıyla yapılmaktadır. Nokta yükü dayanım indeksi, tek eksenli sıkışma ve çekilme dayanımı gibi diğer dayanım parametrelerini dolaylı olarak belirlenmesinde ve bazı kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde kayaç malzemesinin dayanım parametresi olarak kullanılır. Deney sonucu esas alınarak, kayacın nokta yükü dayanım indeksi ve ayrıca dayanım anizotropi indeksi de hesaplanabilmektedir [10] (Şekil 3.12).

Bu deney için silindirik karot örneklerinin yanı sıra, blok ve düzensiz şekilli örnekler de kullanılabilir. Karot örneği, konik yükleme başlıklarının arasına karot eksenine dik veya paralel konumda yerleştirilebilir. Bu yüzden Nokta yükleme deneyi;

- 1- Çapsal deney (Karot eksenine dik yönde yükleme).
- 2- Eksenel deney (Karot eksenine paralel yönde yükleme).
- 3- Blok ve düzensiz örneklerle, üç farklı şekilde yapılabilmektedir [10].



Şekil 3.12. Örnek şekilleri; a) çapsal, b) eksenel, c) blok d) düzensiz şekilli. [10]

Islanma – kuruma deneyi:

Bu deney, ıslanma-kuruma çevrimi koşullarında, aşınmaya karşı kayaların duraylılığının belirlenmesi amacıyla yapılan bir indeks deneyidir. İstenirse ıslanma-kuruma etkisiyle örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde oluşabilecek değişimler de saptanabilir [10].

Disk makaslama dayanım indeksi deneyi:

Bu deney; standartlara uygun şekilde örnek hazırlanamayan ve özellikle zayıf, kırıklı ve içerdiği sık aralıklı süreksizlikler nedeniyle dilimler halinde ayrılabilen kayalardan hazırlanmış disk şeklindeki örneklerin disk makaslama dayanım indeksinin (Disk Makaslama İndeksi, DMI) saptanması ve DMI değerinden tek eksenli sıkışma dayanımının belirlenmesi amacıyla yapılır [10].

Kaya dayanımı, özellikle tek eksenli sıkışma dayanımı, kaya kütlesi sınıflama sistemlerinde ve değişik türde kaya mühendisliği tasarımlarında önemli bir parametredir. Dayanımın tayini için standartların veya önerilmiş yöntemlerin önerdiği boyutlarda silindirik örneklerin hazırlanması gerekmektedir. Ancak kayaların sık aralıklı tabakalanma, lamina, Viskozite yüzeyi vb. gibi süreksizliklerle bölünmüş olması halinde, dayanım deneyleri ve hatta nokta yükü dayanım indeksi deneyi için bile uygun boyutlarda örnek hazırlanamamaktadır [10].

Yukarıda belirtilen örnek hazırlamayla ilgili güçlük ve sınırlamaları giderebilecek ve daha küçük örneklerin kullanılabilceği indeks deneyler her zaman ilgi çekici olmuştur. Bu amaçla, Hollanda'nın Delft Üniversitesi'nde yapılan bir düzenekle DMI deneyi ilk kez gündeme gelmiştir (van der Schrier,1988). Ancak ince disk şeklindeki örneklerin kullanıldığı bu araştırmada, az sayıda kaya türü üzerinde çalışılmış ve deneyde örnek boyut etkisi ile DMI' nin kullanım alanları dikkate alınmamıştır [10].

Çalışmalar sonucunda, diğer indeks deneylerle karşılaştırıldığında, tek eksenli sıkışma dayanımının DMI' den daha az bir hata payıyla dolaylı olarak belirlenebileceği ortaya konmuştur. Ayrıca bu deneyde boyut düzeltme faktörleri ve kaya malzemesinin dayanıma göre sınıflandırılmasında DMI' nin alternatif bir parametre olabileceği de önerilmiştir [10].

Donma – Çözülme deneyi:

Bu deney, donma – çözülme çevrimi koşullarında, kayaçların aşınmaya karşı duraylılığının belirlenmesi amacıyla yapılır. Donma - çözülme etkisiyle, örneklerin fiziksel ve mekanik özelliklerinde meydana gelebilecek değişimler de saptanabilir [10].

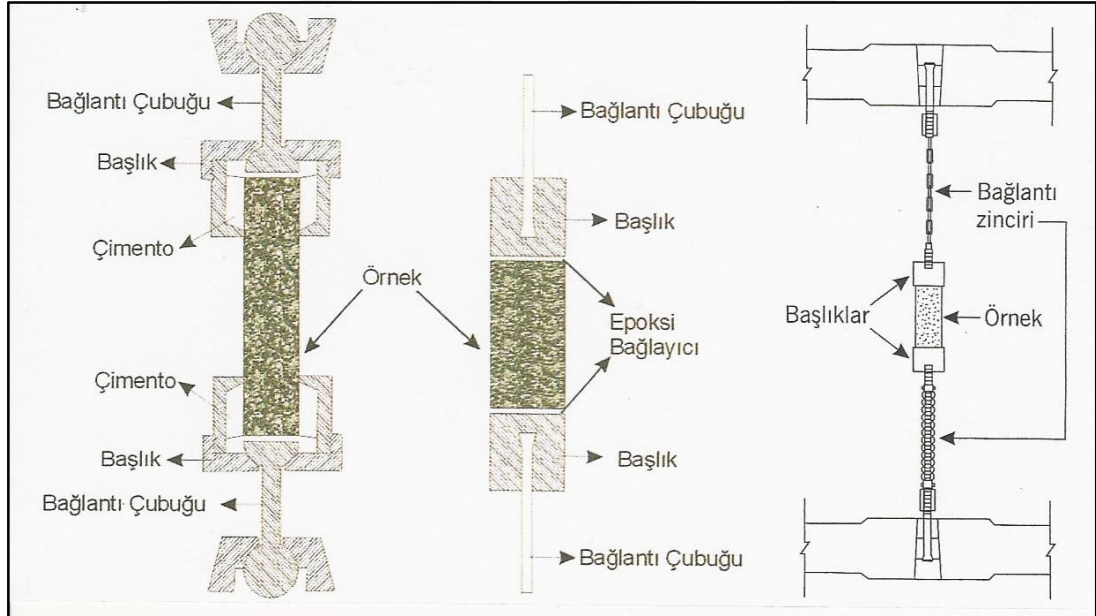
3.4.2.2. Tasarım deneyleri

Doğrudan çekme deneyi:

Bu deney, düzenli bir geometriye (silindirik karot örneği) sahip kayaç örneklerine doğrudan uygulanan eksenel çekilme gerilimleri altında çekilme dayanımlarının saptanması amacıyla yapılır. Kayaçların çekilme dayanımı, sıkışma dayanımlarına göre daha büyük sapma gösterir. Bunun nedeni, eksenel çekilme yükünün tam olarak örneğin eksenine paralel uygulanamaması ve kısmen de yenilmenin tabakalanma yüzeyi, yeniden çimentolanmış eklem yüzeyi vb. gibi zayıflık düzlemleri boyunca gelişebilmesidir. Bu yöntem, deney sırasında özellikle kayaç örneği ile eksenel yükleme başlıkları arasındaki bağlantının sağlanabilmesiyle ilgili güçlükler ve örneğin yenilmesinden önce bu bağlantı yüzeyleri boyunca örneğin ayrılması nedeniyle, Brazilian deney yöntemine göre daha az tercih edilir. Bu deneyin uygulanmasında yöntem olarak ISRM (1991) ve ASTM (1994) tarafından önerilen ve çok benzerlik taşıyan yöntemler esas alınmıştır [10] (Şekil 3.13, Şekil 3.14).



Şekil 3.13. Doğrudan çekme deneyi için yükleme presisi



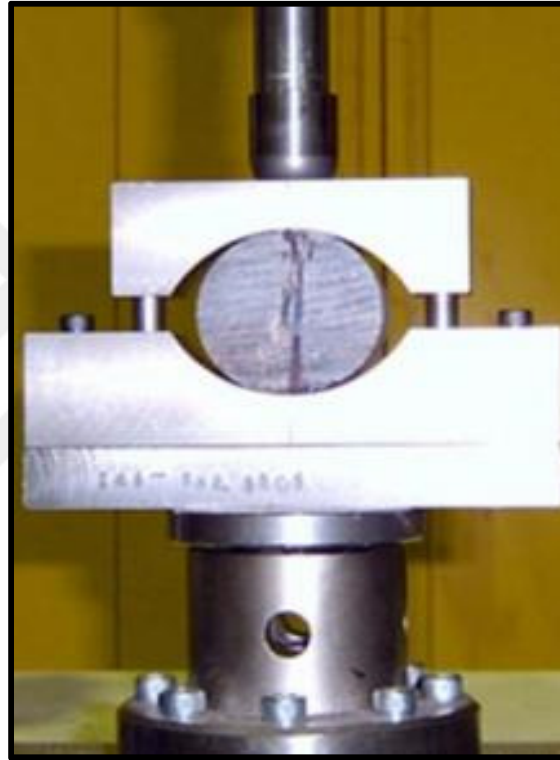
Şekil 3.14. Doğrudan çekilme deneylerinde örneğin konumu ve yükleme başlığı türleri [10]

Brazilian deney yöntemiyle kayaçların endirekt çekme dayanımlarının saptanması:

Bu deney, disk şeklinde hazırlanmış kayaç örneklerinin çapsal yükleme altında çekilme dayanımlarının dolaylı yoldan saptanması amacıyla yapılır. Bu yöntemde silindirik kayaç örneklerinin uçlarından sabitlenerek çekilmesi şeklinde uygulanan

doğrudan çekme deneyine göre, genellikle biraz daha yüksek çekilme dayanımları elde edilmektedir. Bununla birlikte, örneklerin deneye hazırlanması ve deneyin yapılışı açısından daha pratik olması nedeniyle, Brazilian yöntemi daha sık kullanılmaktadır [10].

Brazilian deneyi, örneğe düşey yönde bir basma kuvveti uygulandığında , bu kuvvetin etkisiyle örnek içinde, yatay yönde çekme kuvveti oluşarak örneğin kırılması esasına dayanmaktadır [11] (Şekil 3.15, Şekil 3.16).



Şekil 3.15. Brazilian deney düzeneği



Şekil 3.16. Brazilian deneyinde kullanılacak olan örnekler

Tek eksenli sıkışma deneyi:

Bu deney, silindirik bir şekle sahip kayaç malzemesi örneklerinin dayanım ve kaya kütlesi sınıflamalarında, ayrıca tasarımda yaygın biçimde kullanılan tek eksenli sıkışma dayanımının saptanması amacıyla yapılır. Deney sırasında eksenel deformasyon da ölçülerek, kayaç malzemesinin deformasyon ve yenilme karakteristikleri de değerlendirilebilir [10] (Şekil 3.17).



Şekil 3.17. Tek eksenli sıkışma deney düzeneği

Elastisite modülü ve poisson oranı saptanması deneyi:

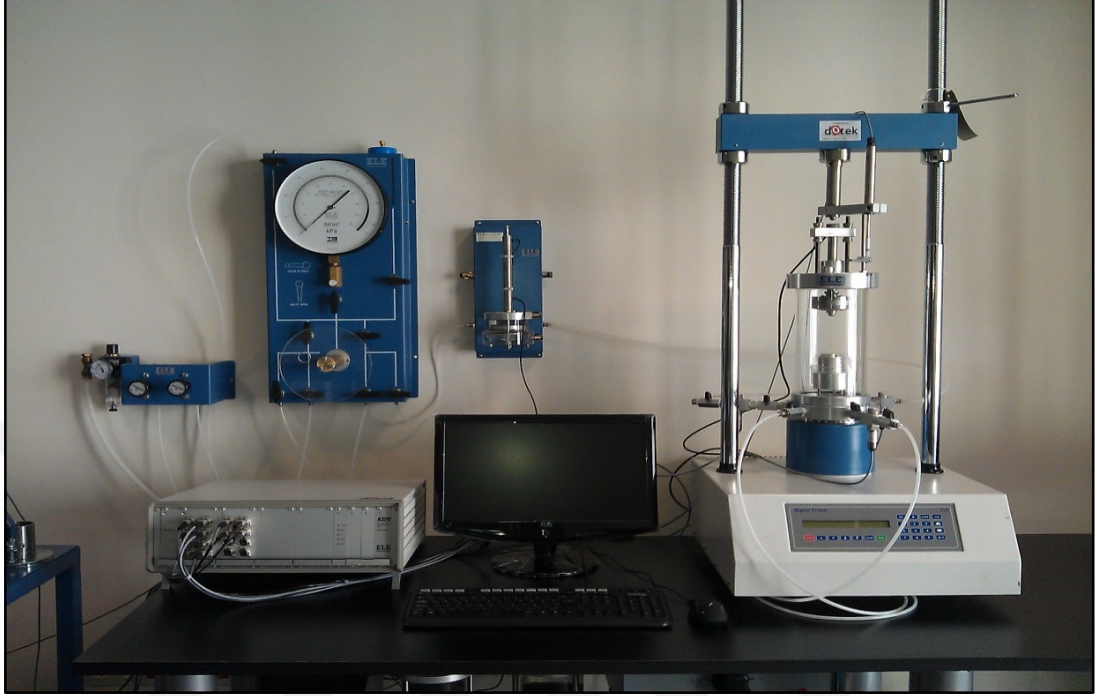
Bu deney, silindirik şekilli sağlam kayaç karot örneklerinin tek eksenli yükleme koşulunda “gerilme – birim deformasyon” eğrilerinin çizilmesi ve Young modülü ile Poisson oranının saptanması amacıyla yapılmaktadır [10].

Üç eksenli sıkışma deneyi:

Üç eksenli sıkışma (Basma) dayanımı, yan basınç altında örneğin yenildiği andaki eksenel gerilme düzeyidir. Aynı örneğe yan basınçlar değiştirilerek uygulandığında farklı üç eksenli sıkışma (basma) dayanımı değerleri elde edilir. Yan basınç arttırıldığında, üç eksenli sıkışma (basma) dayanımı ve yenilmeden önceki elastik birim deformasyon değerleri artar [11].

Bu deney üç eksenli sıkışmaya maruz kalan silindirik kaya örneklerinin makaslama dayanımının saptanması amacıyla yapılmaktadır. Deney verileri kullanılarak, kayaca

ait yenilme zarfı çizilir ve kaya malzemesinin içsel sürtünme açısı (ϕ) ve kohezyonu (c) belirlenir [10] (Şekil 3. 18).



Şekil 3.18. Üç eksenli deney düzeneği

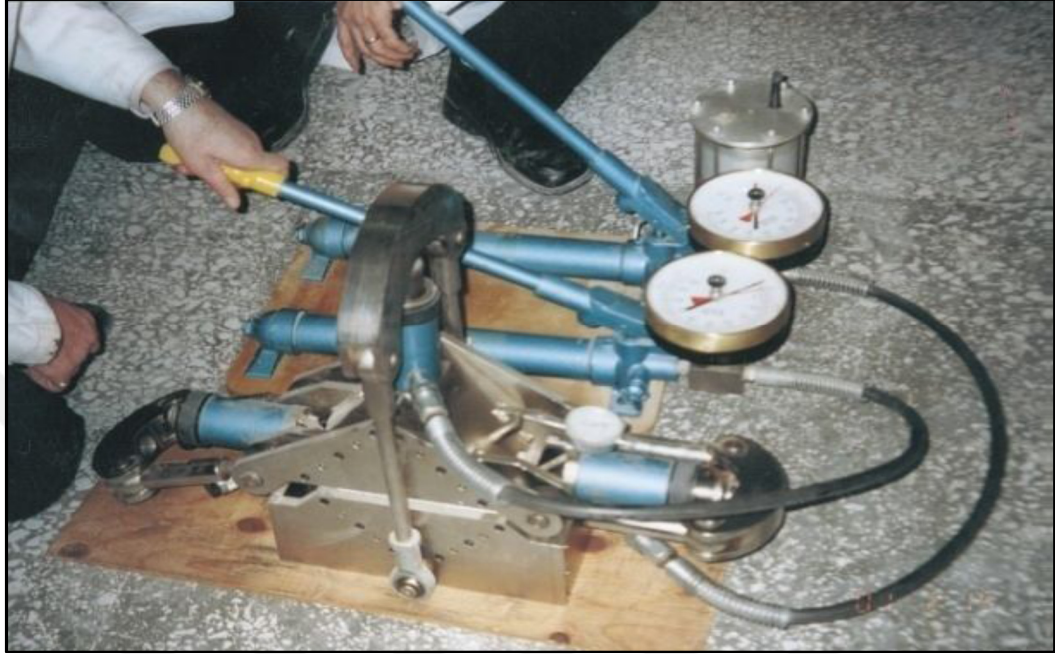
Çift makaslama deneyi:

Düzenli bir geometriye sahip sağlam karot örneklerinin makaslama dayanımlarının belirlenmesi için yapılır (Şekil 3.19.).

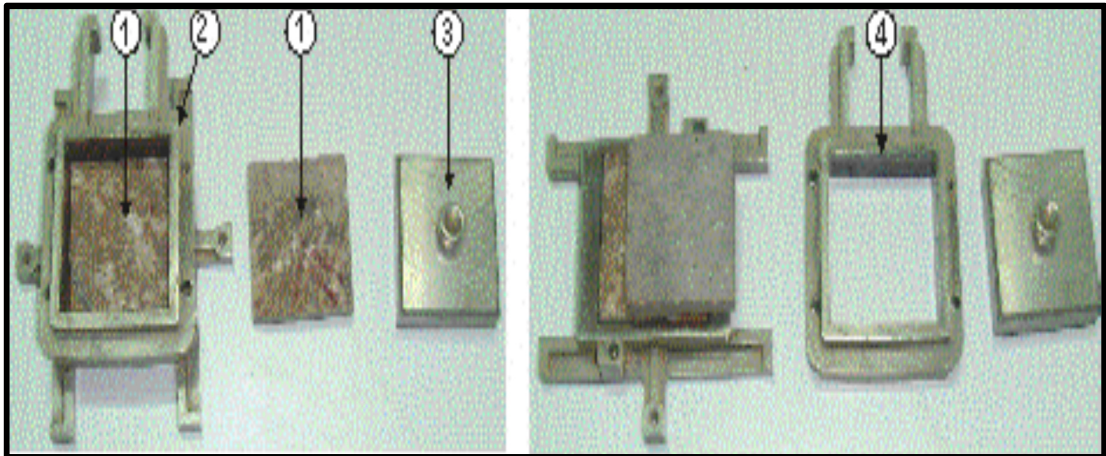


Şekil 3.19. Deney yükleme ünitesi

Taşınabilir kaya makaslama düzeneği ile doğrudan makaslama deneyi;
Taşınabilir makaslama düzeneği kullanılarak kayaların doğal süreksizlik yüzeylerini
ve makaslama dayanım parametreleri belirlenebilir (Şekil 3.20, Şekil 3.21).



Şekil 3.20. Taşınabilir kaya makaslama düzeneği [10]

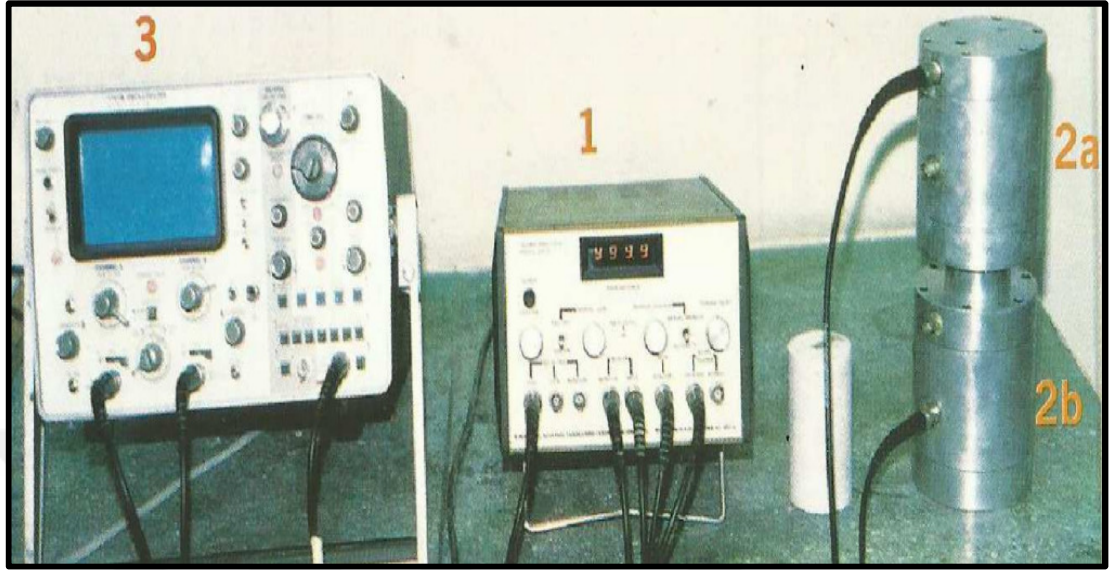


Şekil 3.21. Örnek hazırlama kalıpları [10]

Sonik hız deneyi:

Bu deney, kayaç örnekleri içerisinden geçirilen Sıkışma (P) ve Makaslama (S) Dalgalarının yayılma hızlarından faydalanarak, kaya malzemesinin dinamik Young Modülü ile dinamik Poisson Oranının saptanması amacı ile yapılmaktadır. Bu deney yöntemi, homojen ve izotrop veya çok az derecede anizotropiye sahip kayalarda da uygulanabilmektedir. Bu deneyle elde edilen elastik sabitler, statik laboratuvar

yöntemleriyle veya arazide uygulanan tekniklerden elde edilen değerler ile çoğu kez uyumsuz hatta onlardan yüksektirler [10] (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Sonik hız deneyi gereçleri ve bağlantıları [10]

3.5. Zemin Parametrelerinin Tasarımda Kullanılması

Laboratuvar ve arazi deneyleri sonuçlarından elde edilen taşıma parametreleri ve bu parametreler kullanılarak formüle edilmiş ampirik korelasyonlar kullanılarak zemin ile ilgili mühendislik yapılarının taşıma kapasiteleri karşılaştırılır.

Tablo 3.3.'de farklı zemin özelliklerine göre yapılan deneyler sonucunda elde edilen parametrelerin, hangi taşıma hesaplarında kullanılacağı belirtilmiştir.

Özet olarak; yüksek hızlı demiryollarında, önceki bölümlerde ayrıntılı şekilde anlatılan zemin özelliklerinin ve taşıma kriterlerinin belirlenmesi ile aşağıdaki belirtilen mühendislik yapılarının projelendirilmesi ve imatları gerçekleştirilir.

Doluluklarda: Zemin taşıma gücü, şişme potansiyeli, deprem anında gevşeme davranışları, yeraltı suyu durumu, zamana bağlı oturma değerleri belirlendikten sonra, demiryollarının dinamik ve statik yükleri altındaki davranışları modellenip, uygun zemin iyileştirme yöntemine karar verilir.

Tablo 3.3. Laboratuvar deney sonuçlarından elde edilen veriler

Laboratuvar Deneyi	Zemin Özellikleri	Elde Edilen Parametreler	Sonuç
Kesme kutusu (Drenaj lı. drenaj sız, konsolidasyonlu, konsolidasyonsuz)	Konsolidasyonlu zeminler (taşıma gücü için konsolidasyonsuz, drenaj sız deney)	Kohezyon ve içsel sürtünme açısı	Taşıma gücü
Serbest basınç	Kendi kendini dik olarak ayakta tutabilecek killi zeminler	İçsel sürtünme açısı "0" ve $C_u - q_u / 2$	Taşıma gücü
Kıvam limitleri	Killi ve siltli zeminler	LL, PL, PI ve kıvam indisi	Şişme potansiyeli, yaklaşık taşıma gücü
Kanatlı kesici (Veyn) deneyi	Yumuşak ve plastik killerde Her türlü zeminde (iri blok içeren zemini erde yanıtıcı sonuçlar	Kohezyon	Taşıma gücü
Pressiyometre deneyi	Killi ve siltli zeminler (çakıl ve kum olmamalı)	PI. kohezyon, içsel sürtünme açısı	Taşıma gücü. oturma miktarı
Penetrasyon deneyi	Her türlü zeminde	SPT(N)	Taşıma gücü
Granülometrik analiz	Bozulmamış örnek üzerinde	Zemin sınıfı ve tane dağılımı	Sıvılaşma
Konsolidasyon deneyi	Yumuşak zemini erde	Sıkışma ve konsolidasyon katsayısı	Zamana bağlı oturma
Plaka yükleme deneyi		Çökme-basınç eğrisi	Yükaltında zemin davranışı

Yarmalarda: Zemin özelliklerine göre yarma şev eğimleri ve şev tahkimat modelleri projelendirilir.

Viyadüklerde: Zemin taşıma kapasitesi ve deprem anında sıvılaşma potansiyeline göre viyadük taşıma yapıları.

Zemin taşıma gücü hesaplandıktan sonra viyadük ağırlığı ve tren dinamik yükleri altında viyadük temelini kazıklı veya kazıksız olacağına karar verilir. Kazıklı olma gerektiğinde ayrıca kazık hesapları yapılarak kazık boy, çap ve adedine karar verilir.

Ayrıca viyadüklerin yapıldığı zeminin deprem anında sıvılaşma potansiyeline özel yöntemler ve deprem izolatörleri kullanılır.

Tünellerde: Yüksek hızlı demiryollarında tünel yapımında daha çok dağlık bölgelerden geçildiği için genellikle kaya ortamlarla karşılaşılır ve kaya mekaniği hesapları yapılarak tünel dizaynları gerçekleştirilir.

Dağ tünellerinde nadirde olma zemin özelliği değişen bölgelerde tünel açımında, tünellerin açılmasından özellikle şişme potansiyeli yüksek olan killerin bakışları sonucu büyük deformasyonlar oluşabilmektedir. Bu bölgelerde özel tahkimat tasarımları uygulanır.

Ayrıca yamaç bölgelerinde oluşturuldukları için tünel giriş ağzlarında zemin özellikleri ile karşılaşmaktadır. Burada giriş portal yapısının tasarımı ve şevlendirilme projelendirilir.

Şehir tünellerinde ise daha çok zemin özellikli formasyonlar ile karşılaşmaktadır. Bura tünel içinden ve dışından zemin iyileştirmeleri ve özel tahkimat işlemleri öz konusudur.

Menfez ve alt geçitlerde: Menfez ve alt geçit yapımında zemin taşıma gücü hesabı ve zamana bağlı oturma hesapları önem taşır. Yüksek hızlı demiryolları için alt geçit ve menfezler problem kaynağıdır. Rijit – rijit olmayan yapı geçişleri olduğundan ve etrafındaki dolgu malzemesinden zamana bağlı farklı oturma eğilimleri olduğundan yüksek hızlarda konfor ve güvenliği etkilemektedir.

Bu sebeple tabanlarında özel zemin iyileştirmeler uygulanmalıdır. Ayrıca dolgu geçişleri özel olarak dizayn edilmiş yaklaşımla dolguları ile gerçekleştirilmelidir.

Üst geçitlerde: Demiryolunun üzerinden geçecek köprü ve üst geçitlerin altındaki demiryolunu olumsuz etkilemeyecek şekilde (sarsıntı – çökme v.b.) tasarımları için zemin özellikleri önem taşır.

3.6. Kaya Parametrelerinin Tasarımda Kullanılması

Yüksek hızlı demiryolu yapımında ülkemizin topografik yapısından dolayı ve yüksek hızlı demiryolu yapım kriterlerinin (min kurp yarıçapı ve max eğim) sınırlayıcı olmasından dolayı çok fazla tünel imaltı gerekmektedir.

Yüksek hızlı demiryollarında kaya mekaniği parametreleri en çok tünel imatlarında ve yarma şevlerinin tasarımında kullanılmaktadır.

Bununla birlikte genellikle vadi geçişlerinde yapılan viyadük imalatlarının temel tasarımlarında, ana kaya bölgelerine rastlanmakta ve kazıksız olarak viyadük temelleri projelendirilmektedir.

Tünel dahil tüm demiryolu yapılarının kaya ortam üzerinde veya içerisinde oluşturulması, zemin özellikli formasyonlara göre çok daha ekonomik ve uzun ömürlü olmaktadır.

Daha çok tünel imalatında karşımıza çıkan kaya mekaniği parametreleri aşağıda tünelcilik açısından incelenecektir.

Tünellerin açılmasında uygulanacak tahkimat sistemi, tünelin içerisinde açılacağı ortamın özelliklerine göre değişmektedir. Kendini tutabilen sağlam kaya koşullarında zayıf tahkimat elemanları yeterli olabilirken, kendini tutamayan zayıf kaya ve zemin koşullarında ağır tahkimat elemanlarının kullanılması kaçınılmaz hale gelmektedir.

Uygulanacak tahkimat modelinin belirlenmesi için öncelikle tünelin açılacağı kaya kütle özelliklerinin eksiksiz tanımlanması gerekmektedir.

Uygulanacak tahkimat modelinin belirlenmesi için öncelikle tünelin açılacağı kaya kütle özelliklerinin eksiksiz tanımlanması gerekmektedir. Her bir bölgenin jeolojik – jeoteknik özelliklerinin farklı olduğu, masif olmayan yapılar içerisinde birkaç metrede bir farklı formasyon özellikleriyle karşılaşılmasının mümkün olduğu varsayımları ile tünel imatları sırasında devamlı olarak farklı tahkimat modellerinin uygulanması gerektiği teknik ve ekonomik sebepleri ile karşımıza çıkar. Oluşturulacak tahkimat sisteminin yeteri kadar sağlam, aynı zamanda ekonomik olacak şekilde gereksiz malzemenin boşuna kullanılmaması üzerine geliştirilmesi gerekmektedir.

Bu dengenin sağlanabilmesi içinse yıllar süren çalışmalar sonucunda bilim insanlarının geliştirmiş olduğu kaya kütle sınıflama sistemleri ve bu sınıflamalarda uygulanması gereken tahkimat modelleri belirlenmiştir.

Kaya kütle sınıflamalarının yapılabilmesi için arazi ve laboratuvar çalışmaları sonuçları ile, kendisini devasa bir sondaj olarak kabul edebileceğimiz tünelin aynasından alınan verilerin birlikte değerlendirilerek jeolojik - jeoteknik özelliklerini ortaya konulması gerekmektedir.

Belirlenen sınıflama karşılığı, literatürel olarak geliştirilmiş tahkimat modelleri bulunmaktadır. Bununla birlikte, bölgenin depremsellik özellikleri, tünel çapı, yapılış amacındaki özellikler, kullanım süresi vs. gibi durumlar göz önüne alınarak kullanılacak tahkimat modeline karar verilir.

Tünel ayna verilerinin elde edilmesi için, tünel aynasında bir takım gözlem ve ölçümlerin yapılması gerekir. En önemlisi bunu yapacak kişinin deneyimli ve uzman olması gerekmektedir. Verilerin elde edilmesinde gözlem ve doğru tespit için yıllar süren çalışma ve tecrübe gerekir. Bu aşamada yapılabilecek yanlış değerlendirmeler, ileride tünelin kaybedilmesine kadar gidecek olumsuzlukların sebebi olabilir. Bu sebeplerle birkaç kişiden oluşan jeoteknik ekiplerin oluşturulmaları gerekir.

Aşağıda uzun yıllar süren çalışmalar sonucunda bilim insanları tarafından geliştirilmiş kaya kütle sınıflamalarından detaya girmeden kısaca bahsedilmiştir.

3.6.1. Q sınıflandırma sistemi

Q veya NGI (Norveç Jeoteknik Enstitüsü) sistemi olarak adlandırılan sistem 1972-1973 yılları arasında Barton ve arkadaşları tarafından geliştirilmiştir. Kaya tünelticilik kalitesi olarak da adlandırılır. Kayanın 6 farklı parametresi aracılığı ile Denklem (3.1) gibi hesaplanmaktadır;

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_n} \times \frac{J_w}{SRF} \quad (3.1)$$

Bu denklemde:

RQD: Kaya kalite indisi

J_n: Eklem takımı sayısı

J_r: Eklem pürüzlülük sayısı

J_a: Eklem alterasyon sayısı

J_w: Eklem suyu indirgeme sayısı

SRF: Gerilme indirgeme faktörüdür. Q sınıflandırma sisteminde kullanılan parametrelerin değişik koşullara göre alacakları değerler literatürde çizelgeler şeklinde mevcut olup burada verilmemiştir.

3.6.2. Kaya kütle değeri (Rock Mass Rating, RMR)

Kaya kütle değeri (RMR), ilk kez 1972-1973 yılları arasında Bieniawski [12] tarafından geliştirilen bu sistem, 1989 yılına kadar geçen süre içerisinde yapılan gözlemler ve yeni veriler esas alınarak, birkaç kez değişikliğe uğramıştır [13-16].

Sistemli olarak, Bieniawski'nin sedimanter kayalarda açılan tünellerde yaptığı gözlemler ve bu gözlemlerden kazandığı deneyimler esas alınarak geliştirilmiştir. 1973'ten 1989'a kadar tüneller, büyük yer altı açıklıkları, maden işletmeleri, şevler ve temellerle ilgili toplam 351 farklı uygulamadan derlenen veriler ve kazanılan deneyimler sistemin son şeklini almasında önemli rol oynamıştır.

1989 yılında yapılan değişiklikle günümüze kadar gelen RMR sürümünde 5 parametre kullanılarak sınıflama yapılır. Bu parametreler; kaya malzemesinin tek eksenli dayanımı, kaya kalite belirteci (RQD), süreksizlik aralığı, süreksizliklerin durumu ve yer altı suyu durumu olarak sıralanmaktadır.

RMR sınıflama sisteminden üç önemli veri elde edilmektedir [17];

- 1- Tüm jeolojik unsurların ortak etkisini yansıtan ve kaya kütlelerinin genel koşullarıyla ilişkisi "kaya kütle kalitesi",
- 2- Kaya kütle kalitesi ve kazı yöntemine göre, ön tasarım amacıyla destek türleri seçilebilmesi
- 3- RMR puanının kullanılarak, kaya kütlelerinin bazı mühendislik özellikleri tahmin edilebilmesi

3.6.3. Kaya kütlelerinin dayanım özellikleri ve jeolojik dayanım indeksi (GSI)

Doğal malzemelerin dayanım ve deformasyon özellikleri, laboratuvar ortamında incelenecek boyutlardaki örnekler ile tayin edilmektedir. Ancak bu ortamlardaki kaya kütlelerinden, süreksizlik sistemlerini içeren ve metre boyutuna ulaşan numunelerin alınması ve bu numunelerin laboratuvar ortamında test edilmesini sağlayacak deney

hücreleri ve ekipmanları geliştirilmemiştir. Son yıllarda kaya mekaniği alanındaki gelişmelerde kabul görmüş olan Hoek – Brown görgül yenilme ölçütü, kaya kütlelerinin dayanımının belirlenmesinde ampirik yöntemlerden biri olarak kullanılmaktadır. Söz konusu yöntemin hesaplaması RMR kullanılarak yapılmasına karşın, RMR değerinin 25'in altına düştüğü durumlarda sonuca gidilememektedir. Bu sorunun giderilmesi amacıyla, Hoek [18] tarafından Jeolojik Dayanım İndeksi (Geological Strength Index, GSI) önerilmiş ve GSI sınıflama abağı yardımıyla kaya kütle dayanımı belirlenmeye çalışılmıştır. GSI, farklı jeolojik koşullar altında kaya kütle dayanımında meydana gelmesi olası azalmaları tahmin etmeyi sağlayan bir sistem özelliğindedir.

3.7. Sıvılaşma

Zemin sıvılaşması, yeraltı su seviyesi altındaki zemin tabakaların deprem etkisi ile geçici olarak mukavemetlerini kaybederek, katı yerine viskoz sıvı gibi davranmaları olayıdır.

3.7.1. Sıvılaşmanın oluşumu

Deprem etkileri nedeniyle suya doymun kumlu zeminler aniden çamurlu su gibi bir sıvıya dönüşebilir. Depremin meydana getirdiği güçlü titreşimler sonucunda suya tam doymun veya doymuna yakın olan granüler malzemenin sıvı faza geçiş yapması sıvılaşma olarak tanımlanabilir [19].

Suya doymun gevşek kum/kumlu zeminler tekrarlı yükler etkisinde, sıkışma ve hacim daralması eğilimi gösterirler. Bu eğilim, drenajın olmadığı koşullarda, boşluk suyu basıncını artırır ki tüm sıvılaşma olaylarının en karakteristik özelliği drenajsız yükleme şartlarında oluşan aşırı boşluk suyu basıncıdır. Tekrarlı yükler kum tabakası içindeki boşluk suyu basıncının artmasını desteklediği zaman, toplam gerilme, boşluk suyu basıncına eşit değere ulaşabilir [19].

Artan boşluk suyu basıncının konsolidasyon basıncına eşit olması ile zemin daneleri arasındaki efektif basınç sıfır olur ve kohezyonsuz zemin kayma direnimi kaybederek bir sıvı gibi davranır ve büyük deformasyonlara uğrar [20].

Sıvılaşma olayını anlatabilmek için zeminin deprem öncesi koşullarının bilinmesi gerekir. Bir zeminde çok sayıda dane bulunmaktadır ve bunlara yakından bakıldığında, her bir danenin çevresindeki diğer danelerle temas halinde olduğu görülür. Her danenin kendi üzerindeki diğer danelerin ağırlığından dolayı daneler arasında temas kuvvetleri oluşur ve bu kuvvetler daneleri bir arada tuttuğu gibi, zeminin bir dayanıma sahip olmasını da sağlar. Daneler arasındaki boşluklar ise, su ve hava ile doludur. Suyun tanelere yaptığı basınç "boşluk (gözenek) suyu basıncı" olarak adlandırılır [19].

Deprem sırasında sismik dalgalar, özellikle makaslama dalgaları, suya doygun (yeraltısuyu tablası altındaki) gevşek kumlu zeminler içinde yayılırken birbirine göre ters yönde etkiyen kuvvet çiftleri yaratarak (makaslama kuvvetleri) zeminlerin danelerinde yer değiştirmelere neden olurlar. Bu koşullar altında gevşek konumdaki kum danecikleri birbirine yaklaşma eğilimi gösterirler ve bu davranış sırasında tanelerin temas noktalarındaki gerilim, taneleri çevreleyen suya aktanır [19].

Depremlerin ani ve çok kısa süreli hareketlere neden olması, daneler arasındaki suyun kaçması (drene olması) için gereken yeterli süreye olanak tanımamakta, dolayısıyla ortamdaki uzaklaşmayan boşluk suyunun basıncını aniden arttırmaktadır. Boşluk suyu basıncındaki bu ani artış, zemin danelerini bir arada tutan temas kuvvetlerini yok ederek daneleri birbirinden uzaklaştırır ve böylece zemin dayanımını yitirir. Bu koşullar altında zemin, deprem öncesinde gösterdiği katı malzeme davranışı yerine, bir sıvı gibi davranarak suyla birlikte yüzeye doğru hareket eder ve yüzeyden çıkmaya başlar. Zeminin sergilediği bu davranış biçimi "sıvılaşma" olarak tanımlanır [19].

Sıvılaşmadan sonra kum daneleri arasındaki temas noktaları boşluk suyu basıncı çıkışı olduktan sonra adeta yeniden düzenlenir. Sonuçta zemin yeniden stabilitesini kazanır ancak, bu esnada oturma meydana gelmiştir. Oturma yapan zemindeki hacim azalması dışarıya akan boşluk suyu basıncının hacmi kadardır [19].

3.7.2. Sıvılaşabilir zemin türleri

Sıvılaşma analizinin ilk adımı söz konusu zemin profilinde potansiyel olarak sıvılaşacak zemin tabakalarının bulunup bulunmadığının kontrol edilmesidir. Bu da hangi zeminlerin sıvılaşabilir olduğu gibi önemli bir soruyu gündeme getirmektedir. Sıvılaşma her yerde ve her koşulda meydana gelen bir olay olmayıp, belirli yeraltı

koşulları altında gerçekleşir. Genellikle genç ve gevşek çökellerin, özellikle kum ve silt dane boyutundaki malzemenin depolandığı ve yeraltı suyunun sığ olduğu ortamlardır. Sıvılaşmaya en duyarlı çökeller, Holosen yaşlı delta, akarsu, taşkın ovası, taraça ve kıyı ortamındaki çökeltme süreçleri sonucunda birikmiş çökellerdir. Çünkü bu ortamlarda egemen olan çökeltme süreçleri, danelerin üniform şekilde ve gevşek halde depolanmasına olanak sağlamaktadır. Sıvılaşma gerekli koşullarda gerçekleştiği takdirde, yeraltı suyu tablasının yüzeyden itibaren en fazla 10 m derinlikte bulunduğu ortamlarda meydana gelmektedir [21].

Temiz kumlardan sıvılaşabildiği uzunca bir zamandan beri bilinmektedir. Gevşek kumlarda, zemin yüzeyi düz olsa bile büyük bir şev kaymasına ya da çamur akmasına benzeyen kalıcı bir zemin deformasyonu (akma göçmesi) meydana gelebilmektedir. Bu durumda yapı temellerinin stabilitesini sağlayacak olan temel zemininin rezidüel kayma dayanımına güvenilmez, hatta zemin yüzeyi kalıcı olarak yer değiştirebildiğinden yeni bir dış kuvvet oluşur ve bu kuvvet kazıklı temellere ve gömülü yapılara dahi zarar verebilir. Gevşek kumun tersine sıkı kum kaymaya uğrayıp, aşırı boşluk suyu basıncı oranı 1.0 olduğunda bile geçici olarak daneler arasındaki temas kuvvetleri korunur. Böylece statik gerilmeler desteklenir ve sıkı kum tamamen sıvı duruma ulaşmaz [19].

İri daneli ve çakıllı zeminlerin tekrarlı yükler altındaki davranışı kumlarınkinden fazla bir farklılık göstermez ve bu zeminler potansiyel olarak sıvılaşabilirler. Ancak bu zeminler kumlu zeminlerle karşılaştırıldığında daha geçirimli olduklarından sismik yükler altında oluşan aşırı boşluk suyu basıncını daha çabuk dağıtabilmekte ve ayrıca iri ve ağır danelerden oluştuklarından dolayı nadiren gevşek halde bulunurlar. İri taneli ve çakıllı zeminlerin sıvılaşabileceği durumlar olarak, çakıllı danelerin arasını ince taneli plastik olmayan malzemenin doldurduğu ya da zemin tabakasının oldukça kalın yani drenaj mesafesinin uzun olduğu durumlar gösterilebilir. Bu gibi durumlarda iri taneli zeminlerin sıvılaşabileceği olasılığı düşünülerek gerekli sıvılaşma hesapları yapılmalıdır [22].

İnce daneli zeminlerin sıvılaşabilirliği ise halen tartışılmaya devam edilmektedir. İnce daneli (killi ve siltli) zemin yüzdesinin genel zemin davranışını kontrol edebilecek miktarda yüksek olduğu durumlarda, sıvılaşmanın gerçekleşebilmesi için siltli ya da

killi malzemenin plastik olmaması ya da düşük plastisiteli koşulu sağlanmalıdır. Aslında düşük plastisiteli killer hem sıvılaştırılabilir olmaları hem de boşluk suyu basıncının hızlı dağılımını engelleyebilecek kadar geçirimsiz olmaları nedeniyle en tehlikeli zemin türleridir [19].

Tüm bu kriterlere ek olarak sıvılaştırmanın olabilmesi için malzemenin doymuş ya da doymuşa yakın, tekrarlı yükün ise drenaja izin vermeyecek kadar hızlı olması gerektiği unutulmamalıdır. Su tablasındaki mevsimsel değişimler ve sulamada zeminlerin sıvılaştırılabilir olmalarını etkileyebilir.

3.7.3. Ön Sıvılaştırma, sıvılaştırma ve çevrimsel (devri) oynaklık (sınırlı ön sıvılaştırma)

Yer titreşimleri nedeniyle meydana gelen tekrarlı kayma gerilmeleri sonucu boşluk suyu basıncının arttığı bilinmektedir. Suyu doymuş kumlu zeminlerde daneler arasındaki boşluk suyu hacimsel sıkışmaya engel olmaktadır. Suyun sıkışabilirliği az olduğu için boşluk suyu basıncı hızla artmaktadır. Kumlarda hidro iletkenlik yüksek olmasına rağmen deprem süresinin kısa ve de drenaj yolunun uzun olduğu düşünülürse boşluk suyu basıncının sönüm miktarı ihmal edilebilir düzeyi aşmaz. Bu durumda boşluk suyu basıncı artmaya başlar ve çevre basıncına yaklaşır. Bu durum kumun sıkılığına göre iki farklı durumun ortaya çıkmasına neden olur;

a. Kum gevşek ise;

Boşluk suyu basıncı çevre basıncına eşitlenir. Kumda büyük şekil değiştirmeler meydana gelir ve % 20'yi aşan birim kayma oranları gözlemlenir. Zemin dayanım oluşturmadan büyük şekil değiştirmelerin gözlenmesi sıvılaştırma olduğunu gösterir.

b. Kum sıkı ise;

Tekrarlı yüklemelerin herhangi bir anında boşluk suyu basıncı çevre basıncına eşitlenebilir ki bu durum ön sıvılaştırma olarak tanımlanır. Ancak kum bundan sonra bir genişleme gösterir, bu durumda boşluk suyu basıncı düşmeye başlar ve zemin direnç kazanır. Bu direncin oluşabilmesi için zeminin bir miktar şekil değiştirmesi gerekir. Her tekrarlı yükleme durumu için belirli tekrarlı bir şekil değiştirme oranı oluşur ve bundan sonra zemin tekrarlı yükler altında fazla değişiklik göstermez. Bu olay çevrimsel (devri) oynaklık ya da sınırlı ön sıvılaştırma olarak adlandırılır. Bu ifadeleri şu şekilde tanımlamak mümkündür [23].

Ön sıvılaşma:

Tekrarlı yükler altında boşluk suyu basıncının bir yükleme çevrimi sonunda toplam çevre gerilmesine eşit olmasıdır. Ancak ön sıvılaşmanın oluşması, zemin elemanında meydana gelecek şekil değiştirmelerin boyutları ile ilgili bilgi vermez. Sadece zeminin davranışını incelemeye olanak sağlar [19].

Sıvılaşma:

Boşluk suyu basıncının tekrarlı yükler etkisinde sürekli olarak artıp bir noktadan sonra sabitleşmesi, efektif çevre gerilmenin sıfır ya da sıfıra yakın bir değere ulaşmasına neden olur. Bunun sonucunda zemin elemanında sürekli artan şekil değiştirmeler olur ve zemin bir sıvı gibi davranmaya başlar. Bu olaya gerçek sıvılaşma denir[19].

Çevrimsel (devri) oynaklık (sınırlı ön sıvılaşma):

Tekrarlı yükler altında bir yükleme çevrimi sonucunda, ön sıvılaşmanın oluşması ve bunu izleyen yükleme çevrimlerinde zemin elemanında bir artık dayanım bulunmasından veya hacim kabarmasından ötürü tekrar bir kayma direnci oluşur. Bunun sonucunda zemin elemanında şekil değiştirmeler sınırlı kalır ve tekrarlı yükler altında duraylı bir konuma gelir. Bu olaya çevrimsel (devri) oynaklık ya da sınırlı ön sıvılaşma denir[19].

3.7.4. Sıvılaşmaya etki eden faktörler

Sıvılaşma sadece birkaç parametreye bakılarak % 100 doğru biçimde ön görülecek kadar basit bir kavram olmaktan çok uzaktır. Değişik depremlerde meydana gelen sıvılaşma olayları incelendiğinde her birinin yeni olgular doğurabildiği rahatlıkla söylenebilir[19].

1. Kayma dalgası hızı (V_s): S dalgası hızı arttıkça risk azalır. S dalgası suda ilerlemediğinden yeraltındaki tabakalarının su içeriği hakkında bilgi verir. S dalgası hızının yüksek olması su içeriğinin olmadığını gösterir [24].
2. İvme: İvme depremin en can alıcı noktasıdır, çünkü ivme büyüdükçe hasarlar ve kayıplar anormal bir şekilde artmaktadır. İvme, artmasıyla danelerin yer değiştirmesini ve yeraltı suyunun transfer hızını arttırarak sıvılaşmaya çok büyük bir etken olarak katılmaktadır [25].

3. Deprem magnitudü: Deprem magnitudü depremde çıkan enerji ile belirtildiğinden büyük bir depremden çıkan enerjide büyük olacak dolayısıyla sarsıntı şiddetide büyük olacağından sıvılaşma potansiyeli artacaktır [19].
4. Zeminin tane boyutu dağılımı ve dane şekli: Zeminin dane boyutu dağılımının sıvılaşmaya etkisi hakkında söylenebilecek ilk madde iyi derecelenmiş zeminlerde hacimsel deformasyona olan eğilimin az olduğu ve bu nedenle drenajsız koşullarda gelişebilecek olan aşırı boşluk suyu basıncı miktarının azaldığıdır. Böylece dane boyutu iyi derecelenmiş zeminlerde sıvılaşma ihtimalinin az olduğu sonucuna varılabilir [19]. İkinci olarak ise aynı koşullar altında; ince ve üniform kumların iri kumlara oranla sıvılaşmaya daha yatkın olduğu söylenebilir. Bunun sebebi olarak iri kumların geçirgenliğinin ince kumlara göre daha fazla olması ve iri kumlarda deprem sırasında oluşacak boşluk suyu basıncının daha kolay sönmüldüğü söylenebilir. Böylece kumlarda ince danelerden ziyade iri dane özelliği baskın olmaya başladıkça sıvılaşmaya yatkınlığın azaldığı sonucuna varılabilir [19]. En kolay sıvılaşabilen zeminlerin ortalama dane çapı 0,2 mm. civarında olduğu söylenebilir [21]. Zeminlerin dane şekli konusunda da yaygın görüş ise daneleri köşeli olan zeminlerin belirli bir konsolidasyon basıncına kadar sıvılaşmaya daha dirençli olacağı yönündedir. Daha büyük basınçlarda ise zeminlerin köşelerinin kırılıp ince dane oluşturmaları nedeniyle sıvılaşmayı kolaylaştırıcı etki yaptığı belirtilmektedir.
5. Relatif sıklık (tabakanın sıklığı): Ayrık daneli zeminlerde sıvılaşma potansiyeline etki eden faktörler içerisinde relatif sıklık oranı (D_r) en önemlilerinden biri olarak ele alınmaktadır. Sıklık ön sıvılaşmaya ulaşmak için gerekli devir sayısının veya uygulanan kayma gerilmesinin artması gerekmektedir [26].

Kumlu zeminlerde yapılan testler sonucunda, başlangıçtaki relatif sıklığı %65'ten büyük olan kumlu zeminlerde boşluk suyu basıncında artış olmadığı gözlemlenmiştir. Bu nedenle sıvılaşma ihtimali düşüktür [27].

6. Zeminin gerilme altında kaldığı süre: Sıvılaşmaya etki eden faktörlerden biri de zemin tabakalarının jeolojik yük altında kaldıkları süredir. Uzun süre yük altında kalmanın bir sonucu olarak, daneler arasında bir kaynamanın ve çimentolaşmanın oluşması sonucunda sıvılaşmaya karşı direnç %75 oranında artabilmektedir[26].

7. Titreşim özellikleri: Sıvılaşma ve sıvılaşmaya bağlı olarak oluşan oturma, dinamik yüklerin türüne, büyüklüğüne ve yapısına bağlı olarak değişir. Şok yüklemelerde tüm bir tabaka sıvılaşabileceği gibi, düzenli titreşimlerde üst tabakadan başlayarak devam eden bir sıvılaşma olayı gözlemlenebilir. Kuru kumlarda, genellikle yatay titreşim, düşey titreşimden daha büyük yer değiştirmeler meydana getirmektedir [28]. Sıvılaşmaya maruz kalan zeminler üzerinde bulunan zararın büyüklüğü, kumun sıvılaşma durumunda kalma süresine bağlıdır. Kaba kumlarda yüksek permeabilite katsayısı mevcut olduğundan ince kumlara göre sıvılaşma süresi daha kısa olacaktır. Depremlerin sebep olduğu çok yönlü sarsıntı tek yönlü yüklemelere göre çok daha şiddetli olmaktadır [28].
8. Deformasyon geçmişi (sismik geçmiş): Bir kum elemanın sıvılaşabilirliğinin, o kum elemanın daha önce tekrarlı yükler altında kalmış olmasından etkilendiği birçok araştırmacı tarafından gözlenmiştir. Geçmişteki tekrarlı yük etkisinin, diğer bir deyişle sismik geçmişin, ne yönde etki yaptığını anlayabilmek için de, aynı şekilde ve aynı sıklıkta hazırlanmış numunelerden bir kısmına çok hafif titreşimler uygulanmış, daha sonrada tüm numuneler üzerinde yapılan sıvılaşma deneylerinde titreşim altında kalmış numunelerinin ön sıvılaşma için gerekli gerilme oranlarının, hiç titreşim altında kalmamış numunelere göre, %50'den daha büyük olduğu gözlenmiştir [19]. Kumlarda küçük titreşimler, danelerin ve dane yüzeylerindeki pürüzlülüklerin birbirlerine daha iyi intibakına ve bundan dolayı da, kayma dayanımını belirleyen iki özellikten biri olan dane kilitlemesi sağlayarak sıvılaşma direncini arttırmaktadır. Seed'e (1976) göre geçmişte oluşan deformasyonlar kum zeminlerin sıklığını belirgin bir şekilde değiştirmemekte ancak sıvılaşmaya sebep olacak gerilmeyi yaklaşık 1,5 kat arttırmaktadır [19].
9. Yanal toprak basıncı katsayısı ve aşın konsolidasyon oranı: Bu konu ile ilgili yapılan araştırmalarda, sükûnetteki yanal basınç katsayısı, K_0 'ın, ön sıvılaşmaya yol açacak gerilme oranlarında, büyük artışlar sergilediği saptanmıştır. $K_0 > 5$ olması durumunda gerilme durumunun en az %50 artması sıvılaşmaya sebep olacaktır. Ayrıca, Ishihara (1985), belli bir tip kum üzerinde burulmak kesme deneyleri yaparak, aşın konsolidasyon oranının artmasıyla sıvılaşmaya karşı direncin de arttığı sonucuna varmıştır. Yanal toprak basıncı katsayısı K_0 'ın, aşın

konsolidasyon oranı ile doğrudan ilişkili olduğu düşünülecek olursa bu etkenin doğada gerçek kum tabakalarının sıvılaşmasına etki eden en önemli faktörlerden biri olduğu ortaya çıkar [19].

10. İnce dane oranının etkisi; Sıvılaşma potansiyeli üzerinde ince dane oranını belirlenmesi amacı ile birçok araştırmacı tarafından laboratuvar ve arazide kapsamlı araştırmalar yapılmıştır. Dinamik üç eksenli basınç deneyi aletinde düşük plastisiteli ince daneler üzerinde yapılan deneyler sonucunda plastik olmayan ince dane oranı arttıkça dinamik dayanımda azalma olduğu gözlenmiştir [19]. Erken ve Ansal (1994) tarafından, dinamik üç eksenli deney sisteminde, örselenmemiş düşük plastisiteli siltli kum numunelerinin davranış biçimleri incelenmiştir. Kumlu zeminin içerdiği şilt oranının dinamik dayanımı olumsuz etkilediği, şilt oranı arttıkça dinamik dayanımın azaldığı anlaşılmıştır. Yine Erken ve Ansal (1994) tarafından yapılan dinamik basit kesme deneylerinde, değişik oranlarda plastik ince daneli zemin kullanılmış, plastik ince dane oranının artmasıyla sıvılaşma potansiyelinin azaldığı ortaya koyulmuştur [19]. Prakash (1981) ise çalışmalarında aşağıdaki sonuçları elde etmiştir;
 - Düşük plastisiteli şiltlerin sıvılaşma direnci, artan plastisite ile azalır.
 - Kil boyutlu dane oranının artması, tekrarlı gerilme oranını düşürmektedir.
 - Düşük plastisiteli şiltlerin eksenel deformasyonu, kil yüzdesinin artması ile artar. %5 kil için, ilk sıvılaşma durumuna, %5 göçme durumundan sonra erişilir.
11. Zeminin oluşma şekli: Jeolojik açıdan nehir ve göllerde sedimantasyonla oluşan fluval ve alüviyal zeminler, kolüvyal zeminler ve rüzgâr hareketiyle oluşan aeolian zeminler sıvılaşmaya duyarlıdır. Bu olaylar zeminlerin üniform daneli olmasına ve gevşek biçimde depolanmasına sebep olmaktadır. İnsan yapımı hidrolik dolgularda sıvılaşmaya oldukça eğilimlidirler. Sakarya nehrinin taşıdığı genç alüvyon zemin tabakaları üzerinde bulunana Adapazarı şehrinde meydana gelen depremler sonucu gözlenen sıvılaşma vakaları bu duruma bir örnek teşkil etmektedir [19].
12. Boşluk oranı: Kayma gerilmeleri altında, sıkı kumların hacimleri artarak boşluk oranları artmakta, gevşek kumların ise hacimleri azalarak boşluk oranları azalmaktadır. Böylece sıkı ve gevşek kumların her ikisi de sonuçta hacimlerinin değişmediği bir duruma ulaşmaktadır. Bu durumdaki boşluk oranı kritik boşluk

oranı (e_{cr}) olarak ifade edilmektedir. Drenaj sız periyodik basit kesme deneylerinde, $e_0 < e_{cr}$ durumunda negatif, $e_0 > e_{cr}$ durumunda da pozitif boşluk suyu basıncı oluşmaktadır. Zeminin boşluk oranı, kritik boşluk oranından küçük iken zemin için sıvılaşma potansiyeli düşük olarak kabul edilirken, kayma anında drenajın mümkün olmadığı ve zeminin boşluk oranının kritik boşluk oranından büyük olduğu gevşek kumlar için sıvılaşma potansiyeli yüksektir [19].

3.7.5. Sıvılaşma olasılığının belirlenmesi

Sismik sebepli zemin sıvılaşma hesaplarının ilk aşaması sıvılaşmanın olabirliğinin sayısal yöntemlerle belirlenmesidir. Bu amaca yönelik iki yöntem vardır:

- 1) Örselenmemiş numunelerin laboratuvar ortamında test edilmesi,
- 2) Arazi davranışları ile "index" test parametlerine dayalı ampirik bağıntıların kullanılması.

Laboratuvar testlerinin kullanılması numune alımı ve numunenin arazideki gerilmelere konsolidasyonu sırasındaki örselenmeler sebebiyle oldukça zordur. Tekrarlı basit kayma testi her ne kadar arazide oluşan sismik yükleri en iyi modelleyebilen test olsa da her projede uygulanabilirliği testin zor ve pahalı olması bakımından kısıtlıdır. Üç eksenli dinamik testlerin uygulanabilirliği hem sismik arazi yüklerini iyi modelleyememesi, hem de zor ve pahalı olmaları bakımından kısıtlıdır. Örselenme sorunları, dondurularak örnekleme yöntemleri ile alınan numuneler üzerinde tekrarlı basit kayma ya da bükmeli kayma testlerinin uygulanması ile aşılabilir. Ancak deneylerin zorluğu ve ekonomik olmamaları gibi sebepler, bu narin laboratuvar yöntemlerinin tipik mühendislik uygulamalarında kullanımlarını kısıtlar [22].

Bilindiği üzere arazi testlerinin kullanımı mühendislik uygulamalarında oldukça yaygındır. Mevcut uygulamaları özetleyen yayında (NCEER, 1997) dört değişik arazi deney yöntemi ile sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesinde yeterli doygunluğa ulaşıldığı vurgulanmıştır [22].

Bu testler:

- 1-) Standart penetrasyon deneyi (SPT)
- 2-) Koni penetrasyon deneyi (CPT),

- 3-) Arazi kayma dalga hızının (V_s) ölçülmesi,
- 4-) Becker penetrasyon deneyi.

3.7.6. Sıvılaşma ile meydana gelen zemin duraysızlıkları

Zeminin taşıma gücünü yitirmesi:

Sıvılaşma ile dayanımını yitirmeye başlayan zemin, yapının aktardığı yükleri taşıyamaz hale gelir ve sonuç olarak zemin üzerindeki yapılar değişik yönlerde yatar veya devrilir. Zeminin taşıma gücünü yitirmesiyle binalar gibi ağır yapıların hasar görmesi yanında, zemine gömülü tanklar, borular v.b. hafif yapılarda sıvılaşma etkisi ile yükselme ve buna bağlı kırılma ve bükülmeler görülebilmektedir [29].

Zeminin Oturması:

Sıvılaşma esnasında tanelerin gösterdikleri bir araya gelme ve uzaklaşma eğilimi ve taşıma gücünün yitirilmesi ile zemin yüzeyinde oturmalar görülür [29].

Yanal Yayılma:

Sıvılaşan zemin seviyesinin üzerinde bulunan zemin katmanlarının geniş bloklara ayrılması ve ayrılan blokların yanal yönde hareket etmesi olarak tanımlanabilen yanal yayılma eğimi 0,3-5 (%) olan yüzeyler boyunca ve nehir yatağı, göl veya deniz kıyısı gibi harekete engel olmayacak serbest yüzeylere doğru gelişir. Hareket sonucunda zeminde fisürler, kırıklar, küçük çöküntüler ve yükselmeler meydana gelir [29].

Akma Sıvılaşması:

Akma sıvılaşması eğimi % 5'den büyük yüzeyler boyunca gerçekleşir. Hareket esnasında çok geniş zemin kütleleri çok kısa sürede hızlı olarak, onlarca kilometre hareket edebilirler. Akma tamamen sıvılaşmış bir zeminde meydana gelebileceği gibi, sıvılaşan zemin üzerinde yer alan daha sert bir malzemeye ait blokların hareket etmesiyle de meydana gelebilir [29].

3.7.7. Sıvılaşma bölgelerinde uygulanacak tedbirler

Zemin sıvılaşması potansiyeli olan bir bölgede yapılacak yapıda alınabilecek tedbirlerin başında muhtemel küçük zemin hareketinden doğabilecek etkilerin karşılanması gelir.

Temel türünün ve derinliğinin seçiminde, yer hareketinin yapıyı olumsuz olarak olarak zorlamasının azaltılması esas alınmalıdır. Plak temel seçerek rijit temel oluşturulması ve kazık ve kuyu temel sistemi ile sıvılaşma potansiyeli bulunan tabakanın altına inilmesi tavsiye edilebilir.

Sıvılaşma potansiyeline sahip tabakanın kaldırılması ve değiştirilmesi, zemin iyileştirme yöntemleri ile sıkıştırılarak sıkı durumuna getirilmesi ve yeraltı su seviyesinin düşürülmesi alınacak diğer tedbirler olarak sıralanabilir.

Zeminlerin sıvılaşmaya karşı direncini artırmak amacıyla uygulanan zemin iyileştirme tekniklerinin amacı zemini bağlayarak, zeminin sıkılaşmasını ve deprem sırasında aşırı gözenek suyu basınçlarının gelişmesini önlemektir.

Bu amaçlar için ileride ayrıntılı olarak anlatılacak zemin iyileştirme yöntemlerinden sıvılaşma bölgesinin jeo-mekanik karakteristiğine uygun olan belirlenerek ıslah çalışması yapılır.

Genel olarak sıvılaşma riski olan bölgelerde taş kolon, Jet grout, dinamik kompaksiyon, vibroflotasyon, sıkıştırma enjeksiyonu, sıvılaşabilecek zeminin sıvılaşmayacak bir zeminle yer değiştirmesi gibi çeşitli zemin iyileştirme yöntemleri kullanılır.

Ayrıca sıvılaşmadan kaynaklanabilecek zararlar, zeminin drenaj kapasitesinin artırılması suretiyle de azaltılabilmektedir. Eğer zeminin gözeneklerindeki su ortamdan uzaklaştırılabilirse, deprem sırasında gelişebilecek aşırı gözenek suyu basınçları da önemli ölçüde azaltılmış olacaktır. Çakıl ve kum drenleri veya zemine yerleştirilen sentetik maddeler (jeomembranlar) başlıca drenaj teknikleri olarak kullanılmaktadır.

3.8. Zemin İyileştirme Yöntemleri

Yüksek hızlı demiryolu yapımında, demiryolunun oturacağı hat yatağı ve tabandaki zeminin dinamik ve statik yükler altında oturmasının ve yayılmasının çok küçük tamir bakım toleransları içerisinde tutulması gerekmektedir.

250-300 km/saatlik hızlarda, dolgu içerisinde ve tabandaki zeminden kaynaklanacak çok küçük oturmalar dahi emniyet ve konfor açısından sorun teşkil etmektedir.

Projelendirme ve yapım aşamasında öngörülemeyen durumlarda oluşan oturmalar, işletmecilik aşamasında sürekli bakım giderleri ve hız azaltma problemleri olarak karşımıza çıkmaktadır.

Bu sebeple projelendirme aşamasında gerekli özen gösterilmeli, arazide yeterli sondaj ve deneyler ile zemin karakteristiği ortaya konularak, zayıf zeminlerin taşıma gücünün artırılması için uygun zemin iyileştirme yönteminin belirlenmesi gerekmektedir.

Uygun Yöntemin Belirlenmesi:

Arazide yapılan sondaj ve deneylere ilaveten, zemin taşıma gücü ve sıvılaşma analizlerinin yapılabilmesi için cpt ve jeofizik gibi yöntemler kullanılarak gerekli tasarım bilgileri elde edilir.

Demiryolu hat boy kesiti boyunca, arazi deneyleri sonucuna göre oluşturulan jeolojik boy profiller üzerine sondaj, spt, cpt ve diğer veriler işlenerek tüm hat boyu karakteristiği ortaya konur.

Farklı birim ve özellikler gösteren hat bölümleri belirlenerek, her bölüm için uygulanacak zemin ıslah yöntemi ve uygulama dizaynları için gerekli modellemeler ve hesaplamalar yapılarak uygun yöntem karar verilir.

Ayrıca uygulama aşamasında da, yerinde uygulama parametrelerinin belirlenme çalışmaları devam eder. Aşağıda yüksek hızlı demiryolu yapımında faydalanılan zemin iyileştirme yöntemleri ve uygulama esasları belirtilmiştir.

3.8.1. Jet-Grout yöntemi

Jet-Grout yöntemi, zeminin mukavemetini, taşıma gücünü artırmak ve permabilitesini düşürmek amacıyla, zemine yüksek basınçta çimento şerbeti enjekte edilerek, zemin ve stabilize malzemesinin karışından kolonsal şekilde yeni bir oluşum meydana getirip, yapı yüklerinin daha derindeki sağlam tabakalara aktarılmasını sağlamak amacıyla geliştirilmiş bir zemin ıslah yöntemidir (Şekil 3. 23).

Jet Grout yöntemin uygulanma aşamasında yapım dizayn parametreleri, deneme kolonları ile yerinde belirlenerek, kil veya kum-çakıl gibi değişik karakterdeki çok geniş ve farklı türdeki zeminlerin ıslahı mümkün olmaktadır.

Böylece istenilen çap ve boyda ve istenilen mukavemette kolonlar imal edilerek farklı özelliklerdeki zeminler ıslah edilebilmektedir.



Şekil 3.23. Demiryolu güzergahının jet- grout ile iyileştirilmesi

Jet-Grout Sisteminin Uygulanışı:

Sondaj, arazi ve laboratuvar deneyleri ile zemin hakkında elde edilebilecek tüm verilerin toplanarak detaylı bir zemin karakteristiği ortaya konulur. Böylece zeminin mekanik olarak tanımlanması yapılarak, yükleme koşullarının ortaya konulması ile bir modelleme yapıp yöntemin uygulama şekline (derinlik- kolon çapı- karelaaj düzeni) karar verilir.

Farklı zemin özelliklerine göre, projelendirilen çapta kolonların oluşturulabilmesi için, jet Grout uygulama parametrelerinin belirlenmesine ihtiyaç duyulur.

Projelendirilen yöntemin uygulamaya geçilmeden arazide test deneme kolonları farklı zeminler ve bölgeler için yapılır.

Burada zemin özelliklerine göre uygulanacak jet sistemi (Jet 1-2-3) ile basınç- çekme hızı- dönme hızı enjeksiyon özellikleri ve enjeksiyon miktarına karar verilir.

Böylece istenilen özelliklerde kolonların oluşabilmesi için tüm parametreler arazide denenerek belirlenmiş olur.

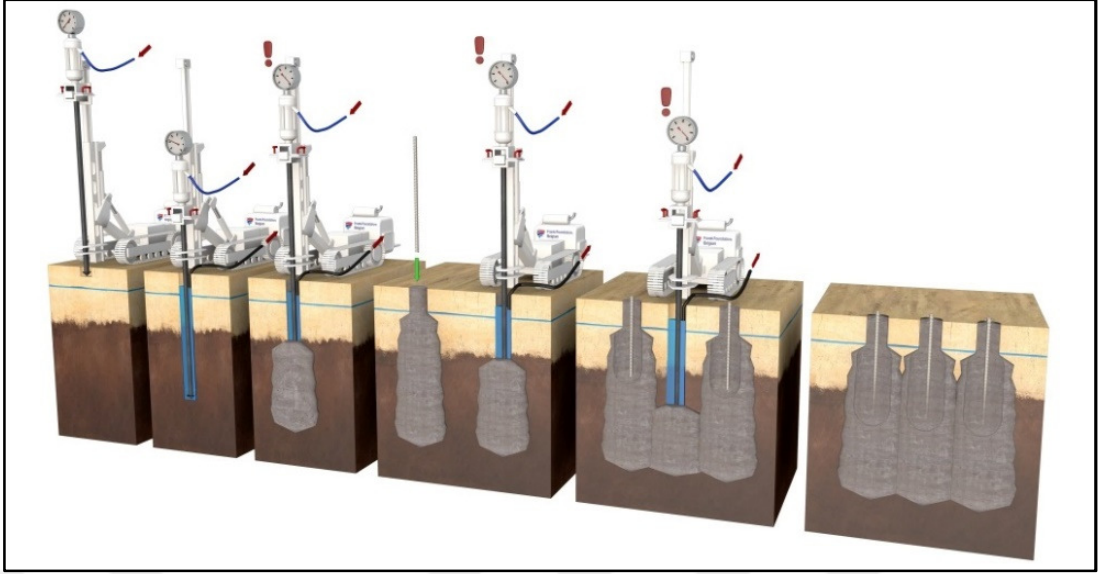
Yapım şekli bakımından kısaca yöntem; yerin içine yapılması planlanan kolon uzunluğunca itilen tij içerisinden yüksek basınç ile döner şekilde çimento şerbeti /su /hava üçlüsünden gerekli gerekli görülenlerin basılarak, yer altındaki birim ile karışıp sağlam kolonlar oluşturacak şekilde belirli hızda yukarıya doğru tijin çekilmesi işlemidir.

İtme Aşaması: hidrolik basınçlı sistem ile genelde döner usulü ile çalışan veya darbeli şekilde enjeksiyon tiji belirlenen derinliğe kadar itilir. İtme işleminin kolaylaşmasını sağlamak için su, hava, bentonit süspansiyonları sirküle edilerek kullanılabilir.

Enjeksiyon Aşaması: Bu aşamada delgi tijinin ucundaki delikler otomatik valflerle kapatılarak monitör denilen özel parçaya yatay olarak tespit edilen püskürtme memelerinden genellikle 400-600 bar basınçla jetleme enjeksiyonu yapılır.

1.5 veya 4.0 mm çaplı nozul veya nozullardan 250 m/sn gibi büyük bir hızla çıkan enjeksiyon malzemesi, çevresindeki zemini yırtarak karıştırır. Püskürtme (enjeksiyon) işlemi devam ederken kesilip karıştırılan zeminin bir kısmı oluşan basınç altında foraj deliğinden yukarı doğru transfer olur (Şekil 3.24).

Bir kısım zeminin enjeksiyon deliğinden dışarı çıkması enjeksiyonun zemine penetrasyonu için önemlidir. Ağızdan geri gelen madde hacmi zemin porozitesi ve cinsine bağlı olarak enjeksiyon hacminin %10 'u mertebesindedir. Tijin belirli bir devir hızıyla döndürülerek yukarı çekilmesiyle homojen ve sürekli yapıda, zemin-çimento karışımı, özellikleri tamamen değiştirilmiş ve iyileştirilmiş, yeni bir malzemeden oluşan jet-grout kolonları elde edilir (Şekil 3.25).



Şekil 3.24. Jet- grout uygulama aşamaları

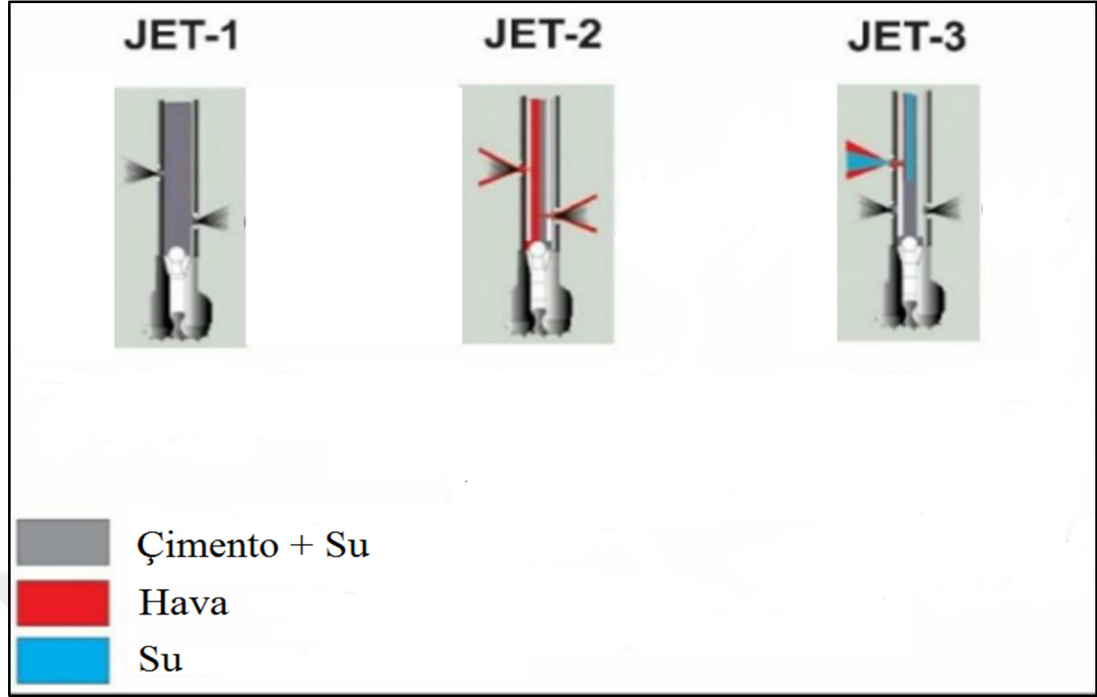


Şekil 3.25. Jet- grout ile oluşan kolonlar

Jet-Grout Uygulama Teknikleri:

Farklı zemin özelliklerine göre istenilen kolonun oluşabilmesi için geliştirilmiş 3 farklı jet enjeksiyon yöntemi mevcuttur.

1. Mono Jet (Jet1): Jet-grout uygulaması zemini kesme ve dolgu işlemlerinin sadece enjeksiyon jeti ile yapıldığı mono jeti tekniği kullanılmaktadır. Enjeksiyon 300-600 barlık basınçla tij içerisinden yapılmaktadır. Mono sisteminde delgi borusu altındaki bir ağızdan basınçlı su verilmek suretiyle istenilen derinliğe kadar delik açılır. Daha sonra su ağızlığı kapatılarak 1.6-3.0 mm çaplı enjeksiyon memelerinden basınçlı harç püskürtülmeye başlanır. Tij kendi etrafında döndürülürken yukarı doğru çekilir. Bu teknikte atık az olur. Bu yöntemle elde edilen jet-grout kolonları çapları, zemin cinsi ve parametrelerine bağlı olarak kohezyonlu zeminlerde yaklaşık 400 mm ile 800 mm arasında değişir. Granüler zeminlerde ise 500mm ile 1200 mm arasında oluşmaktadır.
2. Double Jet (Jet2): Double jet , mono jete ilave olarak hava yastığı ile desteklenmiştir. Kısaca bu sistem aynı merkezli iç içe geçmiş iki borudan oluşmaktadır. Dıştaki borudan 8-12 barlık değişen basınçlı hava verilir. Basınçlı hava, enjeksiyon sırasında sürtünme dolayısıyla oluşan kinetik enerji kayıplarında önemli bir düşüş sağlar. Böylece elde edilen jet-grout kolon çapları mono jet yöntemiyle elde edilen kolon çaplarından %60-80 oranında daha büyük olmaktadır.
3. İkili sistemin dezavantajları, elde edilen mukavemetin tekli sisteme göre daha az olması ve basılan malzeminin hava içeriğinin artırmasıdır. Bu sistem genellikle sızdırmazlık için cut-off veya perde inşasında ve çöp alanlarıyla sıvılaşma potansiyeline sahip alanların ıslahında kullanılmaktadır.
4. Triple Jet (Jet3): Sistem aynı merkezli iç içe geçmiş üç borudan oluşmaktadır. Delgi aşaması diğer sistemlerdeki gibidir. 400-600 barlık basınçlı su en iç borudan basılır. 8-12 barlık basınçlı hava ortadaki borudan verilmektedir. Dıştaki borudan basılan çimento enjeksiyonunun basıncı 30-80 bar arasında değişmektedir. Hava ve su ile desteklenen bu sistemle jet-grout kolon çapı 2.0 m ye kadar ulaşabilmektedir. Çok kohezyonlu zeminlerde büyük çaplı kolonlar yapılabilmesi için bu sistem kullanılır (Şekil 3.26).



Şekil 3.26. Jet- grout uygulama şekilleri

Çalışma Parametreleri:

Jet-grout tasarımı ve uygulamasında en önemli unsurlar enjeksiyonun özellikleri ve çalışma parametreleridir. Enjeksiyonun özellikleri, enjeksiyon maddeleri ve bilişiminden oluşur. Çalışma parametrelerinin seçimi zemin şartları, kolon çapı, istenilen taşıma gücü değeri ve uygulanacak yöntemle göre belirlenir. Bunlar; basınç, dönme ve çekme hızı, dozaj, püskürtme memeleri şeklinde sıralana bilir.

1- Basınç: Jet-grout kolonunun çapını etkileyen en önemli faktör enjeksiyon basıncıdır. Tesir yarıçapını enjeksiyon basıncına belirlemektedir. Kesme ve koparma etkisi zemine tatbik edilen enjeksiyon basıncına bağlıdır. Basınç arttıkça kolon çapı da artmaktadır. Ancak uygulanan enerji, kolonların çapındaki uygun artışa her zaman karşılık gelmez. Bunun en önemli sebebi zeminin kohezyonudur. Zeminin kohezyonu azaldıkça ve zeminin kaba dane oranı arttıkça kolon çapı da artmaktadır. Bu arada kolon yapım süresine de bağlıdır.

2- Dönme Ve Çekme Hızı: Zeminin etkili bir şekilde enjeksiyon malzemesi ile karışması için tijin dönme hızının tercihen yavaş olması ve çekme hızının ise iyileştirme alanında homojen bir karışım oluşmasını sağlayacak düzeyde olması gerekmektedir. Enjeksiyon tijinin döndürülmesinden oluşan kolonların çapları aynı zamanda belirli bir yüksekliğe düşen ortalama devir sayısına da bağlıdır.

Jet-grout kolonunun istenilen mukavemeti sağlayabilmesi için önemli olan çimento dozajını etkileyen en önemli parametre, tijin yukarıya çekilme hızıdır. Tijin yukarı çekilme hızı zemin cinsine ve enjekte edilecek karışımın miktarına bağlıdır.

3- Dozaj: Yüksek basınçlı enjeksiyon numuneleri üzerinde yapılan deneyler su/çimento oranı ile serbest basınç mukavemetleri arasındaki bağıntıyı ortaya koymuştur. Aynı enjeksiyonda kullanılan şerbetin akma mukavemeti ve terleme yüzdesi de dikkate alınacak olursa en uygun sonuçların su/çimento oranınının 0,7 ile 0,8 limitleri arasında iken alındığı görülmektedir. Genelde enjeksiyon şerbetine akışkanlık sağlamak için %2-3 oranında bentonit ilave edilmekte, su/çimento oranı ise 1.0'e yükselmektedir. Bentonit ilavesi enjeksiyon şerbetinin akışkanlığını ve işlenebilirliğini arttırmakta buna karşın enjeksiyon kolonu basınç mukavemetinde büyük bir değişiklik yapmamaktadır.

4- Püskürtme Memeleri: Püskürtme memesine verilecek geometrik şekil, enjeksiyon şerbetinin girdiği ve püskürdüğü delik çapları, transfer kanalları boyları bu memelerin kullanımını etkileyen faktörlerdir. Aşınma oranı fazla olan püskürtme memeleri bugün için sert çelikten yapılmakta olup, delik çapları 1.5 mm ile 4.0 mm arasında değişmektedir.

3.8.2. Taş kolon yöntemi

Kil ve silt içeriği fazla olan kohezyonlu zeminleri iyileştirmek için zemini kuvvetlendirici sert elemanların oluşturulması gereklidir. Düşey yönde kolon şeklinde sıkı bir şekilde yerleştirilmiş iri daneli elemanlarla oluşturulmuş kolonlar yardımıyla bu tip zeminler iyileştirilerek zemin kütlelerinin düşey yük taşıma kapasitesi ve kayma dayanımını arttırılabilir.

Taş kolonlar yöntemi ile aşağıdaki iyileştirmeler sağlanabilir:

- 1) Taşıma kapasitesinin arttırılması
- 2) Oturmanın azalması
- 3) Konsolidasyon zamanının azaltılması
- 4) Sıvılaşma potansiyelinin azaltılması

İnce daneli zeminlerde taş kolon uygulamalarının başlıca amacı arazide meydana gelecek konsolidasyon oturmasını hızlandırarak yapım öncesi temel için gerekli zeminin rijitliğini ve dayanımını arttırmaktır.

Taş kolon uygulaması ile zemin içerisindeki su, yüklemeyen kaynaklanan hidrolik eğim sayesinde yüksek enerji seviyesinden düşük enerji seviyesine doğru hareket eder. Suyun taş kolon içerisindeki hareketi zemin içerisindeki hareketine nazaran daha kolay olduğundan, taş kolonlar düşük enerji potansiyeline sahiptir. Bu nedenle, zemin suyu taş kolonlar ile kolayca drene edilebilir.

Taş kolonlar ayrıca zemindeki sıvılaşma potansiyelini azaltmak amacıyla uygulanmaktadır. Sıvılaşma potansiyeli olan bir zemine taş kolon uygulandığında zemine kazandırdığı özellikler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Taş kolon yapımı sırasında oluşan titreşim ve yer değiştirme sayesinde zeminin sıklık derecesinde artış sağlanır.
- Taş kolonlar, sahip oldukları yüksek dayanım ve yoğunluk ile zeminin taşıma gücü kapasitesini arttırmaları.
- Taş kolonlar aşırı boşluk suyu basıncı oluşmasını engeller.
- Taş kolon uygulaması ile kolon etrafındaki zeminde yanal gerilme artışı meydana gelir.

Taş Kolonun Avantajları:

- Kullanılan malzeme doğal iri çakıl olması sebebiyle ekonomik açıdan kazık ve jet grout a göre daha ucuzdur .
- Yapılmaları hızlı bir şekilde gerçekleştirilebilir.
- Taş kolondan ile yapılan iyileşmenin kontrolü CPT deneyi yardımıyla kontrol edilebilir.
- Özellikle sıvılaşma potansiyeli taşıyan alanlarda taş kolonlar sıvılaşma potansiyelini azaltıcı yönde rol oynar .
- Yöntem ile hafriyat minimum seviyededir. Çevresel atık oluşmaz.

Taş Kolonun Dezavantajları:

Taş kolonu yatay yönde destekleyecek kapasiteye sahip olmayan zeminlerde uygulanması durumunda iyileştirme sağlanamaz. Zeminin yanal olarak taş kolonu destekleyecek yapıya sahip olması gerekir (Şekil 3.27, Şekil 3.28).



Şekil 3.27. Taş kolon uygulaması



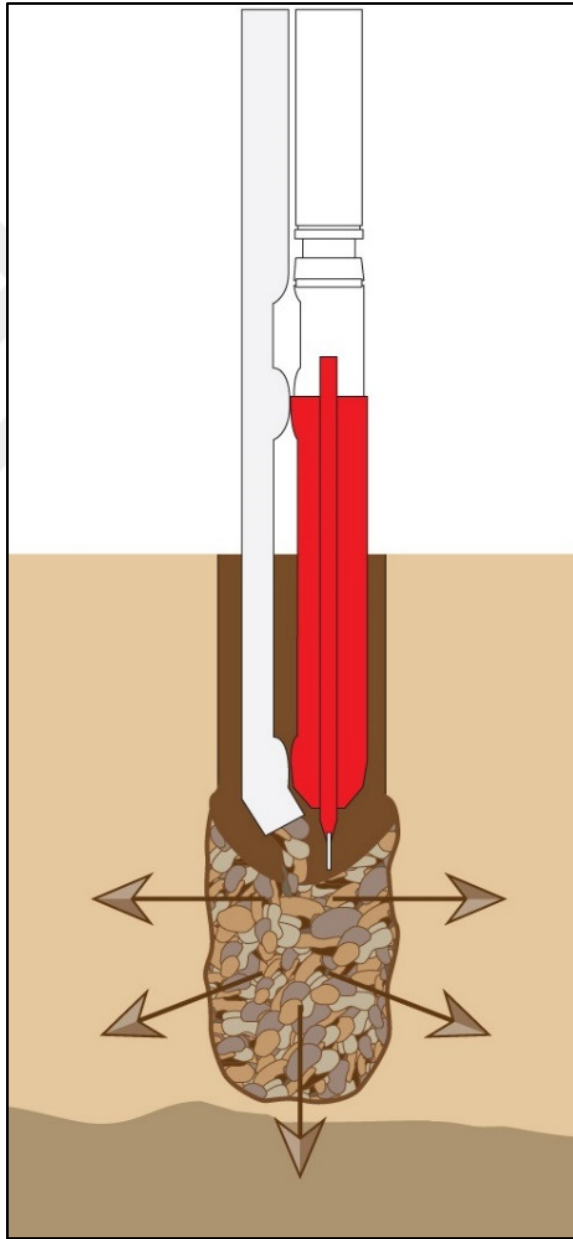
Şekil 3.28. Taş kolon uygulaması

Taş Kolon Uygulama Şekli:

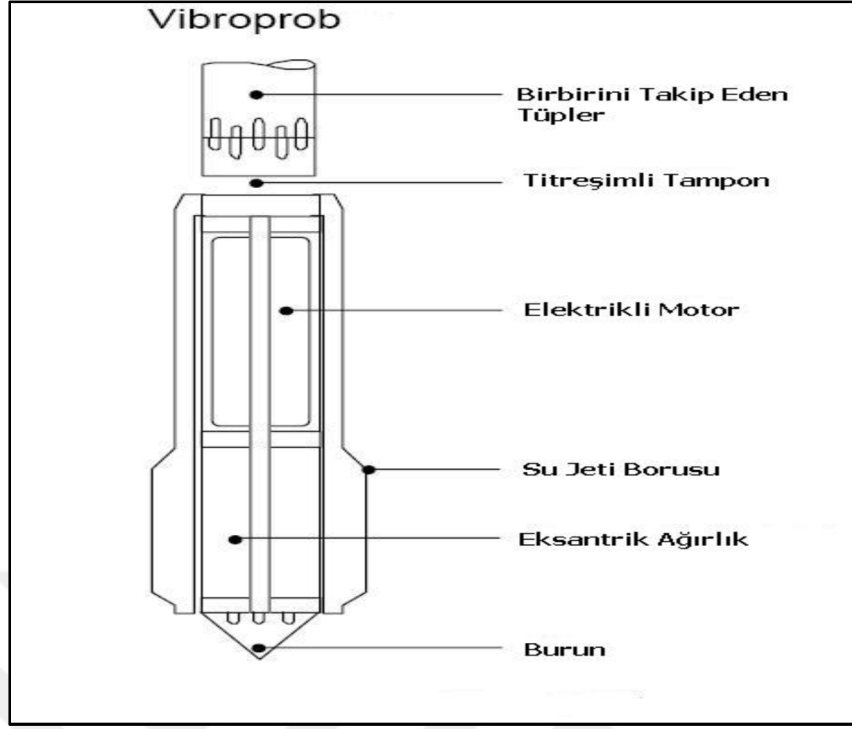
Zemin içerisine düşey bir kuyu açılarak, kuyu içerisine taşların yerleşmesi, vibroyerleştirme ve alt vibro yerine çıkarma tekniği ile yapılır.

Kuyu içerisine doldurulan taşlar sıkıştırılır iken kuyu duvarlarında yanıl olarak taş hareketleri kuyuda genişlemeye sebep olur ve buraya sıkıştırılan malzeme ile kademeli kolan imalatı sağlanır.

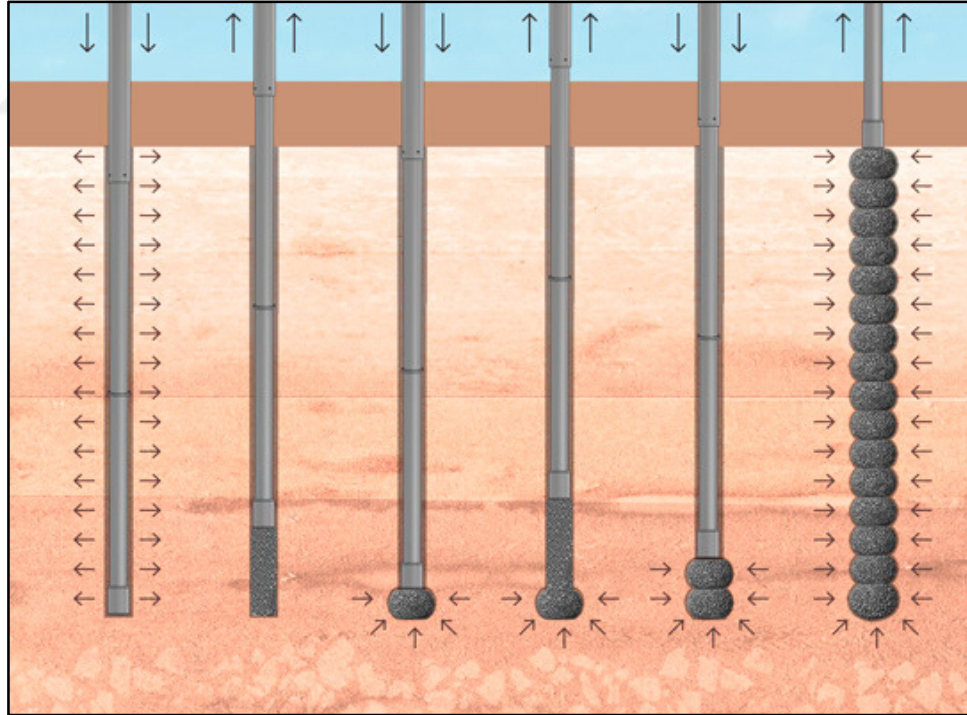
Taş kolonların zemine yerleştirilmesi yaygın olarak kuru ve ıslak uygulama olmak üzere iki farklı şekilde gerçekleştirilir .Taş kolonların inşası genel olarak şekilde gösterilen vibroflot kullanılarak yapılmaktadır (Şekil 3.29, Şekil 3.30, Şekil 3.31, Şekil 3.32).



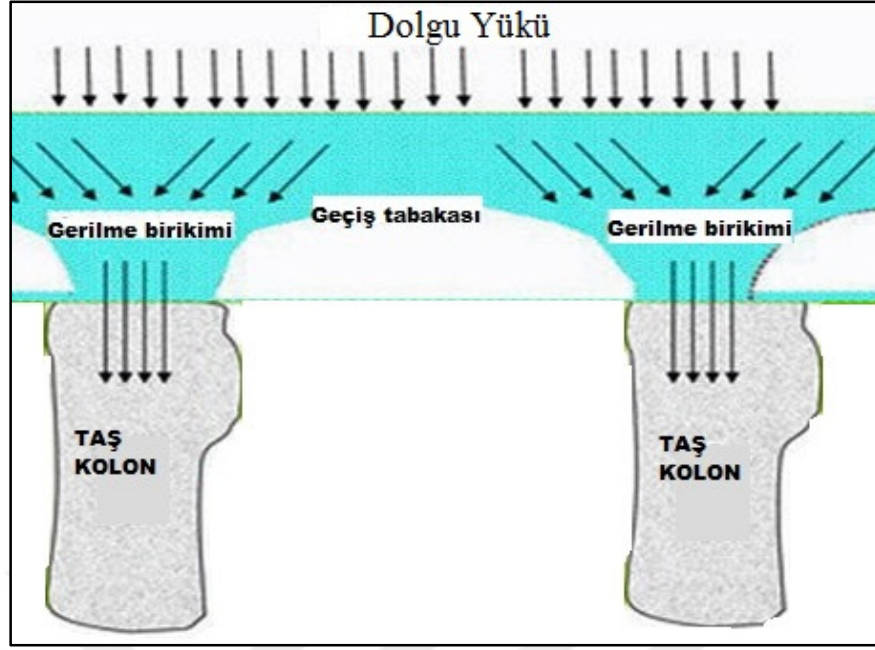
Şekil 3.29. Taş kolon vibroprob



Şekil 3.30. Taş kolon Vibroprob kesiti



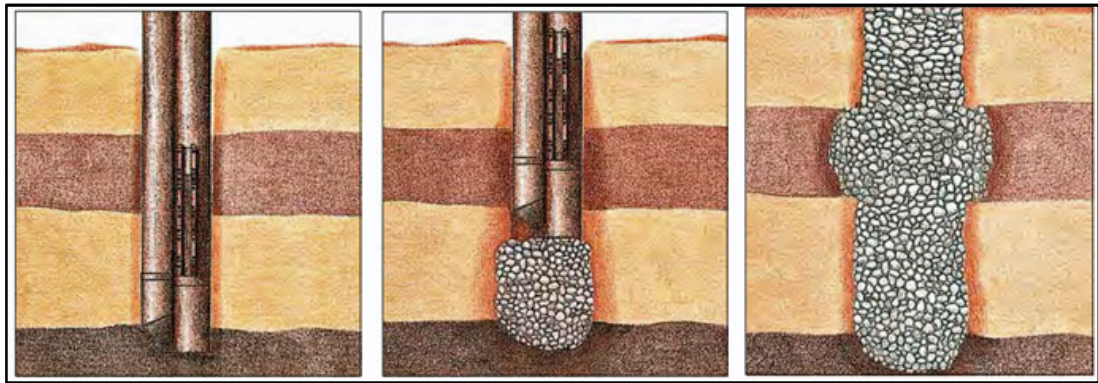
Şekil 3.31. Taş kolon yapım aşamaları



Şekil 3.32. Taş kolon taşıma şekli

Kuru Tip Uygulama: Vibroflot zayıf zemin veya dolgunun içerisine kendi ağırlığıyla vibrasyon ve hava basıncı yardımıyla birlikte istenilen derinliğe kadar indirilir.

Çakıllar vibroprobdan zemin içerisine doğu ayrı bir çakıl kanalı yardımıyla indirilir. Vibroprob adım adım (0.5 m vb.) yukarı doğru çekilirken çakıl zemin içine preslenir. Zemin içerisine çakılların akışını 2~6 barlık hava basıncı yardımıyla yapılabilir. Genel olarak kullanılan çakıllar 40~75 mm aralığında değişir (Şekil 3.33).



Şekil 3.33. Taş kolon oluşturulması

Penetrasyon: Vibroprob istenilen derinliğe vibrasyon ve hava jeti yardımıyla indirilir.

Yerleştirme: Kanal yardımıyla zemine yerleştirilen çakıl vasıtasıyla taş kolon oluşturulur.

Tamamlama: Kolon yüzeyi düzeltilir ve silindir ile sıkıştırılır.

Islak Uygulama: Kuru uygulamadan farklı olarak ıslak uygulamada su jeti kullanılmaktadır. Su jeti vibroflotun ucuna yerleştirilir ve açılan kuyuya istenilen şekli vermesi için su jeti kullanılır (Şekil 3.34).



Şekil 3.34. Taş kolon ıslak uygulama

Taş Kolonda Yükleme Deneyi:

Taş kolon taşıma kapasitesi, iyileştirme oranı ve taş kolon aralığı tespit amacıyla sahada farklı noktalarda birkaç adet taş kolonu ve de birkaç adette iyileştirilmemiş doğrudan zemin üzerine plaka yükleme deneyi yapılmalıdır. Böylece taş kolonun etkisi yerinde tespit edilmiş olur.

Deney şu şekilde yapılabilir:

Yapılmış olan taş kolon üzerine kolon çapı ve kareajına uygun şekilde tasarlanan betonarme plak kullanılır. Taş kolonlar rijit bir temel ile 4 adet kazığın üstünde olacak şekilde yükleme deneyine tabi tutulurlar. Projesinde hesaplanan kriter ve yük zaman değerleri kullanılmalıdır.

Aşağıdaki resimde görülen deney düzeneği sağlanarak belirlenen yük değerleri uygulanır ve zamana göre deplasmanlar ölçülerek taşıma gücü hesaplamaları yapılabilir.

Taş kolonlarda yükleme deneyleri kademeli olarak uygulanmalı:

- 1 kademe proje yüklerine kadar kademeli yükleme yapılmıştır. Yük - zaman artış ve bekleme süreleri, ilgili referansta belirtilen kriterlere uygun olarak yapılmıştır.
- kademe'de proje yüklerinin %150 si'ne kadar yükleme yapılmalı.
- Son kademe göçme beklenen yüklere kadar yükleme yapılmış ve yük-deplasman eğrileri çıkarılmıştır.

Son kademe yükleme bittikten sonra süreye bağlı olarak deplasmanların görülmesi açısından deney düzeneği ve yükleme 5 gün süre ile bekletilir ve okuma alınmasına devam edilmiştir.

Okumalar 4 farklı noktadan komparatörler ile yapılarak, ayrıca sabit bir noktadan topoğrafik deplasman okumaları alınmalıdır (Şekil 3.35, Şekil 3.36, Şekil 3.37, Şekil 3.38).

Yükleme deneyleri sonucunda taş kolon aralığı ve çapına karar verilerek, elde edilen iyileştirme oranlarına göre imalatlara yapılmalıdır. İmalatlar yerinde zemine borunun çakma işlemi sonrası yerleştirilen malzeme oranındaki artış yüzdesi ile sahada kontrol edilmelidir. Zemine teorik olarak kazık çapı ve boyu ile hesaplanandan %10-%20 oranında fazla malzeme sıkıştırılmalıdır.

Vibrasyonla borunun geri çekilme zamanı ve titreşim gücü malzeme sıkıştırma oranında en önemli faktördür. Geniş alan uygulamalarında, sahada ilk yapılan 20-30 adet kazıkta denemeler yapılarak ve imalat-sıkıştırma-iyileştirme oranı için en uygun yöntem tespit edilmelidir.. Ayrıca sahada yapılan CPT deneyleri ile taş kolon uygulaması iyileştirmesi kontrol edilmelidir.



Şekil 3.35. Taş kolon yükleme deneyi



Şekil 3.36. Taş kolon Taş kolon yükleme deneyi



Şekil 3.37. Taş kolon Taş kolon yükleme deneyi



Şekil 3.38. Taş kolon Taş kolon yükleme deneyi

3.8.3. Stabilizasyon

Stabilizasyon işlemleri, zeminin tabii mukavemetinin ve taşıma gücünün artırılması için yapılan zemin iyileştirme işlemleridir. Bu işlemler zemin özelliklerinin katkı maddeleri kullanılarak iyileştirilmesi şeklinde de tanımlanır.

Stabil bir zemin; dinamik ve statik yükler altında dayanıklı, atmosferik şartların değişmesine karşı mukavemetli olarak tanımlanabilir.

Taşıma gücü zayıf, kohezyonsuz malzemelerden oluşan zemin içerisine, kil, çimento, bitüm gibi bağlayıcı maddeler katılarak stabil hale getirilip ıslah edilmesi sağlanabilir.

Zemin stabilizasyonu yapıldıktan sonra, zeminin durumunu değiştirmeye ve mukavemetini düşürmeye sebep olabilecek atmosferik koşullar yani yağmur ve dondur.

Çeşitli katkılar ve sıkıştırma ile stabil hale gelmiş olan zeminin su ve dondan korunması için geçirimsiz tabaka ve drenaj sistemleri gibi koruyucu önlemlerin yapılması bu sistemde son derece önemlidir.

Stabilizasyon işlemi için kullanılacak malzeme seçiminde;

- Zemin cinsi ve jeomekanik özellikleri
- Hangi cins stabilizör ile iyileştirilebileceği
- Yeraltı suyu yüksekliği
- Stabilizasyonun amacı
- Zeminin hangi özelliğinin iyileştirilmesi gerektiği
- Stabilizatör maliyeti ve uygulama kolaylığına dikkat edilmeli.

Stabilizasyonda kullanılan başlıca malzemeler şunlardır:

Kireç: Daha çok orta ve ince taneli zeminlerle reaksiyona girerek, plastisitenin düşmesine, işlenebilirliğinin artmasına, şişmenin azalmasına ve mukavemetin artmasına neden olmaktadır. Silt ve kil içeren ince gradasyonlu zeminler kireçle stabilize edilerek ıslah edilebilir.

Bitüm:0,075mm elekten geçen kısmı %25'ten az olan daneli malzemeler için uygun bir metottur. Stabilizatör olarak asfalt çimentosu, sıvı petrol asfaltı ve emülsiyon asfaltı kullanılır.

Puzzolanlar: Silisli ve silis-alüminli maddeler olup kendi hallerinde hiçbir reaksiyon oluşturmaz, ancak kireç gibi hidrolik bağlayıcılarla çimentolaşma reaksiyonu verirler. Kaolen, montmorillenitik, kiler, tüfler doğal puzzolanlar olup, uçucu kül, yüksek fırın curufu gibi sanayi artığı malzemelerde suni puzzolanlardır. Bu malzemeler kireç veya çimento ile birlikte rutubetli ortamda toprağa karıştırıldığında mukavemeti artırırlar.

Uçucu kül ve kireç kaba ve orta boyutlu danelere sahip zeminlerde etkili bir stabilizör olarak kullanılır. Uçucu kül özellikle kaba gradasyonlu zeminlerde etkin bir stabilizör olarak kullanılır.

Çimento: Her çeşit zeminin stabilizasyonunda uygulanabilir. Ancak en iyi kaba daneli granüler zeminlerde elde edilmiştir.

1. Çimentolu Stabilizasyon:

Zemin özelliklerini iyileştirmek ve değiştirmek yani mukavemetini ve durabilitesini artırmak için zemine bağlayıcı olarak çimento katılması ile yapılan stabilizasyon işlemidir. Genellikle yol alt temel tabakalarının iyileştirilmesi için kullanılır

Zeminin Çimento ile Stabilizasyonuna Etki Eden Faktörler:

Çimento Miktarı: Arazideki zemin numuleri ile yapılan deneyler sonucunda deneme-yanılma yöntemiyle, istenilen stabilite değerlerinin sağlanması şeklinde bulunur.

Zemin Cinsi: Zemin jeomekanik özellikleri, yani zemin granülometrisi ve zeminin kimyasal ve minerolojik yapısı zemin cinsini belirler.

Su Muhtevası: Zemin-çimento karışımının su ihtiyacı standart proktor testi ile tayin edilir. Su muhtevasının zemin-çimento kalitesine yaptığı tesir daha ziyade suyun kompaksiyon üzerine yaptığı tesirden doğmaktadır.

Kompaksiyon: Zemine su ve stabilizör karıştırıldıktan hemen sonra (max yarım saat) kompaksiyona başlanıp hızla tamamlanmalıdır. Çimento stabilizasyonu yapılan zeminde rötreye yapmasını önlemek için bir kaç gün su kürü uygulanmalıdır.

2. Kireç İle Stabilizasyon

Kireç stabilizasyonu ile zemin özelliklerinin iyileştirilmesindeki amaç plastisite değerini azaltmak ve buna karşılık mukavemeti ve durabiliteyi arttırmaktır. Kireç stabilizasyonu için hidrate kireç (sönmüş kireç Ca(OH)_2) kullanılmaktadır. Kireç stabilizasyonu yapılan zeminlerde suya karşı geçirimsizlik ve direnç artar.

3. Bitüm Stabilizasyonu

Bitüm doğal kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya pirojenik kökenli hidrokarbonların bir karışımı veya bunlardan her ikisinin bir kombinasyonu olup çok defa bunların, gaz, sıvı, yarı katı veya katı olabilen metal dışı türevleri ile bir arada bulunan, yapıştırıcı özellikleri olan karbon disülfürlerle tamamen çözünen bir madde olarak tanımlanır. Bitümlü bağlayıcılar esas olarak asfalt ve katranlardır.

Asfalt: Katı, yarı katı veya sıvı olabilen, doğal halde bulunan veya ham petrolün arıtılmasıyla elde edilen ve başlıca hidrokarbonlardan oluşan bir maddedir.

Katran: Kömürün ve odunun kapalı bir sistem içerisinde damıtılmasından elde edilir. Bu şekilde elde edilen katrana ham katran denir. Genellikle katran bu şekilde değil arıtıldıktan sonra kullanılır. Kaplamalarda bağlayıcı olarak kullanılanın kömür kökenli olması tercih edilir.

4. Uçucu Kül İle Stabilizasyon:

Kömürün yakılması ile elektrik üreten termik santrallerin atık maddesi olan ince kül parçacıkları olan uçucu küller, baca gazlarıyla sürüklenerek buradaki filtreler tarafından tutularak atmosfere dağılması önlenir ve önemli miktarda birikirler.

Uçucu kül tanecikleri küresel yapıda olup, büyüklükleri 0.002mm-0.06mm (silt boyutunda) arasında değişmektedir. Uçucu külün esas bileşenleri SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 tür. Uçucu kül tipine bağlı olmak üzere belli miktarlarda CaO , MgO ve SO_3 ve yanmamış karbon içerir. Sıkıştırılmış uçucu kül dolguların birim hacim ağırlıkları, diğer tabii dolgulara göre daha düşüktür. Bu nedenle taşıma kapasitesi az ve sıkışabilir zeminler üzerine yapılacak dolgu/yol dolgusunda uçucu kül kullanımı avantaj sağlamaktadır. Uçucu kül-kireç bulamacı enjeksiyonları zeminlerin stabilizasyonunda kullanılmaktadır. Düşük kil ihtiva eden zeminlerde kireç enjeksiyonu ile istenilen stabilizasyon elde edilememektedir. Suni puzolan olan uçucu kül ile kirecin karışımı istenen stabilizasyonu sağlamaktadır.

Stabilizasyon malzemesi olarak yalnız uçucu kül, uçucu-kül kireç, uçucu kül-çimento, uçucu kül-çimento-kil, uçucu kül-çimento-kum, uçucu kül-çimento-kireç karışımları da kullanılmaktadır.

Stabilizasyon İşleminin Arazide Uygulanması: Öncelikle zeminin jeomekanik-minerolojik ve kimyasal özellikleri belirlenip stabilizör olarak kullanılacak malzemenye karar vermek için saha ve laboratuvar koşullarında çeşitli deneyler yapılır. En uygun stabilizasyon malzemesi belirlendikten sonra sahaya tatbik aşamasına geçilir.

Stabilizasyon işlemine tabi tutulacak zeminin optimum su muhtevası ve max. kuru birim hacim ağırlığı tespit edilip, yapılacak sıkıştırma için zemin cinsine uygun kompaksiyon makinası seçilir.

Arazide çalışma şartlarının zeminin su muhtevasına, saha ve hava şartlarına bağlı olarak değiştirme zorunluluğu vardır. Arazide ki zemin optimum su muhtevasından kuru ise su muhtevası optimum değere gelinceye kadar ıslatılır ve sonra da sıkıştırma yapılır. Zeminin optimum su muhtevasından daha ıslak olması halinde, zeminin su muhtevası, ufalanıp dağıtılarak düşürülüp daha sonra sıkıştırma yapılır.

Çalışma güzergahında ilk olarak, temel zeminin kaba bir şekilde tesviyesi ve onun mekanik stabilitesini iyileştirmek için lüzumlu malzemenin yüzeye serilmesi işlemi uygulanır. Bu işlemler greyder, finişer gibi makineler ile yapılır. Zemin ile stabilizörlerin iyice karıştırılması için ziraat makinelerinden geliştirilmiş çeşitli tip makineler veya özel tasarım makineler kullanılır. Karıştırma işlemi aşağıda ki metottan biri kullanılarak yapılabilir.

Tesiste Karıştırma(Plant-Mix): Bütün malzeme sabit bir makinadan geçirilerek istenilen su muhtevasına getirilir ve stabilizör ile karıştırılır. Yerinde Karıştırma(Mix-in-Place):Bütün karıştırma işi yerinde yapılır ve malzeme bütün iş boyunca tam seviyesinde tutulur.

Gezerek Karıştırma(Travel-Mix): Figüreler halinde yığılan malzeme kovalı elevatör ile kaldırılarak,figüreler boyunca ilerleyen bir karıştırma makinasına serilir.Makinada karışan malzeme yeniden figüreler haline getirilerek yayılma ve kompaksiyona hazır bir duruma geçer.

3.8.4. Kompaksiyon

Kompaksiyon, baskı ve çeşitli yükler ile zeminin sıkıştırılarak yoğun hale getirilmesi işlemidir. Kompaksiyon ile:

- Sıkıştırılan zeminin, sabit, hareketli ve dinamik yükler altında yapacağı oturmalar azaltılır.
- Zeminin taşıma gücünü ve stabilitesi artırılır.
- Zeminin geçirgenliği azaltılarak, zemine daha kararlı bir yapı kazandırılır.

Zeminin jeo-mekanik özelliklerine göre farklı kompaksiyon yöntemleri uygulamak gerekir. Geçirimsiz özellikte ince malzeme bulduran zeminlerin laboratuvarında ve arazide sıkıştırma deneylerinde standart proktor deneyi temel olarak alınır iken geçirimli zeminlerin sıkıştırma deneylerinde bağıl birim hacim ağırlık deneyi temel olarak alınır.

Suyun özellikle ince taneli zeminlerde sıkıştırma işlemi için önemli bir etken olduğu bilinmektedir. Sıkıştırma deneylerinin amacı, zemin için en büyük kuru birim hacim ağırlığını sağlayacak optimum su içeriğinin saptanmasıdır.

Laboratuvar deneylerinin amacı, yerinde uygulanması beklenen sıkıştırma enerjisinin tespit edilmesidir. Genellikle, sıradan temel ve dolgu projelendirmelerinde, yerinde sıkıştırma enerjisinin benzerini elde etmek için laboratuvarında standart sıkıştırma (proktor) deneyi kullanılır.

Labvratuvar sıkıştırma deneyleri dinamik yada statik'dirler. Dinamik deneyler statik deneylerden daha çok kullanılırlar.

Sıkıştırma Deneyleri:

Bir zeminin sıkıştırılarak optimum su muhtevasının saptanmasında aşağıdaki yöntemlerden yararlanılır.

1. Standart Proktor Deneyi
2. Modifiye Proktor Deneyi
3. Vibrasyonlu Sıkıştırma Deneyi
4. CBR kalıbında Büyük Parçacıklar İçeren Taşlı Zeminleri Sıkıştırma Deneyi

Bu deneyler sonucunda sıkıştırılmış bir zeminde nem içeriği ile kuru birim hacim ağırlığı arasındaki ilişki belirlenir.

Arazide Kompaksiyon:

Laboratuvarda yapılan kompaksiyon deney sonuçları arazi uygulaması için bir ölçü olarak alınır. Arazide doğal koşullarda zeminin nem içeriğinin hassas şekilde kontrol edilmesi çok zordur. Arazide bir sıkıştırma makinesi ile gerçekleştirilecek sıkıştırmanın düzeyi aşağıda yer alan bir çok faktöre bağlıdır.

Kompaksiyona Etki Eden Faktörler:

1. Zeminin Cinsi
2. Maksimum Dane Boyutu
3. Tabaka Kalınlığı
4. Basıncın Uygulandığı Alan
5. Toprağa Uygulanan Basınç Yoğunluğu
6. Sıkıştırma Makinesinin Tipi
7. Sıkıştırma Makinesinin Geçiş Sayısı

Arazide Kullanılan Kompaksiyon Makineleri:

1. Silindirler

Düz Tekerlekli Silindirler: Az kohezyonlu ve kohezyonsuz kaba taneli zeminler için elverişlidir. Bu makineler içi boş çelik silindirlere oluşmaktadır. Silindirlerin içi kum veya su ile doldurularak kütlesi arttırılmaktadır. Hemen hemen her çeşit zeminin sıkıştırılmasında kullanılan bu makineler zemin yüzeyi ile %100 temas halinde olup zemine 400 kPa'a kadar basınç uygulayabilir, en yaygın kullanılma alanları sıkıştırılmış dolguların yüzeyinin yeniden sıkıştırılması ve asfalt kaplamaların sıkıştırılması olmaktadır (Şekil 3.39).

Lastik Tekerlekli Silindirler: Plastik olmayan çok az kohezyona sahip siltli ve kumlu topraklarda kullanılır. Birbirine yakın çok sayıda lastik tekerleği olan ağır bir arabadan oluşan bu silindirler kohezyonlu ve kohezyonsuz zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılmaktadır (Şekil 3.40).



Şekil 3.39. Düz tekerlekli silindir



Şekil 3.40. Lastik tekerlekli silindir

Keçi Ayaklı Silindirler: İnce daneli kohezyonlu zeminlerde en iyi sonucu verir. Çelik bir silindirik gövde üzerinde “ayak” biçiminde çok sayıda çıkıntıdan (alanları 30-80 cm²) oluşan bu silindirlerde temas alanı %8-%12, uygulanan basınç 1400-7000 kPa arasında olup sıkıştırma basınç etkisi yanında yoğrulma etkisinden de yararlanarak sağlanır.

Geçiş sayısı arttıkça tabaka kalınlığı boyunca aşağıdan yukarı doğru sıkışma gerçekleşir. Keçi ayaklı silindirler özellikle kohezyonlu zeminlerin sıkıştırılmasında kullanılır(Şekil 3.41).



Şekil 3.41. Keçi ayaklı silindir

2. Sarsıcılar (Vibratörler)

Vibrasyonlu Silindirler: Bunlar vibrasyon mekanizmasına sahip düz yüzeyle silindirlerdir. Çoğu zemin tipi için kullanılmaktadır ve eğer zeminin nem içeriği optimum nem içeriğine göre biraz daha nemli ise daha etkili olurlar. Özellikle ince malzemenin bulunmadığı veya çok az bulunduğu kaba bünyeli zeminlerde etkin bir sıkıştırma yöntemidir. Silindirin kütlesi ve titreşim frekansı ile zemin tipi ve tabaka kalınlığı uyumlu olmalıdır. Silindirin düşük hızları geçiş sayısının az olmasını gerektirir.

Vibrasyonlu el kompaktörleri: Çoğu zemin tipi için uygun olan bu araç üzerinde vibratörün yerleştirildiği yukarı doğru çevrilmiş kenarları olan çelik plaka veya eğrisel plakadan meydana gelir (Şekil 3.42).



Şekil 3.42. Vibrasyonlu el kompaktörü

3. Tokmaklar

Girilmesi zor olan küçük alanların veya büyük sıkıştırma araçlarının kullanımının doğru olmadığı alanların sıkıştırılması için, genellikle de hendek veya kanal çalışmalarında kullanılmaktadırlar. Tabla Genişliği: 280x320 mm (Şekil 3.42)



Şekil 3. 43. Tokmak

Derin Kompaksiyon Teknikleri

Derin zeminlerin yoğunlaştırılması aşağıdaki tekniklerle mümkün olabilir.

Patlayıcı: Patlayıcılar, yüzeyde veya açılan kuyuların içinde patlatılarak, zayıf yapılı zemin çökerek zemin partikülleri daha yoğun bir yapıya sahip olurlar. Son yoğunluk aniden gelişmez, aşırı gözenek basınçlarının oluşması biraz zaman alabilir.

Heavy Tamping: Büyük kütleler yeryüzüne düşürülerek kompaksiyon sağlanır ve uzun süreli konsolidasyon oluşur, dinamik kompaksiyon adıyla anılır.

Vibrasyon: Vibrasyonlu probe veya kazıklar kullanılarak yoğunlaştırma sağlanır. Bunun için su jeti veya basınçlı hava kullanılır ve granüle malzeme veya çimentolu malzeme ile doldurulur.

Arazi Sıkıştırma Kontrolü

Sıkıştırılan toprak dolguların arazideki sıkılık derecesini yerinde ölçmek üzere değişik yöntemler geliştirilmiştir. Bunlar arasında yaygın olarak kullanılanlar;

1. Kum Konisi yöntemi
2. Balon Yöntemi
3. Yağ (veya su) Yöntemi
4. Nükleer Aletler

Bu yöntemlerden ilk üçü aynı temel yaklaşımı esas almaktadır. Sıkıştırılan zemin yüzeyinde bir çukur açmak, bu çukurdan çıkan zeminin ağırlığını ve çukurun hacmini ölçmek ve zeminin yoğunluğunu hesaplamak. Çukurun hacmini ölçmek için kum hunisi, şişirilen bir balon veya yağ (geçirimsiz zeminlerde) kullanılmaktadır.

Nükleer aletler yardımı ile ise zeminin yoğunluğu ve su muhtevası yerinde doğrudan saptanabilmektedir.

3.8.5. Donatılı zeminler

Donatılı zemin uygulamaları özellikle baraj, yol, dolgu, şev ve istinad yapılarında kullanılmakla birlikte son yıllarda yapı temellerinde temel zeminin güçlendirilmesi amacıyla da kullanılmaktadır. Bu donatılar metal, plastik ve geosentetik malzemelerden üretilmektedir.

Zeminlerin ve dolguların yukarıda belirtilen malzemeler ile donatılı olarak tasarlanması özellikle son yıllarda geoteknik mühendisliği alanında giderek yaygınlaşmaktadır.

Donatılı zemin istinat yapısı uygulamalarının yaygın hale gelmesinin nedeni, bu yöntemle alışıla gelmiş büyük temel boyutlarına ve betonarme duvar kesitlerine ihtiyaç duyulmadan daha ekonomik ve daha estetik yapıların inşa edilebilmesidir.

Donatılı istinat duvar, zemin iyileştirme ve dolgularda uygulamaları gibi bir çok yapı ve yöntemde yeni bir teknoloji olmasına rağmen çok çeşitli uygulamalar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca esnek bir yapısının olmasından dolayı deprem yükleri altında esnek davranış göstermesi ile hasarlanmaya karşı mukavemetlidirler.

Temel, bilindiği gibi yapının üzerinde bulunduğu zeminle teması sağlayan ve yapıdan gelen yükleri zemine aktaran yapının önemli bir elemanıdır.

3.8.5.1. Geosentetik malzemelerin özellikleri

Geosentetik malzemeler ile zeminlerin ıslahı nispeten yeni olsa da gerek uygulama alanları gerekse kullanım miktarı olarak her geçen gün hızla artmaktadır. Bu nedenle geosentetik malzemelerin kullanım yapılarındaki kullanım yerleri amaçları ve dizayn esasları ayrı bir bölüm halinde ele alınacaktır. Geosentetik malzemeler:

- Geotekstil
- Geogrid (Geoızgara)
- Geomembran
- Geokompozit

olarak sınıflandırılır. Bunların her biri farklı özelliklere sahip olduğundan dolayı farklı amaçlar için farklı kullanım yerleri mevcuttur.

Polipropilen, polietilen, poliester, poliamid (nylon) ve polivinil klorür gibi sentetik maddelerden imal edildiklerinden ve zemin (yer - yani Latince Geo) için kullanıldıklarından dolayı genel anlamda geosentetik malzemeler olarak adlandırılır.

Kullanım amaçları:

Filtrasyon: Bir filtre gibi davranarak, suyun geçişine izin verir fakat buna karşın en küçük dane çaplı zemini tutar ve sürüklenmesine izin vermez.

Drenaj: Kendi düzlemi boyunca (bünyesinde) sıvı veya gazı istenilen çıkışa doğru taşır.

Takviye (Güçlendirme): Zeminin gerilme direncini ve göçmeden önceki deformasyon kapasitesini artırarak global bir kuvvetlendirme sağlarlar.

Separasyon (Ayırman): İnce taneli zemin ile kaba taneli zemin ara yüzeyine yerleştirildiğinde “ayraç” işlevi görür.

İzalsasyon (Su Bariyeri): Geçirimsiz tabaka oluşturmak için bitüm ve plastik yalıtım malzemeleriyle doygun hale getirilir.

Koruma: Deformasyonu ve gerilmeyi azaltarak yada yayarak istenilen malzemeyi korur. olarak sınıflandırılır.

3.8.5.2. Geosentetik malzemelerin mekanik ve fiziksel özellikleri

- Çekme mukavemeti (gerilme / deformasyon ilişkisi)
- Sünme
- Sürtünme direnci (zeminle geosentetik arasında)
- Durabilite (Ultra-Viyole ışınlarına, ısıya, suya, kimyasal ve organik maddelere, alkali ve asidik maddelere karşı direnç)
- Gözenek boyutu (geostekstiller için) ve ızgara delik boyutları (geogrid)
- Permabilite (geotekstiller için)
- Delinme, yırtılma, patlama direnci (geotekstiller için)
- Isı ile yumuşama ve (veya erime direnci) olarak sayılabilir.

3.8.5.3. Geotekstiller

Geotekstiller, sentetik polimerlerden oluşur. Esas olarak, plastik dokuma olduklarından plastiğin üretim ve işleme özelliklerini taşırlar. Geotekstillerin hammaddesi termoplastiklerdir. Termoplastikler mum gibidir, yani ısıtılıp soğutulabilirler. Geotekstiller örgülü ve örgüsüz olmak üzere iki kısma ayrılırlar.

Geotekstiller, örgülü (yani dokunmuş) ve örgüsüz (dokumasız) olarak iki tiptir. Örgülü tipleri tıpkı dokunmuş kumaş gibi olan malzemelerdir. Örgüsüz tipler mekanik (iğneleme), fiziksel ısı) ve kimyasal yollarla dokumasız olarak imal edilen ve tıpkı keçe gibi olan malzemelerdir. Örgülü tiplerinin yüksek mukavemetli oluşları nedeniyle takviye, yük dağıtma, separasyon işlerinde kullanılır. Örgüsüz tipleri ise filtrasyon, drenaj, bitümle emdirilerek izalasyon işlerinde kullanılmaktadır.

Geotekstillerin drenaj ve filtrasyon özellikleri malzemenin kalınlığı, gözenek boyut dağılımı, gözenek yüzey alanı oranı (yani porozite), vb. hususlara bağlı olarak değişir. Drenaj suyun geotekstil malzemedan geçebilme kabiliyeti iken filtrasyon ise suyun taşıdığı ince malzemelerin (yani kil partikülleri) geotekstil malzemedan geçişini engelleyip ancak suyun geçişine müsaade ederek zemine borulanmayı (yani ince malzemenin yıkanmasını) önlemektir. Dolayısıyla drenaj amaçlı kullanılacak geotekstillerin dren kabiliyeti ve filtrasyon özelliği yüksek olmalıdır. Ayrıca geotekstiller separasyon (ayırman) amaçlı olarak kullanılırlar. Separasyon iki farklı malzemenin (örneğin granüler malzeme ile killi zemin) birbirlerine karışmasını önlemektir. Separasyon için kullanılacak geotekstilin yeterince geçirgen ama filtre etme özelliği yüksek olmalıdır.

3.8.5.4. Geogridler

Geogrid, polipropilen veya yüksek yoğunlukta polietilen şiltelerinin çekilerek uzatılması sonucu elde olunan, yüksek çekme modülüne sahip, üzerinde düzgün olarak dağılmış elips, dikdörtgen ya da kare boşluklar bulunan ve özellikle zemin güçlendirilmesinde kullanılan bir geosentetik türüdür. Geogrid açıklıkları 0.5 – 4 inç arasında değişmektedir. Geogridler İnşaat sahasına 3 ile 10 feet genişliğinde rulolar halinde getirilirler.

Geogridle güçlendirmede temel ilke, zemin yapısı içerisinde düşük deformasyona karşılık yüksek çekme kuvveti oluşturmaktır. Bu da, temel malzemesi ile geogrid arasındaki kenetlenme sonucu ortaya çıkar. Kenetlenmeye etkiyen faktörler ise geogrid göz açıklığı, bölgesel zeminin durumu ve dağılımıdır.

Geogrid, işlevini tam olarak yerine getirebilmesi için çekme mukavemetinin, kayma mukavemetinin, ek yeri (eklem) mukavemetinin, sünme, kimyasal, biyolojik, termik ve ultraviyole dirençlerinin yeterli olması gerekir.

Geogridlerde Kenetlenme Prensibi:

Geogridler, değişik gereksinimleri karşılamak üzere, farklı mukavemetlerde ve göz açıklıklarında üretilmektedir.

Geogridlerin üzerine dolgu veya granüler malzeme serildiğinde, malzeme taneleri geogridin açıklıklarıyla tam olarak kenetlenir. Geogridin yüksek mukavemetli elemanlarına sürtünen ve kenetlenen dolgu, böylelikle bir donatılı platform oluşturur. Tüm dikey ve yanal kuvvetler, taşıma gücü çok az olan topraktan geogride aktarılır ve geogridin üzerinde toplanır. Bu donatılı platform sayesinde basınçtan dolayı oluşan çökmeler ya da yanal hareketler önlenir (Şekil 3.44).

Geogridin üzerine gelecek olan malzeme, sergiler (kademeli) halinde serilip sıkıştırılmalıdır. Geogridin üzerine direkt olarak hiçbir aracın çıkmasına izin verilmemelidir. Üzerine en az 30 cm'lik dolgu serildikten sonra geogridin üstünde inşaat makineleriyle çalışılabilir. Bu durumda dahi iş makinelerinin sert dönüş (45° ve üstü) yapmalarına izin verilmez

3.8.5.5. Geomembranlar

Geomembranlar, aynı zamanda kaplama malzemesi olarak da adlandırılırlar. Sıvı taşınmasını engelleyen düşük geçirgenlikli suni yapraklardır. Geomembranlar, genellikle esnek termoplastik veya termoset polimerik malzemeden üretilmiştir. Fabrikalarda ince yapraklar şeklinde üretilerek iş sahasına rulo halinde götürülürler.



Şekil 3.44. Geogridlerin kenetlenme prensibi ve yanal hareketleri önlemesi

Su yalıtımının % 100 güvenilir olmasının gerektiği ve geri dönüşü olmayan tüm inşaat mühendisliği uygulamalarında geomembranlar tercih nedenidir (Şekil 3.45).

Poliyeten esaslı membranlar ile yapılan su yalıtım uygulamaları su özelliklere sahiptir:

- Ruloların çift hatlı kaynağı (membranın kalınlığı, membran cinsi ve hava sıcaklığına göre seçilen kaynak ısı ve hızını otomatik olarak kontrol eden robot kaynak makineleri ile yapılır ve çifte güvence sağlar.)
- Kaynak hatları boyunca basınç testi (kaynakların test edilebilmesi ile yekpare bir membranı garanti eder.)
- Geotekstil koruması (membranın iki yüzeyinin geotekstil battaniyesine sarılarak delinmeye karşı korunmasını sağlar.)

- Açık renk sinyal tabakası (Uygulama sırasında meydana gelen incelme ve delinmelerin hemen gözlenerek takip edilmesini sağlar.)
- Prefabrike edilmiş köşe elemanları (en kritik bölgeler olan köşelerin çift koruma ile kaynaklanmasını sağlar)



Şekil 3.45. Su yalıtımı için metro inşaatında uygulanan polietilen esaslı geomembranlar

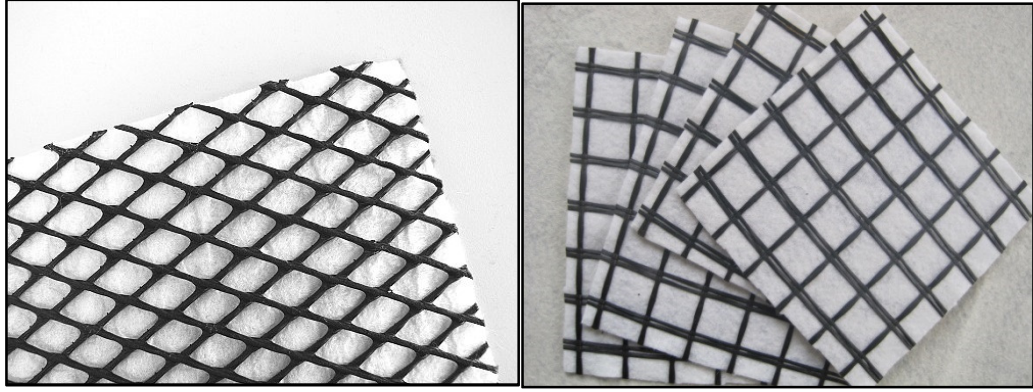
Geomembranlar yüksek hızlı demiryollarında aç-kapa yapılarında ve tünellerde su izalasyonu amacıyla kullanılır.

3.8.5.6. Geokompozitler

Geokompozitler, geogrid ve geotekstil malzemelerinin kompozit yapı şeklinde, birlikte yekpare kullanılması amacıyla üretilmişlerdir. Geokompozit malzemeler demiryolu hatlarında son yıllarda yoğun olarak kullanılmaya başlanılmıştır (Şekil 3.46).

Farklı tasarım modellerine göre geogrit ve geokompozitler 3 şekilde uygulanabilir:

- Dolgu altına
- Balast altına
- Travers altına



Şekil 3.46. Geokompozitler (geogrid + geotekstil)

3.8.5.7. Geosentetik malzemelerinin kullanım alanları

Geosentetik malzemelerinin ulaşım yapılarındaki kullanım yerleri ve amaçları çok farklılık göstermektedir.

Bunlar:

- Yüzey altı drenaj yapıları
- Yol dolgu şevlerinin ve tabanlarının güçlendirilmesi
- Kaplamasız yolların güçlendirilmesi
- Şev erozyonlarının kontrolü
- Şevlerin güçlendirilmesi
- Şevlerin stabilizasyonu
- Donatılı istinat duvarları
- Yol kaplamalarının takviyesi
- Kaplama çatlaklarının kontrolü olarak sayılabilir.

Demiryollarında Geosentetik Malzemeler ile Uygulamaları:

Dolgu Altı uygulamaları

Demiryolu dolgularının yapımında;

- Dolgu temel stabilitesi
- Dolgu şev stabilitesi

problemlerini doğurmaktadır. Ayrıca yol dolgusu zayıf zemin üzerine inşa edilirse problemler daha da artmaktadır. Bilindiği gibi zayıf zeminler üzerinde yapılan yol dolgularında dolgu içinde gelişen yatay toprak basıncı ile dolgu yana doğru yayılmaya

çalışacaktır. Çünkü yatay toprak basıncı dolgunun tabanında yatay kayma gerilmelerini doğurmakta ve zemin yeterli kayma direncine sahip değilse yol dolgusunun stabilitesi bozularak kayma/göçme oluşabilmektedir.

Eğer dolgu tabanına uygun mukavemetli geotekstil veya geogrid tabakası konulursa yumuşak zeminin stabilitesi artırılarak yol dolgusunda kayma/göçme hareketi önlenilecektir. Bu amaçla kullanılacak geosentetik malzemeler yatay ve düşey deformasyonları azaltsa da uzun-dönem konsolidasyon oturmasını önleyememektedir. Dolayısıyla zayıf zeminler üzerine konan geosentetik malzemesi sadece yol dolgusunun stabilitesini artırabilmekte fakat konsolidasyon oturmasını engelleyememektedir. Dolgu altında kullanılacak geosentetik donatılar ile

- Emniyet faktörünün artması
- Dolgu yüksekliğinin artması
- Yapım sırasında iş makinalarının zayıf zemine batmadan çalışma kolaylığının sağlanması
- Zamana bağlı oturmaların üniform olması mümkün olabilmektedir.

Geosentetik (geotekstil veya geogrid) malzemelerin stabilize kaplamalı yollarda kullanımı halinde:

- Kayma mukavemetinde
- Taşıma gücünde
- Taban çekme mukavemetinde

artış sağlanarak donatı görevi görmektedir.

Geosentetik kullanımı halinde kayma yüzeyi daha uzun olacağından dolayı taşıma gücünde artacaktır.

Yumuşak ya da zayıf zeminlerde inşaat ya da yol yaparken, dolgu ya da kazık gibi pahalı, zaman kaybettirici çözümler yerine geogrid gereğine göre tek veya birkaç kat olarak serilebilir. Toprağın taşıma mukavemetini kenetlenme prensibiyle artıran geogridler aynı zamanda hızlı uygulamayla zamanın ekonomi olduğunu kanıtlamaktadır.

Yüksek hızlı demiryolu güzergah dolguları diğer yol yapılarına göre daha fazla hassasiyet gerektirdiğinden, geogrid ve geotekstil uygulamasının tek başına yeterli olmayacağı zeminlerde mutlaka iyileştirme işlemleri yapılmalıdır (Şekil 3.47-Şekil 3.52).



Şekil 3.47. Demiryolu hat yatağı için geokompozit (geogrid +geomembran) uygulaması ve Hatta serilmesi



Şekil 3.48. Geokompozit üzerine granül malzeme serilmesi



Şekil 3.49. Geokompozit ve granül malzeme üzerine dolgu malzemesi serilmesi



Şekil 3.50. Geokompozit uygulama katmanları (granül malzeme + geokompozit + granül malzeme + dolgu malzemesi)



Şekil 3.51. Geokompozit uygulama katmanları



Şekil 3.52. Demiryolu hat yatağı için hücreli grid uygulaması

➤ Balast Altı Uygulamaları, (Şekil 3.53.)



Şekil 3.53. Geogrit malzemesinin balast altına uygulanması

➤ Travers Altı Uygulamaları, (Şekil 3.54.)



Şekil 3.54. Geokompozit malzemesinin travers altına uygulanması.

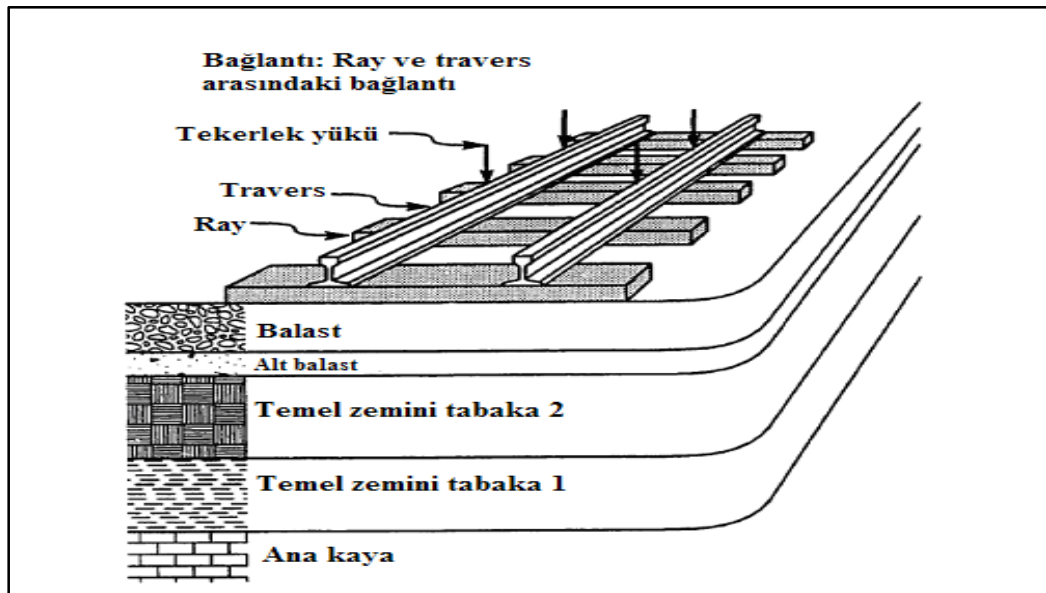
4. YÜKSEK HIZLI DEMİRYOLU HAT YATAĞI

Yüksek hızlı demiryolu hatyatağı, yüksek hızlarda ve belirlenen tasarım kriterlerinde (dingil basıncı, maksimum eğim, minimum kurp yarıçapı, dever vs.) yüksek hızlara uygun özel üstyapı elemanları ile uyum içinde çalışacak şekilde, yüksek emniyet ve konfor sağlayacak şekilde tabakalar halinde uygun efsaftaki malzemeler ile oluşturulur.

Demiryolu hat yatağı, ray, travers ve balast üçlüsünün desteklenerek, statik ve dinamik yükler altında stabilitesinin sağlanması için, tabakalar halinde oluşturulan 1.tabaka balast, alt balast (subballast), dolgu ve taban zemininden oluşmaktadır (Şekil 4.1).

Demiryolu hat yatağının görevleri:

- Üst yapı elemanları ray, travers ve balast üçlüsünün ilettiği dingil basıncı yüklerini yayarak, deformasyona uğramadan taşımak
- Demiryolu hattı için sağlam bir platform sağlarken çevreden gelen değişik etkilere karşı dayanıklı olmak.



Şekil 4.1. Demiryolu hattının bileşenleri

Demiryolu hat yatağının tasarımı iki aşamalı olarak düşünülmelidir.

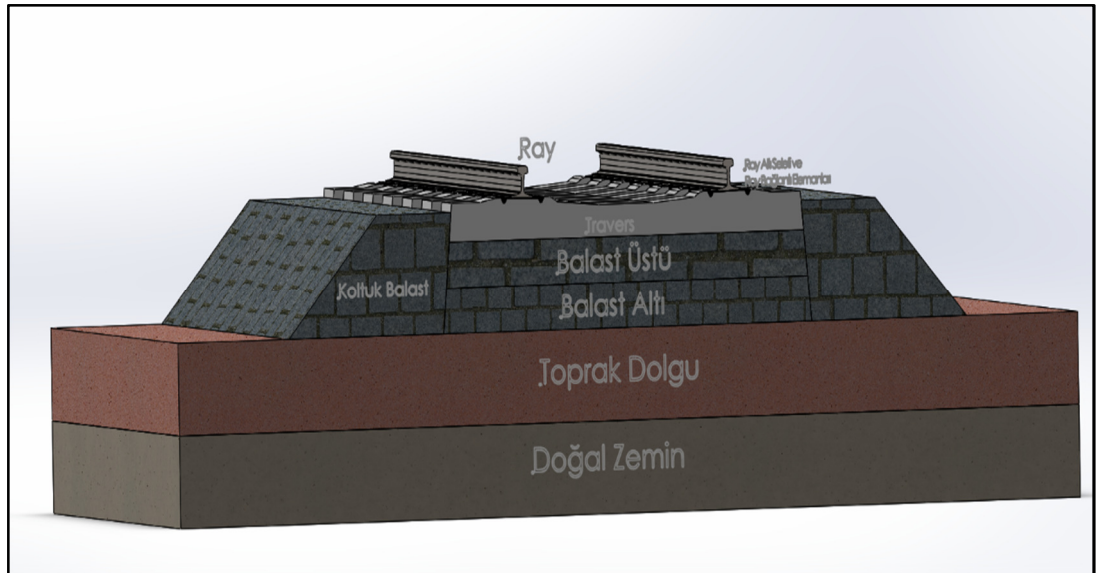
Demiryolu hat yatağındaki her bir tabakanın yani taban zemin, dolgu ve alt balast tabakalarının en mükemmel şekilde tasarım ve imalatının gerçekleştirilmesi hedeflenmelidir.

Oluşturulan demiryolu hat yatağının korunması için gerekli önlemlerin alınmasıdır.

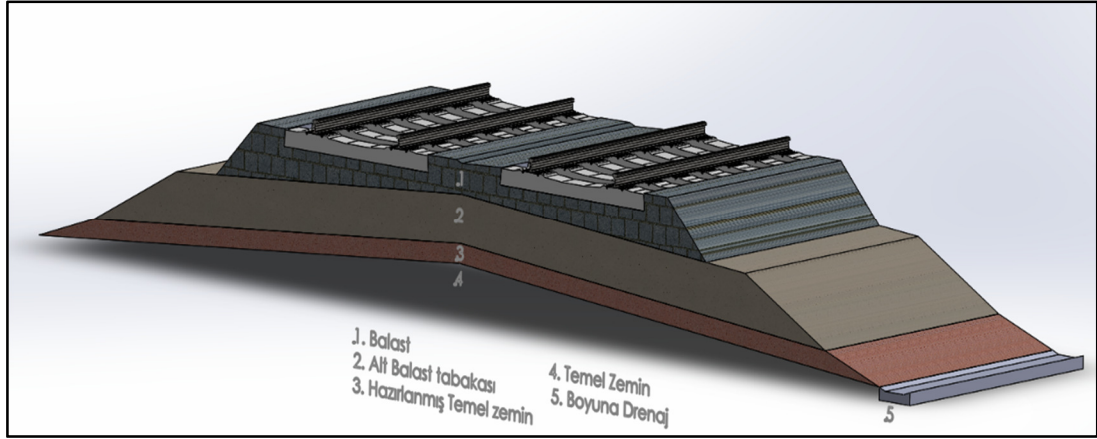
Belirtilen işlemler ile en düşük bakım giderleri ile en yüksek standartlarda işletmecilik gerçekleştirilebilir (Şekil 4.2, Şekil 4.3).

Demiryolu hat yatağı tasarımında belirleyici olan parametreler:

- Dingil basıncı
- Toplam katar yükü
- İşletme hızı
- Üst yapı malzemelerinin özellikleri
- Taban zeminin mühendislik özellikleri
- Bölgenin topografyası
- Hidrolik ve hidrojeolojik durum
- Mevsimsel özellikler (donma-çözünme)



Şekil 4.2. Demiryolu hat yapısı ve bileşenleri



Şekil 4.3. Demiryolu hat tabakaları

4.1. Yüksek Hızlı Demiryolu Hat Yatağı Katmanları

4.1.1. Balast tabakası

Ray ve travers ikilisinin altına ve içi ile yanlarına, iki kademe şeklinde döşenen çapları genellikle 20 – 70 mm arasında olan taş danelerden oluşturulan üstyapı elemanıdır. Üst yapı elemanı olmasına karşın, serilen ilk balast tabakası, yol yatağı tabakasının en üst katmanını oluşturur. Görevleri şunlardır:

- Taşıtların dinamik etkileri ve atmosferik etkiler altında yol çerçevesinin şekil ve yer değiştirmesine engel olmak
- Tekerlek, Ray, Travers tarafından iletilen yükleri karşılamak ve geniş bir yüzey boyunca alt tabakalara iletmek
- Yol çerçevesine elastik bir yatak görevi yaparak titreşimleri sönmölemek
- Yağış ile gelen yüzeysel suların drenajını sağlamak
- Yüksek hızlı demiryollarında kaliteli bir balast tabakasının oluşturulması için:
- Balast malzemesi olarak granit, bazalt gibi magmatik kökenli masif, su emmesi düşük ve yüksek yoğunluklu kayalar kullanılmalı.
- Balast malzemesinin kırılmasında baskı ile kırma yapan çeneli ve döner kırıcılar yerine, malzeme içinde gerilim ve mikro çatlaklar oluşturmayacak şoklu kırıcıların kullanılması gerekir.
- Malzeme dinamik kuvvetler altında harekete maruz kalacağından, birbirine sürtünme ile aşınması düşük olmalıdır.
- Hareket altında dağılmamaları için birbirlerine kenetlenecek köşeli yapıya sahip olmalı.

- Elastik yatak ve su drenaj görevleri için, dane çapları belirli bir gradasyonda olmalı.
- Yola döşenmeden önce ince ve yabancı malzemelerden temizlenmeli.

Yüksek hızlı demiryollarında dinamik yükler altında hareketli balast malzemesi birbirine sürterek aşınmakta ve oluşan tozlar yüksek hızlarda havalanmaktadır. Bu durum tren seti altında toz bulutlarının oluşmasına sebep olmaktadır. Ayrıca küçülen balast tanelerinin havalandığı görülmüştür. Bu durum tren setlerinde mekanik sıkıntılara yol açabilmektedir.

Ayrıca tünel gibi dar bölgelerde karşılıklı işletilen hatlarda meydana gelen toz bulutları görüş mesafesini etkilemektedir.

Toz oluşmasını engellemek için özel kimyasal bağlayıcılar kullanılabilir yada balast elemesi yapılması gerekir. Bu durum bakım maliyeti olarak karşımıza çıkar.

Günümüzde, yukarıda bahsedilen temin ve bakım sorunlarından dolayı çoğu ülkeler yatırım maliyeti yüksekte olsa balastsız beton yollar yapımına yönelmektedir.

4.1.2. Alt balast tabakası (subballast)

Balast ve dolgu arasında bulunan bir yol yatağı tabakasıdır. Doğadan elde edilmiş yada işlenmiş kum-çakıl karışımları, kırılmış doğal agregalar, özel gradasyon ve nemlilikte, plentte hazırlanarak, finişer yardımı ile homojen ve milimetrik olarak serilir. Demiryolu üst yapısı- altyapısı arasında geçiş malzemesi olan alt balast tabakası ile hassas bir şekilde istenen yol eğimi sağlanır. Alt balasttan beklenen görevler şunlardır:

- Rijitliği ayarlanarak, yolun taşıma kapasitesini arttırmak ve yukarıdan iletilen yüklerin, taban zemininde daha iyi dağılmasını sağlamak,
- Yolun dinamik performansının iyileştirilmesine katkıda bulunmak,
- Balast ve taban zemini arasında bir filtre görevi yapmak,
- Yolu erozyona ve dona karşı korumak,
- Yüzeysel sularını uzaklaştırmak.
- Balast – dolgu karışımını engelleyerek balast tabakasının aşındırıcı etkisinden korumak,

Yukarıdaki görevleri yerine getiren alt balast kullanılması ile demiryolu hat yatağı korunmuş olur ve altyapı bakım maliyetleri düşerek emniyetli ve konforlu işletmecilik sağlanır.

Dünyada demiryolu yapım çalışmalarında ülkeler, balast tabakasının altına farklı kalınlıklarda alt balast tabakası yerleştirmektedir. Ülkemizde 20 ila 30cm arasında alt balast kalınlığı uygulanmaktadır.

4.1.3. Dolgu tabakaları

Yüksek hızlı demiryollarında kullanılacak dolgu malzemesin yüksek nitelikli, iç sürtünme açısı yüksek, özel gradasyonlu, içerisinde yeteri kadar bağlayıcı malzemesi olan kaya dolgu malzemelerinin kullanılması önerilir.

Tekniğine uygun şekilde tabakalar halinde serme ve sıkıştırılması yapılan, yukarıda özellikleri belirtilmiş kaya dolgu malzemesi ile oluşturulmuş hat yataklarında, minimum düzeyde dolgu içi oturma sağlanırken sağlam ve uzun ömürlü bir demiryolu hat yatağı oluşturulmuş olur.

Donma - çözünme gibi atmosferik etkilere dayanıklı hat yatağı, dinamik ve statik yükler altında yayılmaya gösterdiği mukavemet ile bakım maliyetlerini önemli ölçüde azaltır.

Belirtilen efsaftaki kaya dolgular ile dolgularda ortaya çıkabilecek çökme, sıkışma ve şev stabilitesi sorunlarının önüne geçilebilir.

Kaya dolgu bulunamaması durumunda iri kum- çakıl malzemesi ile ince tabakalar halinde sıkıştırılarak yapılacak dolgular uzun ömürlü ve stabil olmaktadır.

Bunun dışında metamorfik, bozuşmuş, dağılabilen, su emmesi yüksek, atmosferik koşullara dayanıksız, organik malzemeler içeren malzemelerle dolgu yapılması, hat yatağının dinamik yükler altında yer değiştirmesine ve oturmalara sebep olacağından yüksek bakım maliyetleri doğurur.

4.1.3.1. Kullanılacak dolgu malzemelerinin özellikleri

Uluslararası demiryolu standartları olan UIC Code 719R, (2008) zemin malzeme sınıflamaları Tablo 4.1.'de belirtilmiştir.

Tablo 4.1. Zemin kalite geoteknik sınıflandırma

Zemin Tipi (Jeoteknik Sınıflandırma)	Zemin Kalite Sınıfı
0.1 Yüksek organik zeminler 0.2 Yüksek nem içeriğine sahip, sıkıştırmaya uygun olmayan %15'den daha fazla ince daneye ¹ sahip yumuşak zeminler 0.3 Thixotropik zeminler ² (örnek quick-kil) 0.4 Çözünabilir malzeme içeren zeminler (örnek kaya tuzu, gypsum) 0.5 Kirletilmiş zemin (örnek endüstriyel atık) 0.6 Orta organik zeminler ² 0.7 % 15 den daha fazla ince daneye sahip büzülebilen ³ veya şişebilen ⁴ yüksek plastisiteli zeminler	QS0
1.1 %40'dan daha fazla ince dane' içeren zeminler (0.2 veya 0.7 başlığı altında sınıflandırılan zeminler haricinde) 1.2 Bozuşmaya çok duyarlı kayalar Örnek - $pd < 1,7 t/m^3$ ve yüksek gevrekliğe sahip tebeşir -Marn -Bozuşmuş şist	QS1
1.3 % 15-40 ince dane ¹ içeren zeminler (0.2 veya 0.7 başlığı altında sınıflandırılan zeminler haricinde) 1.4 Bozuşmaya orta derecede duyarlı kayalar Örnek - $pd < 1,7 t/m^3$ ve düşük gevrekliğe sahip tebeşir - Bozuşmamış şist 1.5 Yumuşak Kaya - Mikrodeval yaş (MDE) > 40 - Los Angeles (LA) > 40	QS1 ⁵
2.1 %5-15 ince dane içeren zeminler ¹ . büztişebilen zeminler ³ hariç 2.2 %5'den daha az ince dane içeren uniform zemin ¹ (Cu < 6) büztişebilen zeminler'' hariç 2.3 Orta derecede sert kaya Örnek $25 < MDE < 40$ ve $30 < LA < 40$	QS2 ⁶
3.1 %5'den daha az ince dane ¹ içeren iyi danelenmiş zeminler 3.2 Sert kaya Örnek' $MDE < 25$ ve $LA < 30$	QS3

¹ Bu yüzdeler 60 mm elekten geçen malzemede yapılan dane boyu dağılım analizinden hesaplanır. Burada belirtilen yüzdeler yuvarlanmıştır. (Tecrübeler, bir demiryolundan diğerine küçük farklılıklar göstermektedir.); Eğer temsil edici sayıda yeterli numune alınmış ise %5'e kadar artırılabilir.

² Bazı demiryolları bu zeminleri QS1 kalite sınıfına almaktadır

³ Örselenmemiş numune veya 0,2 Mpa normal basınçla Standart Proctor yoğunluğuyla kalıplanmış numuneler için büzüşme oturması % 1 den daha büyük.

⁴ Örselenmemiş veya standart Proctor yoğunlukla kalıplanmış numuneler için serbest şişme % 3 den fazla ⁵ Eğer Hidro-jeolojik ve hidrolojik koşullar iyi ise bu zeminler QS2 sınıfı altına alınabilir

⁶ Eğer Hidro-jeolojik ve hidrolojik koşullar iyi ise bu zeminler QS3 sınıfı altına alınabilir

4.1.3.2. Dolgu yapım yöntemi

Projelendirme aşamasında:

- Yapılacak doğu malzemeleri ve dolgu yüksekliğine göre Şev tasarımı yapılmalı
- Dolgu yüksekliği metreyi geçmemeli geçmesi durumunda viyadük imalatı yapılmalı
- Bölgelerin yağış eğrileri ile hidrolik hesapları yapıp özellikle derin vadi geçişlerinde sel geliri riski dolayısıyla dolguya zarar verme olasılığı söz konusu ise yine viyadük geçişleri tasarlanmalı.
- Dolgu boyunca taşıt geçitleri, hayvan geçişleri, hidrolik menfezler, elektrik doğalgaz su hattı geçişleri için alt ve üst geçit planlaması yapılmalı

Yapım aşamasında:

- Gradasyon ayarı ile yeterince bağlayıcı boyutta malzeme ile uygun karıştırmaya yapılan malzeme sahaya sevk edilmeli
- Kullanılacak malzemenin özelliklerine göre serme kalınlığı belirlenmeli
- Uygun makine, uygun titreşim ve ağırlıkla sıkıştırılmalı
- Her kademedeki sulama ile dolgunun yapılması malzeme yerleşimini hızlandırır.

4.1.3.3. Dolguların sıkıştırılması

Bir dolgunun kendi içerisinde oturmasının tamamlanması yaklaşık 2-3 yılı almaktadır. Kısıtlı proje süreleri göz önüne alındığında uygulanan yöntem genellikle mekanik araçlarla dolgu tabakalarının sıkıştırılması şeklindedir.

Demiryolu hat yapılarında, dingil yüklerinin frenaj (frenleme) ve demeraj (ivmelenme) durumlarında sebep olduğu hareketlenmenin (çökme ya da şişme) belirli bir minimum değere indirilmesi gerekmektedir. Böylece dingil basıncından doğan yüklere karşı daha büyük bir dayanım elde edilmiş olunur.

Bu nedenle demiryolu hat yatağı için yapılacak dolgunun, kullanılacak malzeme özellikleri de dikkate alınarak ince tabakalar halinde serilip sıkıştırılması gerekmektedir.

Kullanılan malzeme gradasyonu iyi ayarlanarak 20 – 30 cm civarında dolgu tabakaları oluşturulmalıdır.

Her tabakada sulama ile malzemenin yerleşmesi sağlanırken, silindir ile en az 4-5 pas vibrasyonlu sıkıştırma ile tabaka sağlam bir şekilde oluşturulmuş olur.

4.1.3.4. Dolgularda oturmalar ve ölçüm yöntemi

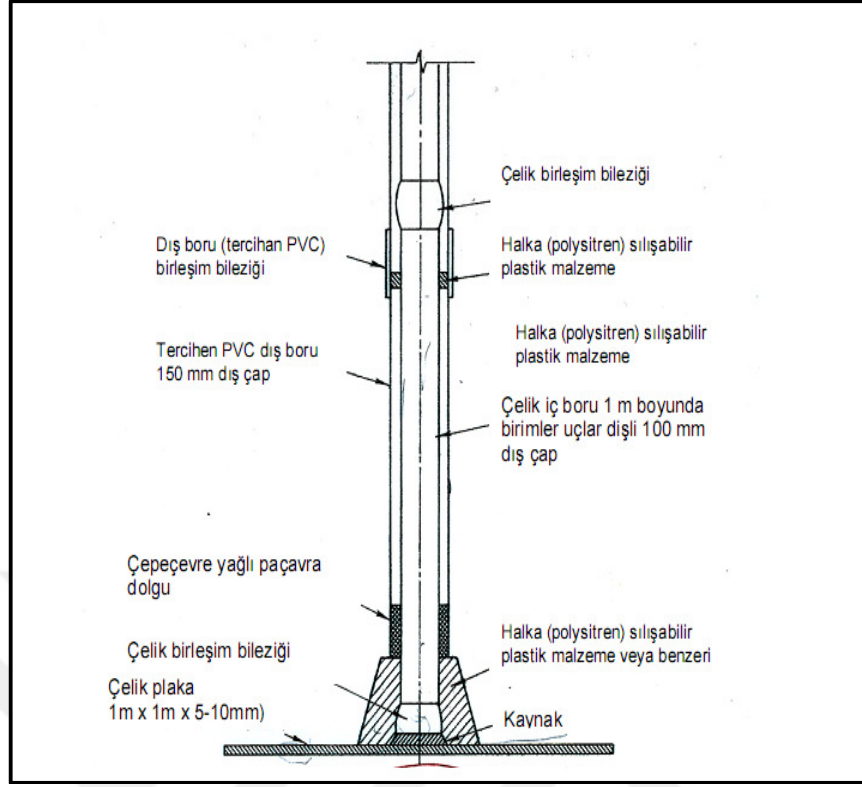
Dolgu içerisindeki oturmaların en aza indirilmesi için kullanılacak dolgu malzemesinin özellikleri yukarıda belirtilmiştir. Bununla birlikte oturma analizlerinde dolgu gövdesindeki ve temel zeminindeki oturmalar bir arada hesaplanmalıdır.

Dolgu altı zeminde oluşabilecek oturmaların önlenmesi için yapılabilecek zemin iyileştirme yöntemleri önceki bölümlerde ayrıntılı anlatılmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken husus uluslararası standartlarda dolgu içi ve taban zemindeki müsadde edilebilecek oturma miktarlarına göre hesap ve zemin iyileştirilmesi yapılmasıdır.

Toleranslar dahilindeki hesaplamalar ile optimum zemin iyileştirmesi yapılarak gereksiz maliyetten kaçınılmalıdır.

Oturma – zaman ilişkileri laboratuvar deneylerinden elde edilecek konsolidasyon katsayıları kullanılarak tahmini olarak belirlenebilir. Zaman içerisindeki oturmaların tamamlanması için proje –süre yönetimi ve teknik açıdan dolgu bölgelerinde öncelikle imalatlara başlanması avantaj sağlar (Şekil 4.4).

Tabakalar halinde kademeli inşaat yöntemi ile yapılan dolgularda, tabandan itibaren güzergah boyunca belli mesafelerde yerleştirilen oturma plakaları düzenekleri ile yapılan dolguların oturma zamana bağlı oturma grafikleri elde edilir.



Şekil 4.4. Oturma plakası bileşenleri

4.1.3.5. Dolgu şevi ve şev eğimi

Bir yarmada ya da dolguda, platform kenarı ile doğal zemin arasındaki eğik yüzeye “şev” denir.

Dolgularda malzeme olarak iç sürtünme açısı yüksek kaya malzemelerin kullanılması durumunda dolgu şev eğimleri yüksek tutulabilir. Böylece taban alanı daralmış olur. Arazi, kamulaştırma, zemin iyileştirme ve dolgu malzemesi miktarında önemli düşüşler sağlanmış olur.

Özellikle zayıf zeminden oluşan yarma şevleri sürekli bakım gerektirmekte ve tehlikeye sebep olmaktadır. Bu sebeple uygun yöntemle kaplanmaları uzun yıllar boyunca bakım gerektirmeyecek şekilde getirilmesi için önemlidir.

Dolgu akmalarının önüne geçilmesi için kullanılacak dolgu malzemesinin özellikleri önemlidir. İç sürtünme açısı yüksek, birbirine kenetlenen kaya dolgu malzemesi ile yapılan dolgular, uygun şev açısında kaplama gerektirmez iken, farklı malzemelerde dolgu şevlerindeki akmayı engellemek için koruma yapıları kaçınılmaz olur.

Şev korumaları için, betonarme ve taş kaplama , gabyon, geosentetik malzemeler ilekaplama, bitkisel kaplama gibi koruma yapıları oluşturulabilir (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Demiryolu sandık yarmasının gabyonlar ile kaplanmış hali

4.1.4. Taban zemini

Taban zemini, demiryolu hat yatağı tabakasının en önemli bileşeni olarak karşımıza çıkmaktadır.

Demiryolu hattının üstyapısını ve altyapısını oluşturan bileşenler ne kadar iyi olursa olsun, hattın üzerine inşa edildiği taban zeminin taşıma kapasitesi yeterli değilse diğer kalemlerin hiçbir önemi kalmaz.

4.1.4.1. Taban zemininin geoteknik olarak sınıflandırılması

Taban zemini UIC Code 719R'e (1994) ayrıntılı olarak ele alınmış ve sınıflamaları yapılmıştır (Tablo 4.2). Taban zeminin sınıflandırılması için şunlar gerekir:

- Taban zeminin oluşturan her bir zemin tipinin kalitesinin belirlenmesi,
- Tüm taban zemininin (hazırlanmış taban zemini ve mevcut taban zeminin) taşıma
- Kapasitelerinin belirlenmesi.

Tablo 4.2. Zemin kalite sınıfları (UIC Code 719R, 2008)

Kalite Sınıfı	Tanımlama
	Uygun olmayan zeminler:
QS0	Bu zeminlerle iyi bir altyapı oluşturulamaz, bu nedenle iyileştirilmeleri gerekir (belirli bir derinliğe kadar daha kaliteli bir zeminle değiştirmek, bağlayıcı malzemelerle stabilizasyon, geotekstil kullanmak, kazıklarla kuvvetlendirmek vb.). Bu nedenlerle, yol yatağı tabakalarının boyutlandırılmasında bu zemin türleri kullanılmamıştır.
	Zayıf zeminler:
QS1	Bunlar “iyi bir drenajın sağlanması” ve “iyi düzeyde bir bakım uygulanması” koşullarıyla, doğal halleriyle kullanılabilirler. Bunlar için uygun yöntemlerle (örn. Bağlayıcı katkısı ile stabilizasyon) kalite artırımı da düşünülebilir.
QS2	Orta düzeydeki zeminler
QS3	İyi zeminler

Taban Zemini İçin Taşıma Kapasitesi Sınıfları:

UIC Code 719R'e (1994) göre, taban zemininin taşıma kapasitesi şu faktörlere bağlıdır:

- Dolgu ya da yarma taban zemininin kalite sınıfına,
- Varsa, iyileştirilmiş taban zemini kalitesi ve tabaka kalınlığıdır.

Bu sayılan faktörlere göre, üç taşıma kapasitesi sınıfı söz konusu olmaktadır:

- P1: Zayıf taban zemini
- P2: Orta taban zemini
- P3: İyi taban zemini

4.1.4.2. Taban zeminin iyileştirilmesi ve korunması

Demiryolu hattının stabilitesi, demiryolu hat yatağı ve taban zeminin stabilitesine bağlıdır. Taban zeminin stabilitesinin sağlanması için, zayıf zeminlerden oluşuyor ise iyileştirilmesi ve yapımdan sonra koruma tedbirlerinin alınması gerekmektedir.

Zemin iyileştirme yöntemleri bölüm 3.8. de ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Koruma yapıları ise genel olarak atmosferik şartlardan özellikle su hareketlerinden koruma şeklindedir ve aşağıda drenaj başlığı altında incelenmiştir.

4.1.5. Drenaj

Bir demiryolu hattının yapımı kadar yapımdan sonra hattın korunması önemlidir. Demiryolu hattını etkileyen atmosferik koşulların en önemlisi su mevcudiyetidir.

Suyun etkisi yüzeysel akış, yeraltı suyu ve donma çözünme etkisi olarak demiryolu hat yatağının stabilitesinde etki etmektedir.

Drenajının yetersiz olması, demiryolu hat yatağının olumsuz etkilenmesine ve stabilite problemlerine sebep olmakla beraber hat ömrünün kısılmasına sebep olur. Demiryolu hat yapısı tabakalarında bulunan serbest su, aşırı hat oturmalarına ve balast ile taban zemininde bulunan ince daneli malzemenin bir çamurlaşmasına neden olur.

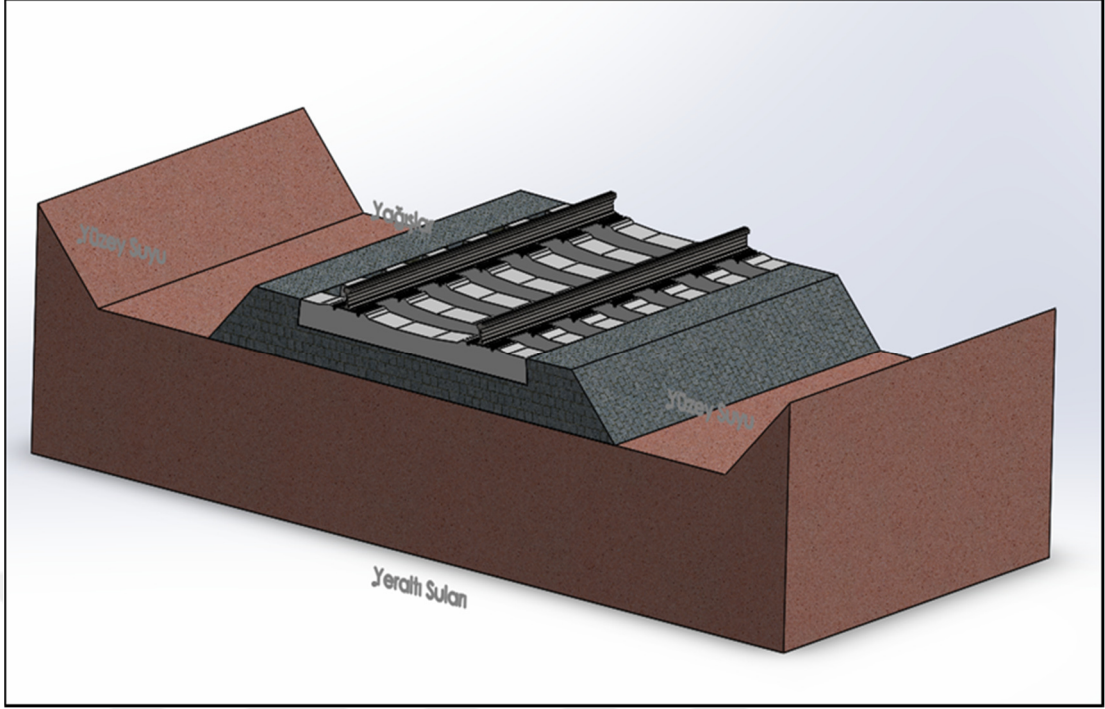
Yarma ve dolgu şevlerinde drenaj yapılarının eksikliği şev stabiliteelerini etkilemekte akma ve kopmalara sebep olabilmektedir.

Bir demiryolu hat yatağın suya maruz kalması yüzeysel yağış, dereyatığı ve drenaj kanalı taşkınları ve yüksek yeraltı su seviyesi sebebiyle meydana gelmektedir.

Demiryolu hat yatağının korunması ve hattan uzun süreli hizmet alabilmek için bu kaynaklardan hat yatağına gelebilecek suyun uygun drenaj sistemleri oluşturularak tahliyesi sağlanmalıdır (Şekil 4.6).

4.1.5.1. Yeraltı suyunun drenajı

Doğal yüzey olan siyah kot ile ray üst kotu olan kırmızı kotun arasındaki mesafenin düşük olduğu yerlerde, ova geçişlerinde, derin sandık yarma geçişlerinde, yeraltı suyu demiryolu hat yatağını tehdit edebilir. Bu durumda hattın her iki tarafına yada kotun düşük olduğu tek tarafa derin drenaj kanalları açılıp drenfleks ve granül malzeler ile su akış yolu hazırlanarak hat yatağı korunmalıdır.



Şekil 4.6. Altyapıya nüfuz eden suyun kaynakları

Maalesef yer üstü drenaj sistemlerine verilen önem kadar yeraltı suyu drenaj sistemlerine projelendirme ve yapım esnasında gereken önem verilmemektedir. Unutulmamalıdır ki yapım kadar koruma yapıları da önemlidir ve yapının ömrünü çok düşük maliyetlerle çok fazla uzabilmek mümkün olabilmektedir.

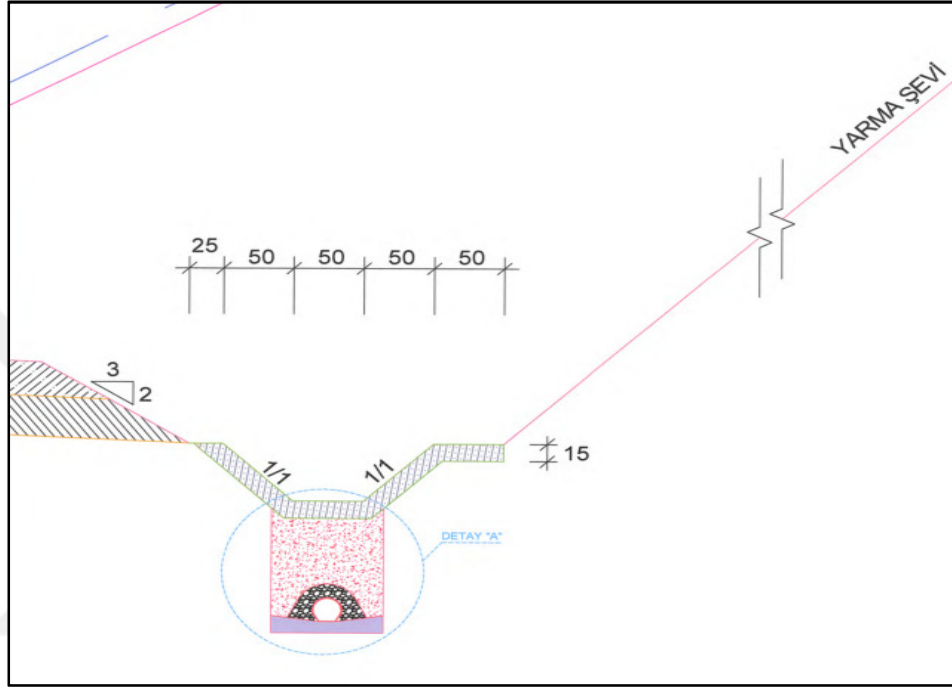
Bu sebeple projelendirme safhasında demiryolu hattı boyunca yeraltı su seviyeleri mevsimsel durumlara göre belirlenerek, gerekli drenaj ve koruma yapılarının yapılmasından kaçınılmamalıdır.

4.1.5.2. Yüzeysel suların drenajı

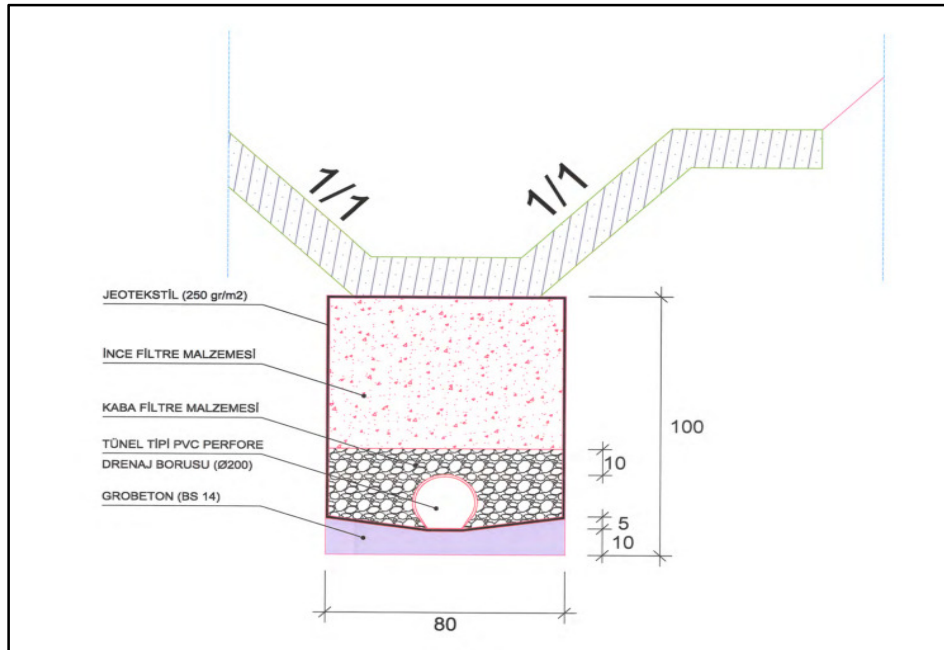
Demiryolu hat yapısını etkilemesi muhtemel yağış sularının hızlı bir şekilde uzaklaştırılmasının sağlanması için:

- Projelendirme aşamasında bölgenin yağış potansiyelinin belirlenmesi ve drenaj sistemi tasarımının emniyetli tarafta çözülmesi gereklidir.
- Yapım aşamasında ise demiryolu hattı boyunca tünel portalları, yarma şev başı ve şev dibi, dolgu şev dibi drenaj hendeklerinin yeterli debiyi karşılayacak hacimde ve sürekliliği sağlanmış biçimde oluşturulması,

- Doğu altı ve vadi geçişlerinde uygun alan sağlayan hidrolik menfezlerin yapılması ve bunların akar kotlarının drenaj bağlantılarını sağlayacak biçimde oluşturulması gerekmektedir.
- Demiryolu hat yatağını korumakla görevli sub balast tabakasının drenaj amaçlı eğimi oluşturulmalıdır (Şekil 4.7- Şekil 4.10).



Şekil 4.7. Yüzeysel ve derin drenaj yapıları



Şekil 4.8. Derin drenaj yapısının en kesiti



Şekil 4.9. Yüzey drenaj kanalları



Şekil 4.10. Dolgu altı taban drenaj uygulaması

4.2. Demiryolu Hat Yatağının Etkileri

Yüksek hızlı demiryolları, yüksek bütçeli yatırımlar ile yapılabilmektedir. Bu sebeple birim maliyet oranının düşürülmesi için hattın maksimum fayda sağlanması beklenir. Yani 24 saatlik zaman diliminde hattın maksimum miktarda işletmeye açık olma süresi tamir ve bakım süreleri dışında kalan süredir.

+ - 2mm tolerans dahilinde çalışabilen çok hassas bir sistemin sürekliliği ise devamlı kontrol ve tamir bakım gerektirmektedir.

Hızlı tren işletmeciliğinde uygulanan sinyalizasyon sistemleri ile günümüzde 4 dakika takip süresi ile aynı hat üzerinde bir noktadan saatte 15 tren sevki yapılabilmektedir.

Böylece demiryolu hattının bir noktası saatte 15 kez dinamik etkilere maruz kalabilmektedir. Yüksek hızlarda emniyet ve konforun sağlanabilmesi yukarıda belirtilen etkiler altında sürekli hareketli bir yapıya sahip demiryolunun sürekli takibi ve bakımı söz konusu olmaktadır.

Demiryolu hattının maksimum açık kalma süresinin temini için en az bakım gerektirecek sistemin oluşturulması gerektiği ortaya çıkmaktadır. Bunun için ise demiryolu hat yatağının yüksek vasıflara uygun inşası gerekmektedir.

Demiryolu hat yatağının özellikleri işletmecilik açısından hat performansı (hız – konfor – kapasite) ve bakım maliyetlerine direkt olarak etki eder.

4.2.1. Hat performansına etkisi

Hız: Emniyetli ve konforlu bir ulaştırma için demiryolu hat özellikleri, istenilen hızlara göre değişiklik gösterir. Belirlenen hızlara göre tasarım kriterleri değişir. Maksimum eğim, minimum kurp yarı çapı ve deyer hesapları hattın maksimum işletmecilik hızlarına göre belirlenir.

Hat yatağından oturma- kayma gibi etkenler işletmecilik hızını direkt olarak etkiler ve hız düşümü olarak karşımıza çıkar.

Konfor ve emniyet: Hat yatağından kaynaklanan stabilite sorunları, yolculuk konfor ve emniyetinin düşmesine sebep olur.

Kapasite: Hat yatađı problemlerinden dolayı hız dūřümü ve bakım sūrelerini uzaması hat kapasitesini dūřürür.

4.2.2. Bakım ve maliyete etkisi

Yüksek hızlı demiryolu hat yatağındaki stabilite sorunları, raylarda kalıcı oturmalar, üst yapı elemanlarında aşınma ve bozunma, balast yatağının kalınlaşması ve dağılması gibi problemler doğurur.

Yüksek hızlı demiryolu hat kontrol ve bakımları ise özel alet ekipman ve makine grubu gerektirmektedir. Bu durumda yüksek bakım giderleri olarak karşımıza çıkmaktadır. Aynı zamanda hat kapasitesinin dūřmesi birim sefer başına maliyet oranını arttırmaktadır.

5. YAKLAŞIM DOLGU MODELLERİ

Yaklaşım dolgu modelleri sanat yapıları ve zemin çalışmaları arasındaki geçişleri kapsar.

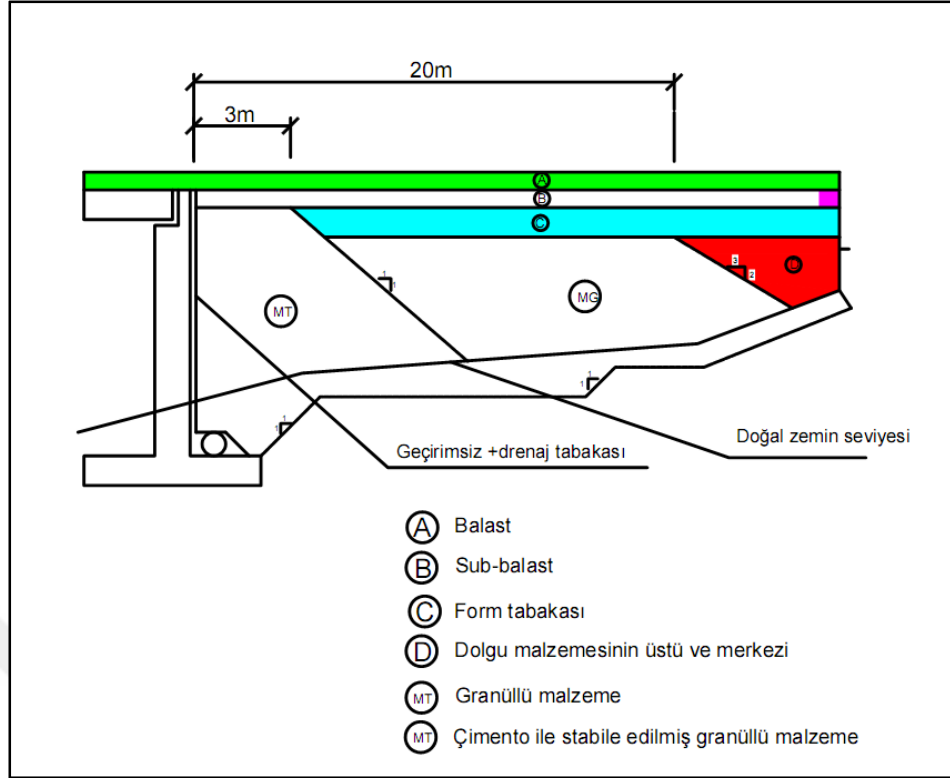
Zemin çalışmaları ve sanat yapıları arasındaki geçişlerde farklı oturmaları azaltmak ve emniyetli, konforlu, sarsıntısız bir geçiş sağlamak için uygun yaklaşım dolgu modeline karar verilmesi gerekmektedir.

- Geçiş zonunun yani yaklaşım dolgu modelinin belirlenmesinde aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır.
- Yapı kenar ayak tipi (açık, kapalı, alt geçiş, menfez, kazıklı vs.)
- İnşa süreci
- Hattın maksimum işletme hızı
- Dolgu yüksekliği
- Ayrıştırılmış izin verilebilir oturma miktarı: temel zeminin, geri dolgunun ve yapının uzun dönemli oturması, demiryolu hattının izin verilebilir diferansiyel oturmasına uymalıdır.

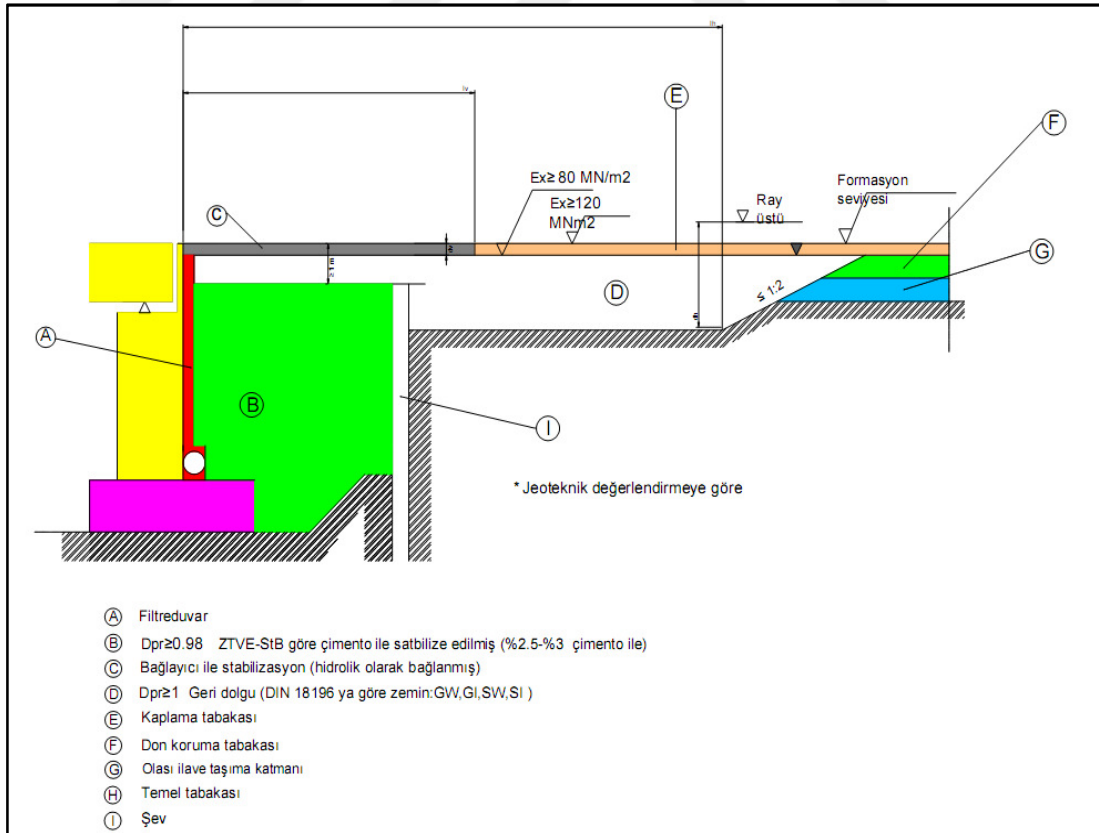
Aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır:

- Özellikle yapı yakınında ve açık kenar ayaklarında sıkıştırma çalışmaları özenli yapılmalı.
- Seçilmiş sıkıştırılabilir geri dolgu malzemesi kullanılmalıdır. Yapı yakınında malzemeyi geliştirmek amacıyla bir çimento yüzdesi kullanılabilir.

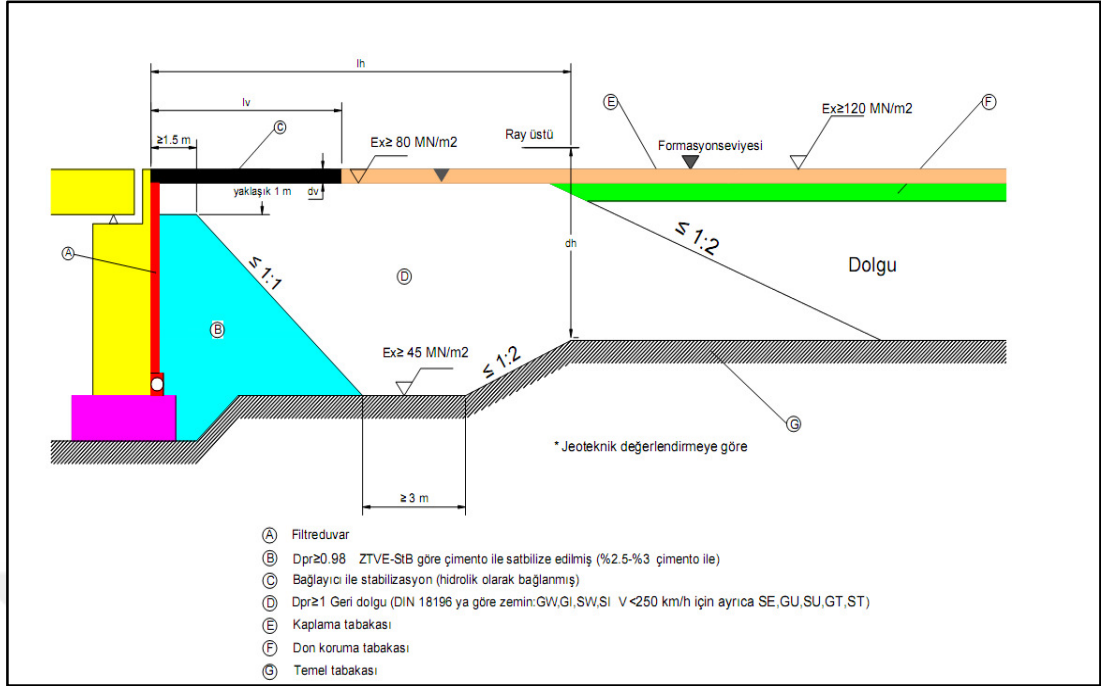
Şekil 5.1 ile Şekil 5.5 arasında çeşitli ülkeler tarafından geliştirilmiş demiryolu yaklaşım dolgu modelleri şematik olarak gösterilmiştir.



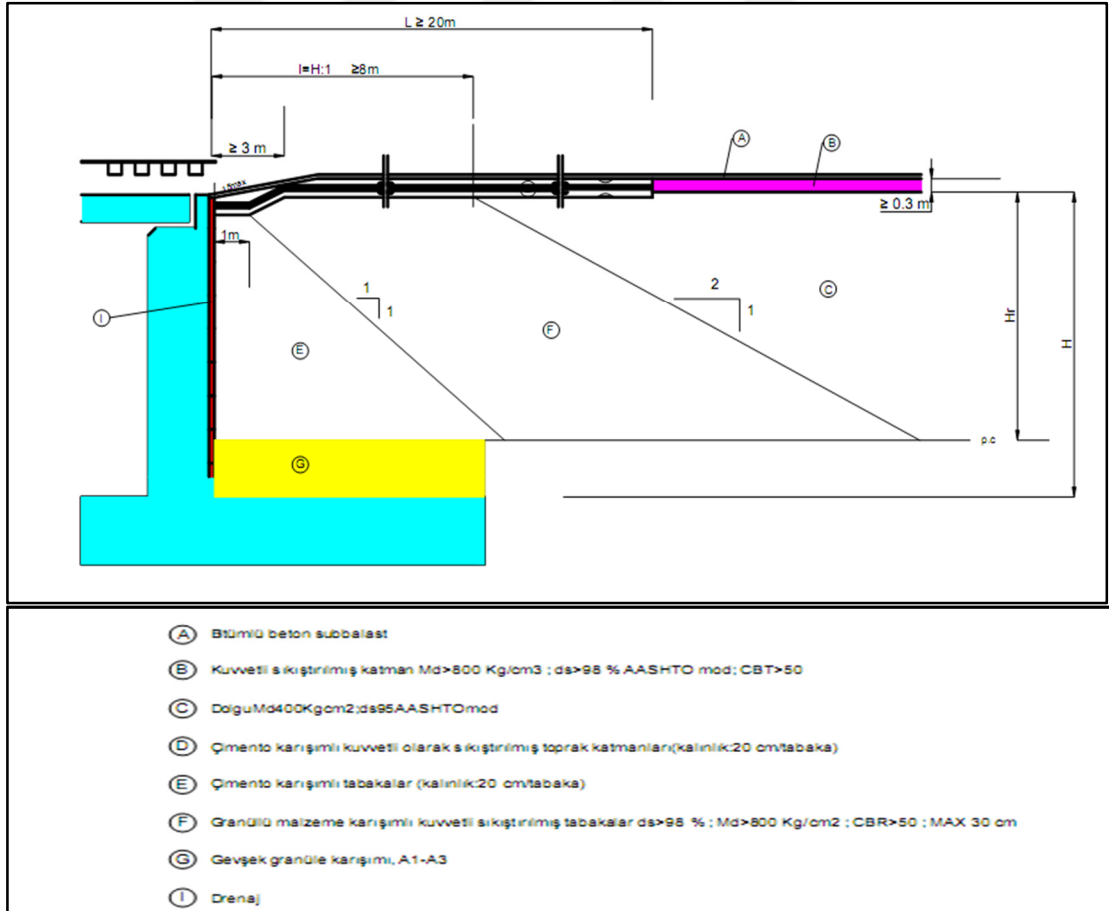
Şekil 5.1. ADIF (İSPANYA) - Yaklaşım Dolgu Modeli



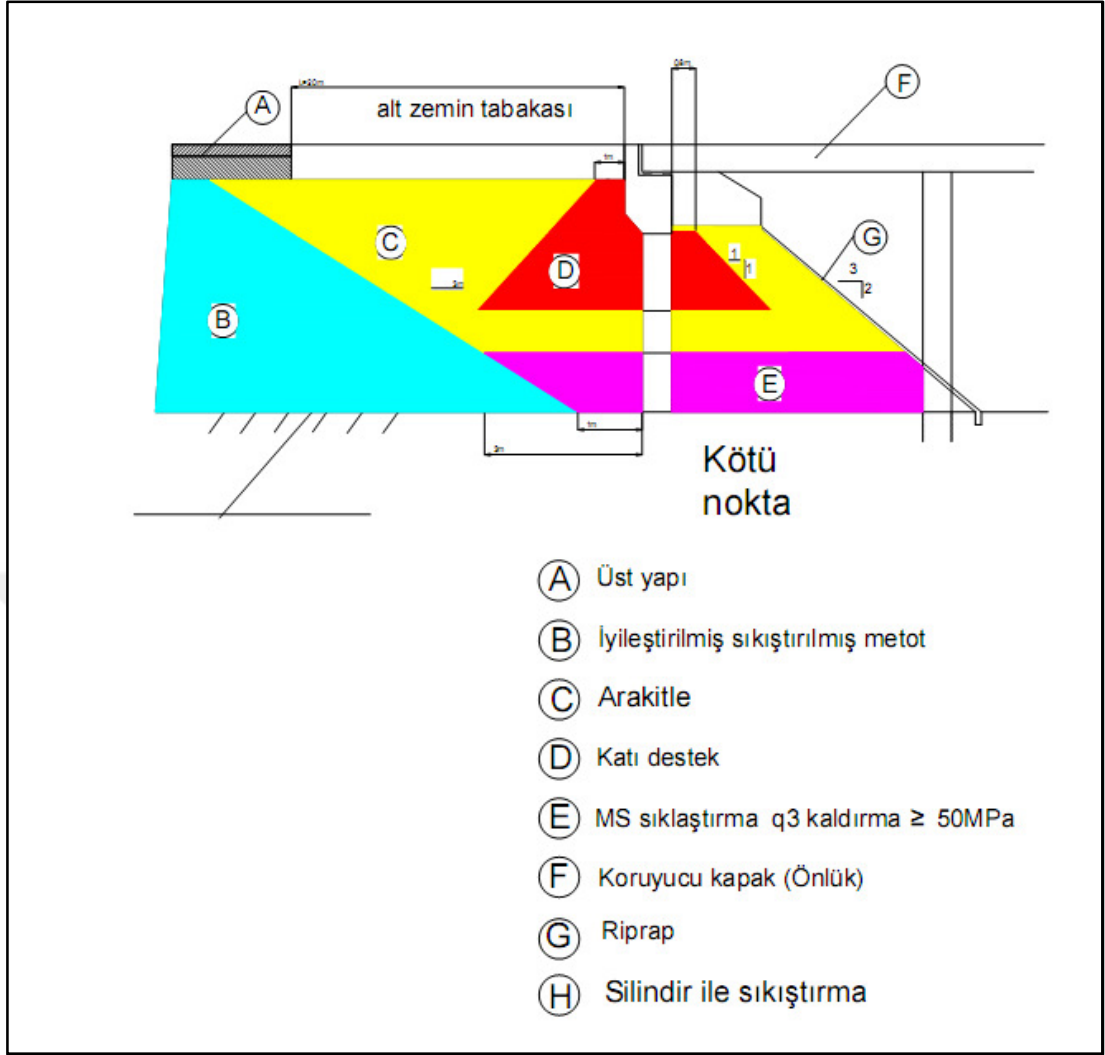
Şekil 5.2. DB (Almanya) Yaklaşım Dolgu Modeli



Şekil 5.3. DB (Almanya)- 2 Yaklaşım Dolgu Modeli



Şekil 5.4. RFI (İTALYA) Yaklaşım Dolgu Modeli



Şekil 5.5. SNCF(FRANSA) Yaklaşım Dolgu Modeli

5.1. Proje Bölgesinde Uygulanan Yüksek Hızlı Demiryolu Yaklaşım Dolgu Modelleri Ve Yapım Aşamaları

Proje bölgesi olan Eskişehir - İstanbul illeri arasında yüksek hızlı demiryolları yapımında uygulanan yaklaşım dolgu modelleri şunlardır:

- Köprü yaklaşım dolgusu,
- Altgeçit / Menfez Yaklaşım Dolgusu,
- Köprü yaklaşım dolgusu (Zemine gömülü)
- Altgeçit / Menfez Yaklaşım Dolgusu (Zemine gömülü)

olmak üzere dört tip yaklaşım dolgusunu içermektedir.

Ayrıca;

- Tünel-Tünel geçiş plakları
- Tünel-Viyadük geçiş plakları

kısa mesafe geçişlerinde rijit sistemin sürekliliğini sağlamak için geçiş plakları şeklinde imalatları yapılmaktadır.

Aşağıda imalatı yapılan yaklaşım dolgu modellerinin ve geçiş plaklarının boy kesitleri ve uygulama aşamaları ayrıntılı olarak ele alınmıştır.

5.1.1. Köprü yaklaşım dolgusu modelleri

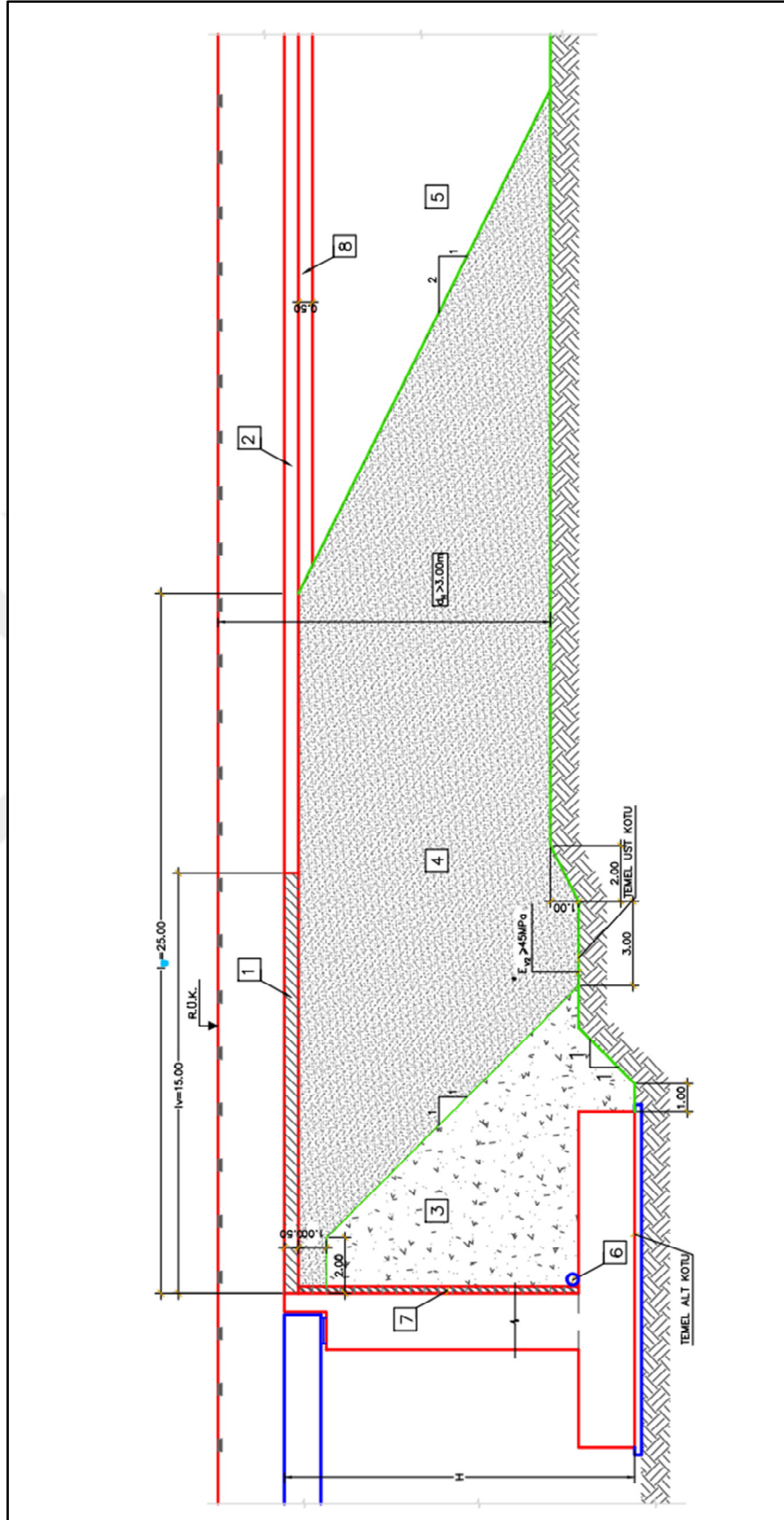
Köprü yaklaşım dolgusu modelleri, doğal zemin üzeri ve dolguda uygulama olmak üzere 2 model şeklinde tasarlanmıştır.

5.1.1.1. Köprü yaklaşım dolgusu modeli (doğal zemin üstü)

Aşağıdaki şekil üzerinde kodlanmış birimler şunlardır:

1. Alt balast (asfalt katkılı)
2. Alt balast ($e_v2 > 120\text{mpa}$)
3. Çimento stabilizasyonlu dolgu ($d_r > 0,80$; %2,50-3,00 çimento)
4. Özel dolgu ($D_r > 1,00$; $E > 80\text{Mpa}$) Maksimum dane çapı 100 mm, iyi derecelenmiş($C_u > 6$), ince malzemesi ($< 0,075\text{mm}$) %5'den az, Los Angeles aşınma kaybı %30'dan az olacak ve 30 cm'lik tabakalar halinde serilip sıkıştırıcaktır.
5. Güzergah dolgusu
6. Drenaj borusu ($\emptyset 200$ perfore boru)
7. Koruma duvarı (20cm)
8. Seçme malzeme ($e_v2 > 80\text{mpa}$)

Dolgu taban zemini deformasyon modülü $e_v2 < 45\text{mpa}$ 'dan daha küçük olması halinde taban zeminin iyileştirmesi yapılmalıdır. Yapılacak iyileştirmeye yöntemine zemin deneyleri yapılarak karar verilmelidir (Şekil 5.6.).



Şekil 5.6. Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri)

Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üstü) Yapım Aşamaları:

1. Temel üst kotuna 20 cm lik koruma duvarı ile çimento stabilizasyon dolgu tabanı arasında kalacak şekilde ϕ 200 perfore drenaj borusu yerleştirilmeli. (6)
2. 20 cm kalınlığındaki koruma duvarı Asfalt Katkılı Alt Balast tabakasının tabanına kadar oluşturulup, Bu duvarım oluşturulmasında tuğla kullanılmalı.(7)
3. Çimento stabilizasyonlu dolgu, ($Dr \geq 0,80$; %2,5 -3,0 çimentolu), Üstte, asfalt katkı alt balast tabakasının 1 metre altından, koruma duvarından 2 metre mesafede bitecek şekilde 1:1 şevle oluşturulacak formu sağlayacak yeterli mesafede tabanda başlatılmalı; İlâveten, temelin bitiminden itibaren de temel alt kotu ile temel üst kotu arasında en az 1 mt mesafede yine 1:1 şev oluşturulacak şekilde, temel üst kotuna kadar Çimento Stabilizasyonlu Dolgu malzemesi ile doldurulmalı (3). Sıkışmış tabakalar 30 santimetreyi aşmayacak ve sıkışmalar dolgu kesitlerinde Modifiye Prokto değerinin %80 ninden az, yarma kesitlerinde Modifiye Proktor değerinin %88 inden az olmamalı.
4. Özel dolgu-seçme malzeme ($dr > 1; ev_2 > 80$ mpa): Bu malzemenin Maksimum Dane Çapı 100 mm, iyi derecelenmiş ($Cu > 6$), ince malzemesi (0,075mm) % 5 den az, Los Angeles Aşınma Kaybı %30 dan az olmalı ve sıkışmış kalınlığı 30 cm olacak şekilde serilip sıkıştırılmalı. Modifiye proktor değerine göre en az %95 sıkışma değeri alınmalı. Bu tabaka Dolgu üst Kotunda, Alt Balast (Asfalt Katkılı) ve Alt Balast ($Ev_2 > 12$ Mpa) malzeme alt kotunda olmak üzere Köprü Yaklaşım duvarından 25 mt mesafede olacak ve 2:1 şev oluşturacak şekilde dolgu tabanından başlatılmalı ve yapımı çimento Stabilizasyonlu temelle birleşim noktalarında eş zamanlı oluşturulmalıdır. Çimento Stabilizasyonlu Temel Tabakasının üstüne gelen kısımda Çimento Stabilizasyonlu Temel Tabakasını çatlamamasına özen gösterilecektir (5) ve bunun devamında Güzergah Dolgusuna geçilecektir (5 ve 8).
1. 5. Alt Balast (Asfalt Katkılı) tabaka Özel Dolgu Üzerine 50 cm sıkışmış kalınlıkta olmak üzere köprü üst kotunu sıfırlayacak şekilde Köprü Yaklaşım Duvarından 15 mt mesafeye kadar oluşturulmalı. En az %96 sıkışma değeri elde edilmeli.
5. Alt Balast ($Ev_2 > 120$ Mpa): Alt Balast (Asfalt Katkılı) bitiminden itibaren Özel Dolgu malzemesini ve bitiminde de Seçme Malzeme Dolgusunun ($Ev_2 > 80$

Mpa) üstünü kaplayacak şekilde 50 cm kalınlığında oluşturulmalı. % 100 sıkışma değeri elde edilmeli.

6. Dolgu Taban zemini Deformasyon Modülü kontrol edilecek değeri Ev2 küçük 45 Mpa Olması halinde taban zemin iyileştirilmesi yapılacaktır, yapılacak iyileştirmeye yerinde karar verilecektir (Şekil 5.7-Şekil 5.12).



Şekil 5.7. Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) Boy Görünüşü



Şekil 5.8. Resim: Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) En Görünüşü



Şekil 5.9. Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) Üstten Görünüş



Şekil 5.10. Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) kenar ayak görünüşü



Şekil 5.11. Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) kenar ayak görüntüsü



Şekil 5.12. Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üzeri) Kenar ayak Görünüşü

5.1.1.2. Köprü yaklaşım dolgusu modeli (doğal zemin altı)

Aşağıdaki şekil üzerinde kodlanmış birimler şunlardır:

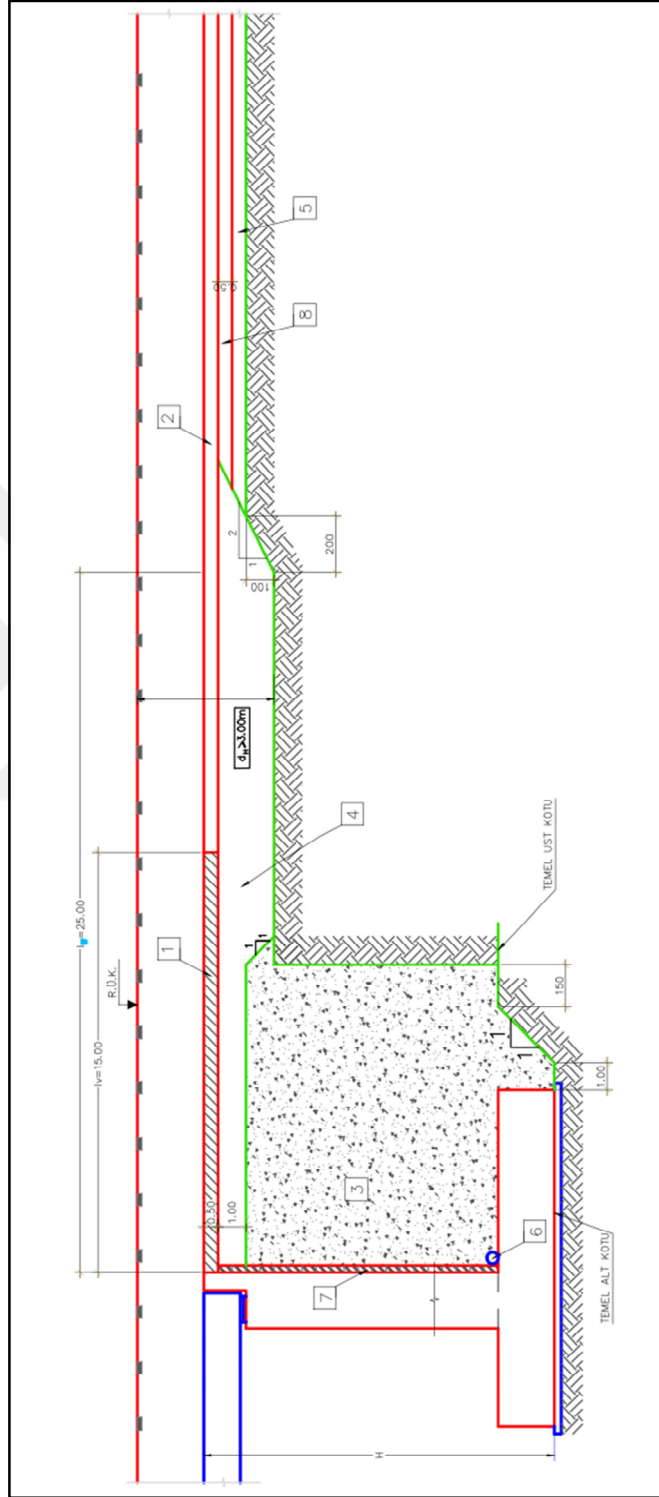
1. Alt balast (asfalt katkılı)
2. Alt balast ($ev_2 > 120\text{mpa}$)
3. çimento stabilizasyonlu dolgu ($dr > 0,80$; %2,50-3,00 çimento)
4. Özel dolgu ($Dr > 1,00$; $E > 80\text{ Mpa}$) Maksimum dane çapı 100 mm, iyi derecelenmiş($Cu > 6$), ince malzemesi ($< 0,075\text{mm}$) %5'den az, Los Angeles aşınma kaybı %30'dan az olacak ve 30cm'lik tabakalar halinde serilip sıkıştırıcıdır.
5. Güzergah dolgusu
6. Drenaj borusu ($\varnothing 200$ perfore boru)
7. Koruma duvarı (20cm)
8. Seçme malzeme ($ev_2 > 80\text{mpa}$)

Dolgu taban zemini deformasyon modülü $ev_2 < 45\text{mpa}$ 'dan daha küçük olması halinde taban zeminin iyileştirmesi yapılmalıdır. Yapılacak iyileştirmeye yöntemine zemin deneyleri yapılarak karar verilmelidir (Şekil 5.13).

Köprü Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Altı) Yapım Aşamaları:

1. Temel üst kotuna 20 cm lik koruma duvarı ile Çimento stabilizasyon dolgu tabanı arasında kalacak şekilde 200 perfore drenaj borusu yerleştirilir. (6)
2. 20 cm kalınlığındaki koruma duvarı Asfalt Katkılı: Alt Balast tabakasının tabanına kadar oluşturulmalı. Bu duvarın oluşturulmasında Tuğla kullanılır. (7).
3. Çimento Stabilizasyonlu Dolgu ($Dr > 0,80$; %2,5-3,0 çimentolu); Üstte, Asfalt Katkılı Alt Balast tabakasının 1mt altından Koruma Duvarından 2 mt mesafede bitecek şekilde 1:1 şevle Köprü Üst Kotundan 2,5 mt aşağıya kadar sıyrılan doğal zemin üzerine oturacak şekilde oluşturulmalıdır. Tabanda ise temelin bitiminden itibaren de temel alt kotu ile temel üst kotu arasında en az 1 mt mesafede yine 1:1 şev oluşturulacak şekilde temel üst kotuna Çimento Stabilizasyonlu Dolgu malzemesi ile doldurulmalı. İlaveten şev bitiminden sonra 1,5 mt mesafe kalacak şekilde düzenlenen kazı kesiti dik olarak Çimento Stabilizasyon Üst kotunu oluşturacak şekilde tamamlanmalı (3). Sıkışmış tabakalar 30 cm yi aşmayacak ve sıkışmalar dolgu kesitlerinde Modifiye Proktor

değerinin %80 ninden az, yarma kesitlerinde Modifiye Proktor değerinin %88 inden az olmamalıdır.



Şekil 5.13. Köprü Yaklaşım dolgusu (Doğal Zemin Altı)

4. Özel Dolgu Özel Dolgu-Seçme Malzeme ($DR > 1:Ev_2 > 80$ Mpa); Bu malzeme Maksimum Dane çapı 100 mm, iyi derecelenmiş ($Cu > 6$), ince malzemesi (0,075 mm) % 5 den az, Los Angeles Aşınma Kaybı %30 dan az olacak ve sıkışmış kalınlığı 30 cm olacak şekilde serilip sıkıştırılmalıdır. Modifiye proktor değerine göre en az %95 sıkışma değerinde edilmeli. Bu tabaka Dolgu Üst Kotunda, Alt Balast (Asfalt Katkılı) ve Alt Balast ($Ev_2 > 120$ Mpa) malzeme alt kotunda olmak üzere Köprü Yaklaşım duvarından 25 mt mesafede olmalı ve 2:1 şev oluşturacak şekilde seçme malzeme dolgusu ve Güzergah Dolgusunu örtmelidir. Özel Dolgunun yapımı, Çimento Stabilizasyon temelle birleşim noktalarında eş zamanlı oluşturulmalıdır. Çimento stabilizasyonlu temel tabakasının üstüne gelen kısımda çimento stabilizasyonlu temel tabakasının çatlamamasına özen gösterilmelidir.
5. Alt balast (Asfalt katkı) tabaka; özel dolgu üzerine 50 cm sıkışmış kalınlıkta olmak üzere köprü üst kotunu sıfırlayacak şekilde köprü yaklaşım duvarından 15 mt mesafeye kadar oluşturulur ve en az %96 sıkışma istenir.
6. Alt balast ($Ev_2 > 120$ Mpa), Alt Balast (Asfalt Katkılı) bitiminden itibaren Özel Dolgu malzemesini ve bitiminde de Seçme Malzeme Dolgusunun ($Ev_2 > 80$ Mpa) üstünü kaplayacak şekilde 50 cm kalınlığında oluşturulacaktır. En az % 100 sıkışma istenir.
7. Dolgu taban zemini Deformasyon Modülü kontrol edilecek değer $Ev_2 < 45$ Mpa olması: halinde taban zemini iyileştirilmesi yapılmalıdır (Şekil 5.15, Şekil 5.16).



Şekil 5.14. Köprü Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada)



Şekil 5.15. Köprü Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Altı (Yarmada)

5.1.2. Alt geçit / menfez yaklaşım dolgusu modelleri

Alt Geçit / Menfez yaklaşım dolgusu modelleri, doğal zemin üzeri ve dolguda uygulama olmak üzere 2 model şeklinde tasarlanmıştır.

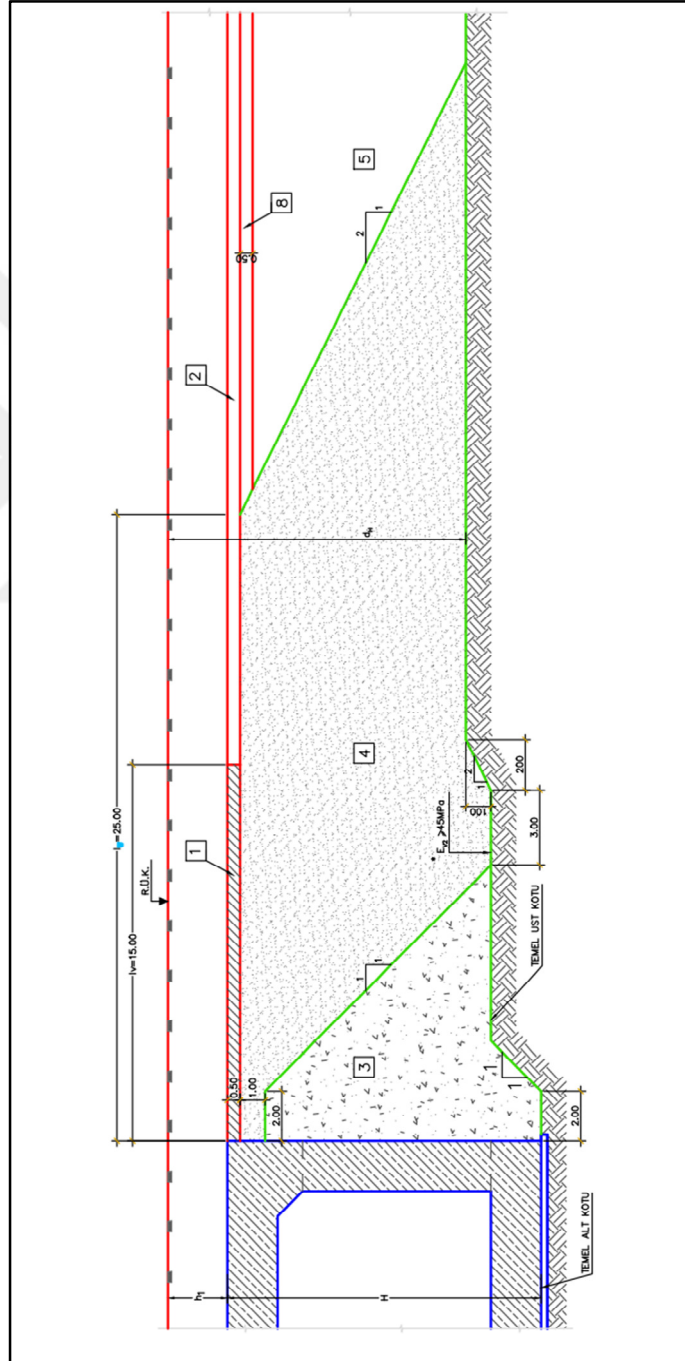
5.1.2.1. Alt geçit / menfez yaklaşım dolgusu modeli (doğal zemin üstü)

Aşağıdaki şekil üzerinde kodlanmış birimler şunlardır:

1. Alt balast (asfalt katkılı)
2. Alt balast ($ev_2 > 120\text{mpa}$)
3. Çimento stabilizasyonlu dolgu ($dr > 0,80$; %2,50-3,00 çimento)
4. Özel dolgu ($Dr > 1,00$; $E > 80\text{Mpa}$) Maksimum dane çapı 100mm, iyi derecelenmiş ($Cu > 6$), ince malzemesi ($< 0,075\text{ mm}$) % 5'den az, Los Angeles aşınma kaybı % 30'dan az olacak ve 30 cm'lik tabakalar halinde serilip sıkıştırıcaktır.
5. Güzergah dolgusu
6. Drenaj borusu ($\varnothing 200$ perfore boru)

7. Koruma duvarı (20 cm)
8. Seçme malzeme ($e_v > 80$ mpa)

Dolgu taban zemini deformasyon modülü $e_{v2} < 45$ mpa'dan daha küçük olması halinde taban zeminin iyileştirilmesi yapılmalıdır. Yapılacak iyileştirmeye yöntemine zemin deneyleri yapılarak karar verilmelidir (Şekil 5.16).



Şekil 5.16. Altgeçit / Menfez Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üstü)

Altgeçit/Menfez Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Üstü) Yapım Aşamaları:

1. Çimento Stabilizasyonlu Dolgu (Drz 0,80 ; %2,5-3,0 çimentolu): Üstte, Asfalt Katkılı Alt Balast tabakasının 1 mt altında yapı duvarından 2 mt mesafede bitecek şekilde 1:1 şevle oluşturulacak formu sağlayacak yeterli mesafede tabanda başlatılacak, ilaveten temel alt kotu ile temel üst kotu (Temel Üst Kotuna göre yapı yan duvarından 15 mt mesafede 2:1 şevle oluşturulan Tabi Zemin Kotu) arasında en az 2 mt mesafede yine 1:1 sev oluşturulacak şekilde Temel Üst Kotuna kadar çimento Stabilizasyonlu Dolgu Malzeme ile doldurulmalı (3). Sıkışmış tabakalar 30 cm yi aşmayacak ve sıkışmalar dolgu kesitlerinde Modifiye Proktor değerinin %80 ninden az, yarma kesitlerinde Modifiye Proktor degerinin %88 inden az olmamalı.
2. Özel Dolgu Özel Dolgu-Seçme Malzeme ($DR>1;Ev2>80$ Mpa); Bu malzemeninMaksimum Dane Çapı 100 mm,iyi derecelenmiş ($Cu>6$), ince malzemesi (0,075 mm) %5 den az, Los Angeles Aşınma Kaybı %30 dan az olacak ve sıkışmış kalınlığı 30 cm olacak şekilde serilip sıkıştırılmalı. Modifiye proktor değerine göre en az %95 sıkışma değeri elde edilmeli. Bu tabaka Dolgu Üst Kotunda, Alt Balast (Asfalt Katkılı) ve Alt Balast ($Ev2>120$ Mpa) malzeme alt kotunda olmak üzere Yapı Duvarından 25 mt mesafede olacak ve 2:1 şev oluşturacak şekilde dolgu tabanından başlatılır ve yapımı Çimento Stabilizasyonlu Temelle birleşim noktalarında eş zamanlı oluşturulmalı. Çimento Stabilizasyonlu Temel Tabakasının üstüne gelen kısmında Çimento Stabilizasyonlu Temel Tabakasının çatlamamasına özen gösterilmeli (5) ve bunun devamında Güzergah Dolgusuna geçilmelidir (5 ve 8).
3. Alt Balast (Asfalt Katkılı) tabaka; Özel Dolgu Üzerine 50 em sıkışmış kalınlıkta olmak üzere yapı üst kotunu sıfırlayacak şekilde Yapı Yaklaşım Duvarından 15 mt mesafeye kadar oluşturulmalı. En az %96 sıkışma elde edilmeli.
4. Alt Balast ($Ev2>120$ Mpa); Alt Balast (Asfalt Katkılı) bitiminden itibaren Özel Dolgu Malzemesini ve bitiminde de Seçme Malzeme Dolgusunun ($Ev2>80$ Mpa) üstünü kaplayacak şekilde 50 cm kalınlığında oluşturulacaktır. En az % 100 sıkışma istenecektir.
5. Dolgu Taban zemini Deformasyon Modülü kontrol edilecek eğer $Ev2<45$ Mpa olması halinde taban zemini iyileştirilmesi yapılacaktır, yapılacak iyileştirmeye

yerinde karar verilecektir. Ayrıca bu detay Altgeçit ve Menfezlerde $h < 2,5$ mt içinde uygulanacaktır, $h > 2,5$ mt olması halinde bu detay uygulanmayacaktır (Şekil 5.17, Şekil 5.18).



Şekil 5.17. Menfez Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Üzeri (Dolguda)



Şekil 5.18. Menfez Yaklaşım Dolgusu. Doğal Zemin Üzeri (Dolguda)

5.1.2.2. Alt geçit - menfez yaklaşım dolgusu modeli (doğal zemin altı)

Aşağıdaki şekil üzerinde kodlanmış birimler şunlardır:

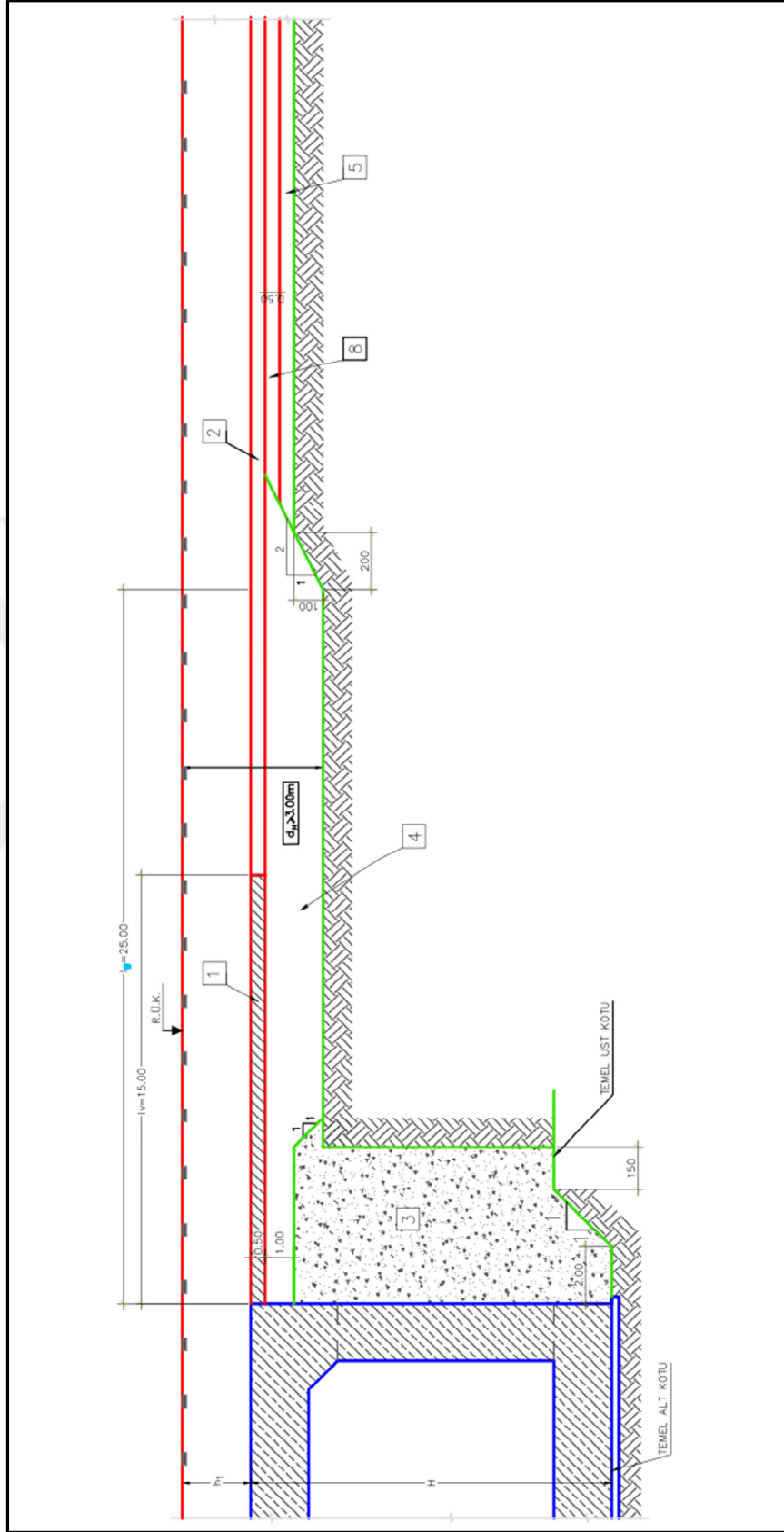
1. Alt balast (asfalt katkılı)

2. Alt balast ($e v_2 > 120 \text{ mpa}$)
3. Çimento stabilizasyonlu dolgu ($d_r > 0.80$; %2.50-3.00 çimento)
4. Özel dolgu ($D_r > 1$; $E > 80 \text{ Mpa}$) Maksimum dane çapı 100 mm, iyi derecelenmiş ($C_u > 6$), ince malzemesi ($< 0.075 \text{ mm}$) %5'den az, Los Angeles aşınma kaybı %30'dan az olacak ve 30cm'lik tabakalar halinde serilip sıkıştırıcıdır.
5. Güzergah dolgusu
6. Drenaj borusu ($\emptyset 200$ perfore boru)
7. Koruma duvarı (20 cm)
8. Seçme malzeme ($e v_2 > 80 \text{ Mpa}$)

Dolgu taban zemini deformasyon modülü $e v_2 < 45 \text{ mpa}$ 'dan daha küçük olması halinde taban zeminin iyileştirmesi yapılmalıdır. Yapılacak iyileştirmeye yöntemine zemin deneyleri yapılarak karar verilmelidir (Şekil 5.19).

Altgeçit/Menfez Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Altı) Yapım Aşamaları

1. Çimento Stabilizasyonlu Dolgu ($D_r > 0,80$; %2,5-3,0 Çimentolu); üstte Asfalt Katkılı Alt Balast tabakasının 1 mt altından Yapı Duvarından 2 mt mesafede bitecek şekilde 1:1 Şevle Yapı Üst Kotundan 2,5 mt aşağıya kadar yapıdan 25 mt mesafeden 2:1 şevle sıyrılarak hazırlanan doğal zemin üzerine oturacak şekilde oluşturulmalı. Tabanda ise temelin bitiminden itibaren de Temel Alt Kotu ile temel üst kotu arasında en az 1,5 mt mesafede yine 1:1şev oluşturulacak şekilde temel üst kotuna kadar çimento Stabilizasyonlu Dolgu malzemesi ile doldurulmalı. İlaveten şev bitiminden sonra 1,5 mt mesafe kalacak şekilde düzenlenen kazı kesiti dik olarak Çimento Stabilizasyon Üst kotunu oluşturacak şekilde tamamlanmalı (3). Sıkışmış tabakalar 30 cm yi aşmayacak ve sıkışmalar dolgu kesitlerinde Modifiye Proktor değerinin %80 ninden az, yarma kesitlerinde Modifiye Proktor degerinin %88 inden az olmamalı.



Şekil 5. 19. Altgeçit / Menfez Yaklaşım Dolgusu (Doğal Zemin Altı)

2. Özel Dolgu Özel Dolgu-Seçme Malzeme ($DR>1$; $Ev_2>80$ Mpa); Bu malzemenin Maksimum Dane Çapı 100 mm, iyi derecelenmiş ($Cu>6$), ince malzemesi ($<0,075$ mm) % 5 den az, Los Angeles Aşınma Kaybı %3 dan az olacak ve sıkışmış kalınlığı 30 cm olacak şekilde serilip sıkıştırılmalı. Modifiye proktor değerine göre en az %95 sıkışma değerine ulaşılmalı. Bu tabaka Dolgu Üst Kotunda, Alt Balast (Asfalt Katkılı) ve Alt Balast ($Ev_2>120$ Mpa) malzeme alt kotunda olmak üzere Yapı Yaklaşım duvarından 25 mt mesafede olacak ve 2:1 şev oluşturacak şekilde Seçme Malzeme Dolgusu ve Güzergah Dolgusunu örtmeli. Özel Dolgu, Çimento Stabilizasyonlu Temelle birleşim noktalarında eş zamanlı oluşturulmalı. Çimento Stabilizasyonlu Temel Tabakasının üstüne gelen kısımda Çimento Stabilizasyonlu Temel Tabakasının çatlamamasına özen gösterilmeli.
3. Alt Balast (Asfalt Katkılı) tabaka; Özel Dolgu Üzerine 50 cm sıkılmış kalınlıkta olmak üzere yapı üst kotunu sıfırlayacak şekilde Yapı Yaklaşım Duvarından 15 mt mesafeye kadar oluşturulacaktır. En az %96 sıkışma istenecektir.
4. Alt Balast ($Ev_2>120$ Mpa); Alt Balast (Asfalt Katkılı) bitiminden itibaren Özel Dolgu malzemesini ve bitiminde de Seçme Malzeme Dolgusunun ($Ev_2>80$ Mpa) üstünü kaplayacak şekilde 50 cm kalınlığında oluşturulur ve % 100 sıkışma istenir.
5. Dolgu taban zemini deformasyon modülü $ev_2 < 45$ mpa'dan daha küçük olması halinde taban zeminin iyileştirmesi yapılmalıdır. Yapılacak iyileştirmeye yöntemine zemin deneyleri yapılarak karar verilmelidir (Şekil 5.20-Şekil 5.28).



Şekil 5.20. Altgeçit yaklaşım dolgusu. doğal zemin altı (yarmada).



Şekil 5.21. Altgeçit yaklaşım dolgusu. Doğal zemin altı (yarmada).



Şekil 5.22. Altgeçit yaklaşım dolgusu. doğal zemin altı (yarmada)



Şekil 5.23. Menfez yaklaşım dolgusu. doğal zemin altı (yarmada) zayıf zeminin jeokompozit (jeotekstil + jeogrid) ile iyileştirilmesi



Şekil 5.24. Menfez yaklaşım dolgusu. doğal zemin altı (yarmada). zayıf zeminin jeokompozit (jeotekstil + jeogrid) ile iyileştirilmesi



Şekil 5.25. Menfez yaklaşım dolgusu. doğal zemin altı (yarmada). zayıf zeminin jeokompozit (jeotekstil + jeogrid) ile iyileştirilmesi



Şekil 5.26. Menfez yaklaşım dolgusu. sol taraf doğal zemin üzeri(dolguda) sağ taraf doğal zemin altı (yarmada)



Şekil 5.27. Altgeçit yaklaşım dolgusu bir taraf doğal zemin üzeri(dolguda) bir taraf doğal zemin altı (yarmada)



Şekil 5.28. Altgeçit yaklaşım dolgusu bir taraf doğal zemin üzeri (dolguda) bir taraf doğal zemin altı (yarmada)

5.1.3. Geçiş plakları

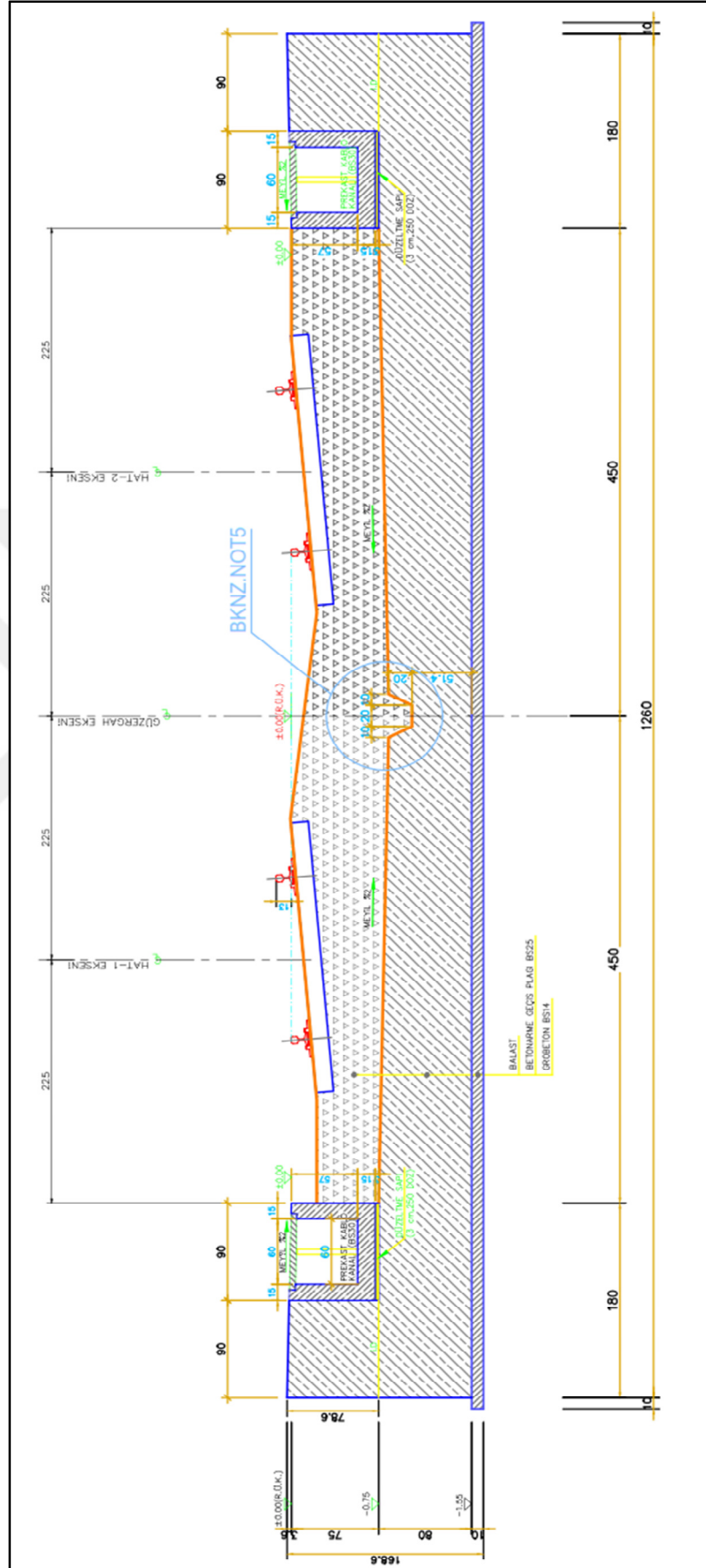
Yüksek hızlı demiryollarında tünel yapıları genellikle dağ tünelleri şeklinde karşımıza çıkar. Doğal vadi oluşum noktalarında bu tünel yapıları açığa çıkarlar. Uzun mesafe vadi geçişlerinde viyadük / köprü imalatları yapılırken kısa mesafe vadi geçişlerinde hidrolik menfez üzeri demiryolu geçişleri sağlanır.

İşte bu kısa mesafelerde yaklaşım dolguları tam anlamıyla oluşturulamayabilir ya da istenilen özellikler sağlanamayabilir. Böyle kısa noktalar arasında rijit yapının sürekliliğini sağlayarak oturmaların önüne geçmek için betonarme geçiş plakları uygulanır (Şekil 5.30-Şekil 5.33).

Bu geçiş plakları:

- Tünel-Tünel geçiş plakları
- Tünel-Viyadük geçiş plakları

şeklinde karşımıza çıkar.



Şekil 5.29. Geçiş Plağı Tip Kesit



Şekil 5.30. İki tünel arası betonarme geçiş plağı



Şekil 5.31. İki tünel arası betonarme geçiş plağı



Şekil 5.32. İki tünel arası betonarme geçiş plağı

6. YAKLAŞIM DOLGU MODELLERİ KARŞILAŞTIRMA ANALİZLERİ

Bu çalışmada farklı zeminler üzerindeki farklı yaklaşım dolgu modellerinin davranışlarını gösterebilmek amacıyla nümerik analizler gerçekleştirilmiştir.

UIC 719'e dayanan İtalyan, Alman, Fransız ve İspanyol yaklaşım dolgu modelleri arasında İtalyan, Alman ve İspanyol modelleri birbirlerine benzerlik göstermektedir. Bu yüzden Alman ve Fransız yaklaşım dolgu model tiplerinin karşılaştırılması yapılmıştır.

Yüksek hızlı demiryollarının yapımında; emniyetli ve konforlu bir ulaşımın sağlanması için hat yatağının oturma ve ondülasyonlara yol açmayacak şekilde oluşturulması gerekmektedir. Özellikle sanat yapıları ile zemin geçişlerde farklı oturmalar oluşabilmektedir. Bu oturmalar ise yüksek hızlarda hissedilmekte, konfor ve seyrüsefer açısından sorunlar oluşturmaktadır.

Bu çalışma ile, sanat yapıları ve zemin çalışmaları arasındaki geçişler temel alınarak uygulamada en çok kullanılan Alman ve Fransız modellerinin altındaki kaya, kum ve kil zeminlere göre davranışları sayısal yöntemle incelenmiştir.

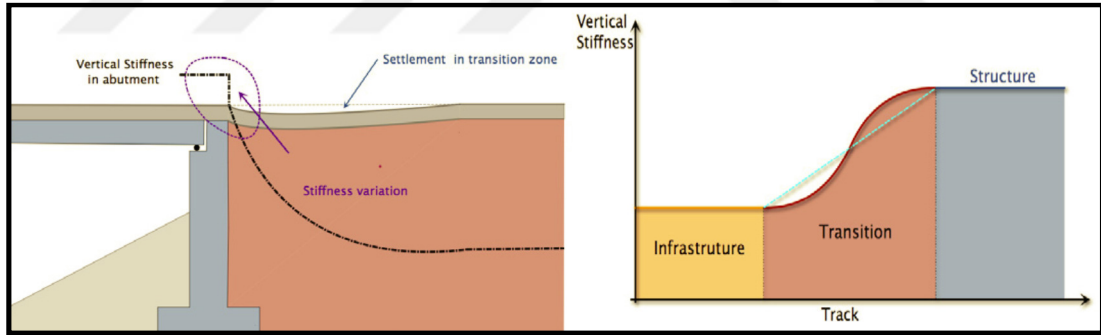
Bu amaçla, yaklaşım dolgu modelleri oluşturularak sonlu elemanlar yöntemi (FEM) kullanan Plaxis 2D V. 8.2 bilgisayar programı ile analiz edilmiştir. Dolgunun yerleştirilmesi ve tren ağırlığı (22,5 ton dingil yükü) altında davranışların incelenmesi amacı ile 2 basamak halinde analizler planlanmıştır. 9 metrelik dolgu yükü baz alınarak yapılan analizler sonucunda, yaklaşım dolgularının altındaki zeminlerin çok büyük önem taşıdığı, rijit ortamlarda yaklaşım dolgu tipinin çok önemli olmadığı buna karşın plastisitesi yüksek ortamlarda ise Alman yaklaşım dolgu modelinin bir miktar daha iyi performans gösterdiği sonucuna varılmıştır.

6.1. Amaç

Zemin işleri ile sanat yapıları arasındaki geçişler, farklı oturmaları azaltabilmek ve mesnet rijitliğinde kademeli bir geçişin sağlanması açısından önem taşımaktadır. Tren yolcuları için daha iyi bir konfor sağlayan olanı belirleyebilmek için uluslararası demiryolu yapım tekniği şartnamesi olan UIC 719 şartnamesinde farklı türdeki yaklaşım dolgu tiplerinin analizleri yapılmıştır.

Demiryolları hat yataklarında en çok karşılaşılan sorun rayların köprü gibi sanat yapıları yaklaşımlarında oturmasıdır [30]. Bu durum altyapı yönetimi, bakım onarım maliyetleri, tren operasyonlarındaki gecikmeler vb. gibi nedenlerle maliyet artışlarına neden olmaktadır [31]. Modern demiryollarında oturmaları en aza indirmek için bağlayıcı ve bağlayıcı olmayan jeomekanik malzemeler kullanılmaktadır [30].

Buna rağmen sorunlar hala tam olarak anlaşılammıştır. Sorunlar 2 temel başlık altında toplanabilir; bunlar: 1) Ani birim değişimleri nedeni ile düşey yönde dayanım değişimleri (zeminlerde çok, köprülerde az), 2) farklı dolgu yerleşimleri, (köprü ve dolgu geçişlerinde düz olmayan ray profilleri) [32] (Şekil 6.1).



Şekil 6.1. Hat yatağında oluşan sorunlar [33]

Bu iki faktörde ciddi olabilir. Böyle bir senaryoda tren tekerlerinde farklı hareketler sonucunda yolcu konfor seviyesinde azalma ve hatta trenin hattan çıkıp deray etmesi sonucunu doğurmaktadır [34].

Modern demiryolu tasarımların çoğunda; 20 m uzunluğunda sıkıştırılmış (tutturucu içeren ve tutturucu içermeyen) kama şekilli dolgu malzemesi kullanılmaktadır [30]. UIC 719R (2008) standardında özetlenen bu çalışmalar, İtalyan, Alman, Fransız, Belçika, İsveç, Finlandiya, Polonya, İspanyol vb. gibi isimlerle anılmaktadır.

Bu çalışmada ülkemiz ve dünya yüksek hızlı tren altyapısında sıklıkla kullanılan Alman ve Fransız sanat yapısı yaklaşım dolgu modelleri altındaki kaya, kum ve kil zeminlere göre davranışları Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) kullanan Plaxis 2D V.8.2 programı kullanılarak performansları yatay ve düşey yönde incelenmiştir.

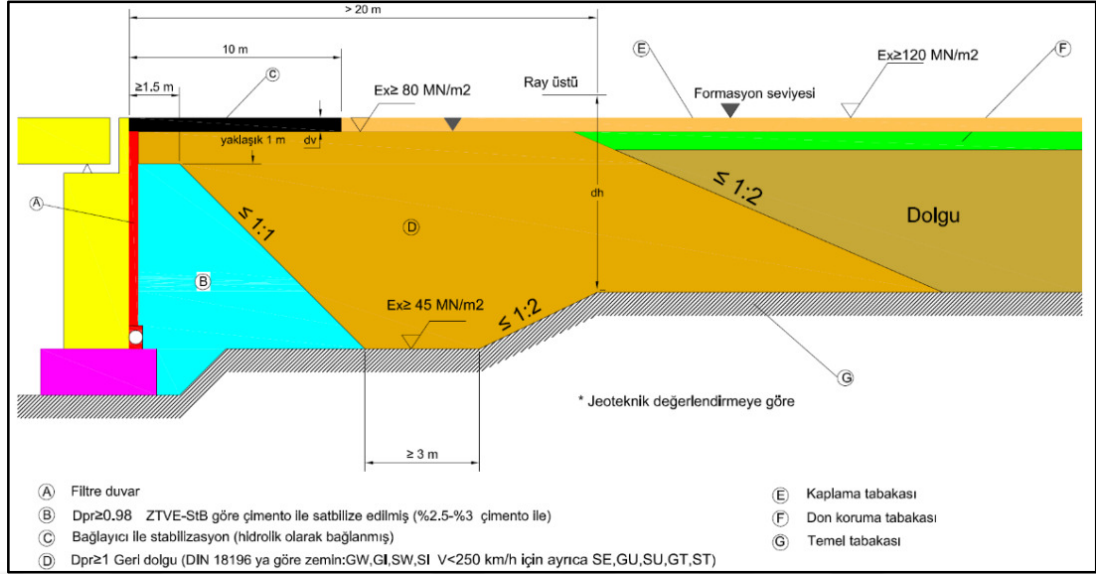
6.2. Modelleme

Yüksek standartlı demiryolu dizaynında, maruz kalacağı statik yüklerin yanında dinamik yüklerinde planlanması gerekmektedir. UIC 719R (2008)'de tariflenen yaklaşım dolgusu modellerinden Alman ve Fransız modelleri ülkemiz hızlı tren altyapısında ve uluslararası alanda sıkça tercih edilen yöntemlerdendir.

Her iki yöntemin de temeli 20 metrelik bir alanda tutturulmamış granüler malzemeler ile tutturulmuş malzemelerin birlikte kullanımına dayanmaktadır. Bununla birlikte her iki yöntemin imalat aşamasında avantaj ve dezavantajları bulunmaktadır. Ancak bu çalışmada imalat zorluğundan çok yükler altında davranışları incelenmiştir.

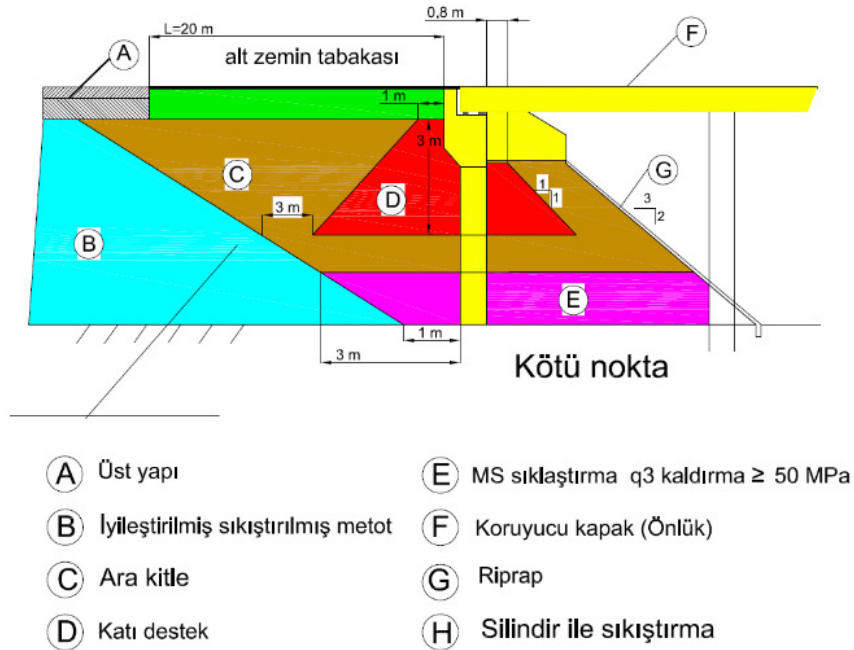
Alman dolgu modelinde; yaklaşım dolgusu uzunluğu 250 km/saat hız için 20 metre yada daha uzun olarak öngörülmüştür. Bu modelde sanat yapısı ile dolgu arasında ince bir granüler malzeme ile yüzey sularının sızdırılması açlanmıştır.

Sanat yapısı ile tabi zemin arasında çimento içeriği % 2,5-3 arasında değişen çimentolu stabilizasyon önerilmektedir. Bu dolgunun özelliği içerisinde bulunan çimento bağlayıcısı ile tekniğine uygun yapıldığında rijit bir yapı kazanmasıdır. Onun gerisinde de sıkıştırılabilen dolgu malzemesi ile yaklaşım dolgusu tamamlanmaktadır (Şekil 6.2).



Şekil 6.2. 250 km/saat hıza göre alman dolgu modeli [34]

Fransız dolgu modelinde, yaklaşım dolgusunun uzunluğu 20 metre olarak öngörülmüştür. Sanat yapısından uzaklaştıkça temelde yer alan sıyrılmış ve doldurulmuş (iyileştirme yapılmış birim ve üzerinde orta sertlikte (masiflikte) genellikle hidrolik bağlayıcı ve silindiraj kullanılarak elde edilen bir birim ve üzerinde rijit bir kütle gelmektedir. rijit kütle alman modelinde olduğu gibi çimentolu stabilizasyon ile sağlanmaktadır (Şekil 6.3).



Şekil 6.3. 250 km/saat hıza göre Fransız dolgu modeli [34]

6.3. Sayısal Analiz

Alman ve Fransız sanat yapıları yaklaşım dolgu modeli davranışını değerlendirmek amacı ile, Sonlu elemanlar yöntemi ile analiz yapan Plaxis V. 8.2 [6] programı kullanılmıştır. Sonlu elemanlar yöntemi diferansiyel denklemlerle ifade edilen mühendislik problemlerinin analizi için geliştirilen sayısal çözüm yöntemidir [36].

Sürekli bir ortam sonlu elemanlara bölünerek denklemler her bir eleman için yazılır ve integre edilerek sistem denklemleri elde edilir. Sonuçta sürekli bir ortam için göz önüne alınan diferansiyel denklem lineer bir denklem takımına indirgenir [37]. PLAXIS (Finite Element Code for Soil and Rock Analysis) programı ise, geoteknik mühendisliğindeki deformasyon ve duraylılık problemlerinin sonlu elemanlar yöntemi ile analiz edilebilmesi için tasarlanmış bir bilgisayar yazılımıdır [38].

Her iki yaklaşım dolgu modelinde de analizler köprü kenar ayağından farklı uzaklıklardaki yaklaşım dolgusu enine kesitleri için yapılmıştır. Köprü kenar ayağından boyuna yönde uzaklaştıkça farklı stratigrafik kesimler olması dolayısıyla bu analizlerin yapılması gerekliliği doğmuştur. Her bir dolgu tipi (Alman ve Fransız) ve zemin tipi (kaya, kum, kil) için kenar ayaktan 1m, 5m, 10m, 15m ve 20m uzaklıkta olacak şekilde 5 farklı analiz gerçekleştirilmiştir.

Analizler sırasında yaklaşım dolgusunda kullanılan temel malzemeler ve altındaki zemin birimlerine ait kabul edilen parametreler Tablo 6.1’de verilmiştir.

Tablo 6.1. Sayısal analizlerde kullanılan parametreler

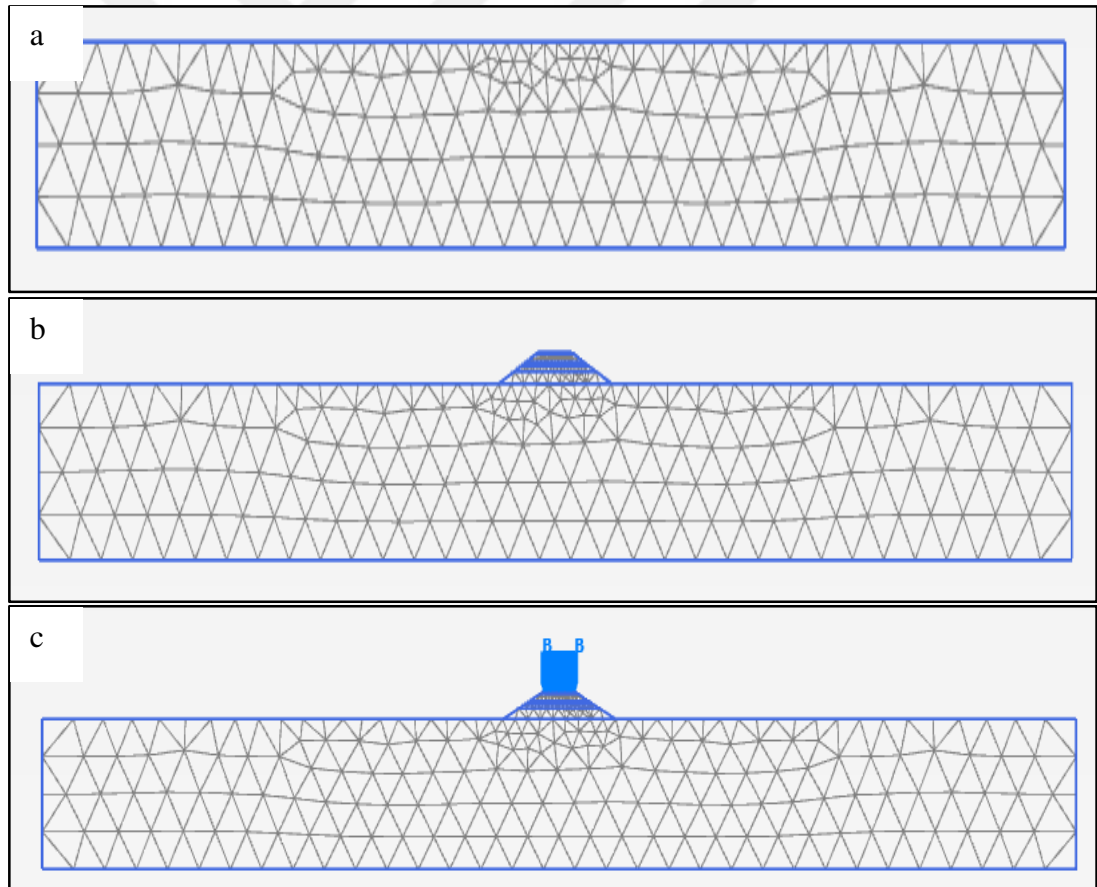
	E (Mpa)	g(kN/m ³)	Pi(°)	c'(kPa)
Çimento karışımı granüler malzeme katmanı	40	20	38	0
Granül karışımı katmanı	58	20	38	0
Kaya dolgu malzemesi	88	20	38	0
Kaya	200	25	40	300
Kum	30	20	35	0
Kil	15	20	25	0

Analizler köprü kenar ayağından farklı uzaklıklardaki yaklaşım dolgusu enine kesitleri için yapılmıştır. Köprü kenar ayağından boyuna yönde uzaklaştıkça farklı stratigrafik kesimler olması dolayısıyla bu analizlerin yapılması gerekliliği doğmuştur.

Her bir dolgu tipi (Alman ve Fransız) ve zemin tipi (kaya, kum, kil) için kenar ayaktan 1m, 5m, 10m, 15m ve 20m uzaklıkta olacak şekilde toplam 30 farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Analizlerde Mohr-Coulomb malzeme modeli kullanılmıştır.

Her bir analiz nonlineer ve gerilime bağlı zemin davranışını simüle edebilmek amacıyla 3 adımda gerçekleştirilmiştir (Şekil 6.4). Bunlar:

- 1- Temel Zemin tabakası inşaaası ve geostatik analizi
- 2- Dolgu inşaaası ve oturma değer ölçümleri
- 3- 40kPA uniform yayılı yük uygulaması ve oturma değer ölçümleri



Şekil 6.4. Sayısal analiz uygulama adımları (a: Temel Zemin tabakası inşaaası ve geostatik analizi b: Dolgu inşaaası ve oturma değer ölçümleri c:40 kPA uniform yayılı yük uygulaması ve oturma değer ölçümleri)

6.4. Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

Yaklaşım dolgu tiplerinin tabanındaki her bir zemin tipi için yapılan ayrıntılı sayısal analizler ile elde edilen düşey ve toplam yerdeğiştirme verileri derlenmiştir. Her bir taban zemin birimi (kaya, kil, kum) için eksen kısmında (boyuna) ve hat boyunca sadece düşey ve toplam oturma değerleri sanat yapısından geriye doğru olacak şekilde irdelenmiştir.

6.4.1. Düşey yüklerden kaynaklı oturmaların değerlendirilmesi

Analizler sonrasında yapılan değerlendirmeler, analiz kesitinin eksen bölgesinde boyuna (bu bölge oturmaların en çok beklendiği noktadır) ve analiz kesitinin enine gerçekleşen oturma değerleri incelenmiştir.

Bu amaçla Tren geçişini simüle etmek amacı ile uygulanan yayılı yük ile birlikte oluşan düşey yer değişimleri incelendiğinde kaya tabanlı her iki yaklaşım dolgu modelinde de 0,5 mmden düşük düzeyde oturmaların olduğu görülmektedir. Bu oturma değerleri oldukça düşük olup ihmal edilebilir niteliktedir.

Bunla birlikte yaklaşım dolgusunun oturacağı birim rijitten plastiğe doğru geçerken oturmalar hissedilir ölçüde artmaktadır. Kum tabanlarda 15 mm seviyelerine çıkmaktadır. Kil tabanda ise 55 mm seviyelerine çıkmaktadır.

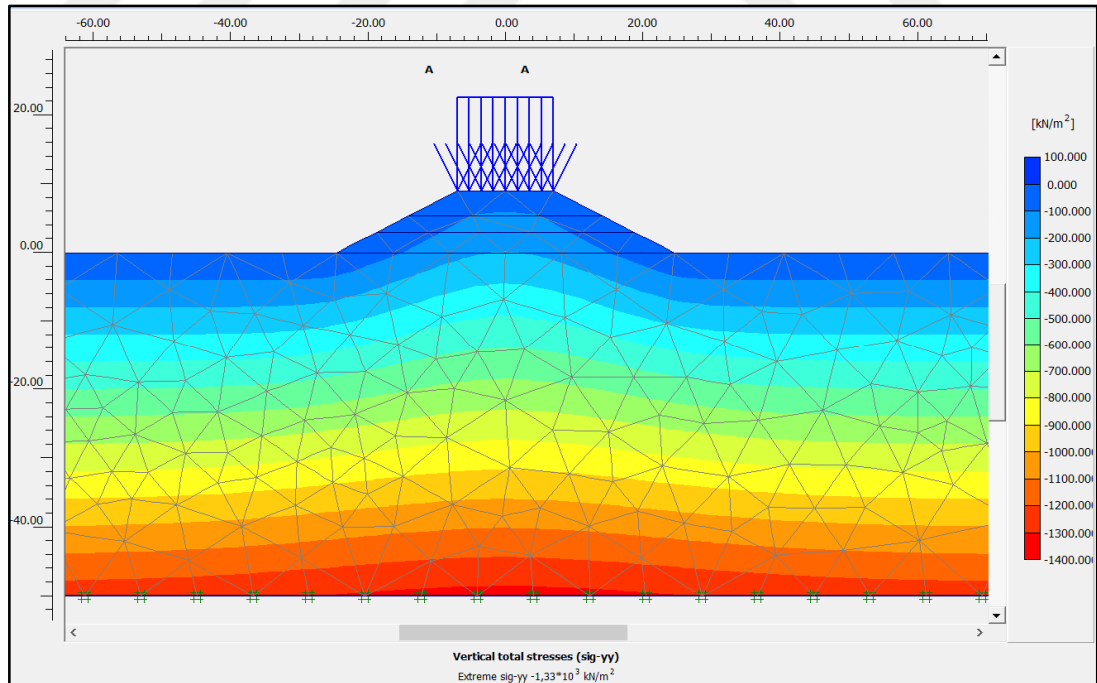
Fransız ve Alman modelleri kendi içlerinde kıyaslandığında ise Alman modelinin gerek kum tabanda gerekse kil tabanda birkaç mm seviyesinde daha iyi performans gösterdiği görülsede istenilen ölçü ve miktarda olmadığı değerlendirilmektedir (Tablo 6.2).

Tablo 6.2. Düşey yüklerden kaynaklanan boyuna oturmalar. (değerler mm dir).

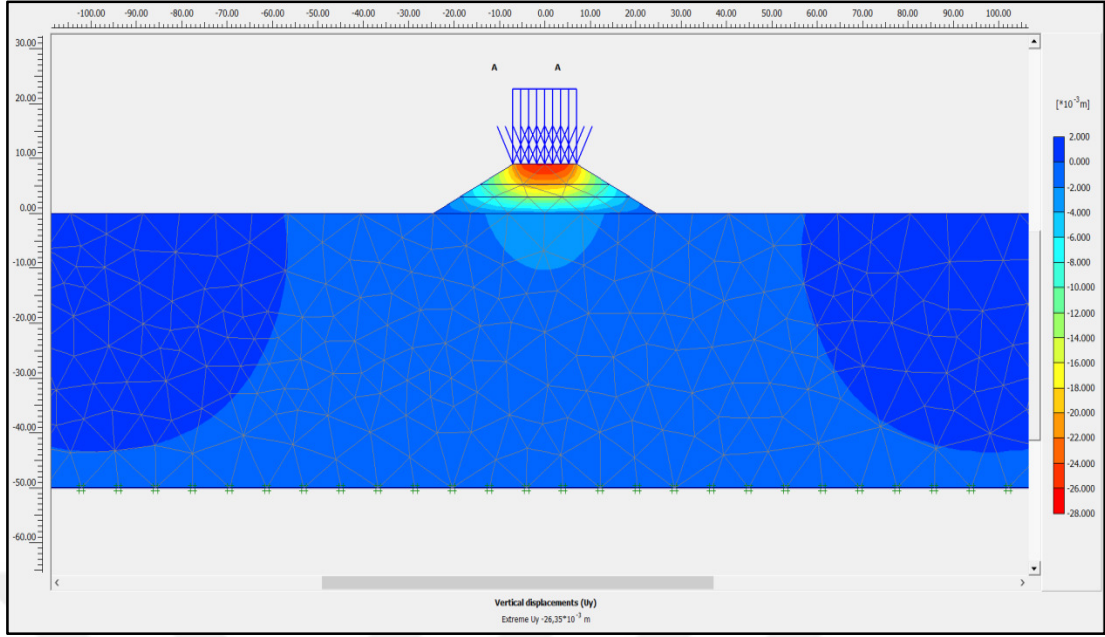
		Sanat yapısından uzaklık (m)				
		1	5	10	15	20
Fransız Dolgu Modeli	Kaya	0,38	0,41	0,41	0,41	0,41
	Kum	15,11	15,43	15,53	15,73	15,73
	Kil	52,66	54,05	54,01	55,48	55,48
Alman Dolgu Modeli	Kaya	0,35	0,36	0,37	0,37	0,37
	Kum	14,62	14,80	14,98	15,14	15,24
	Kil	52,27	53,25	53,59	54,65	54,90

6.4.1.1. Kaya tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları

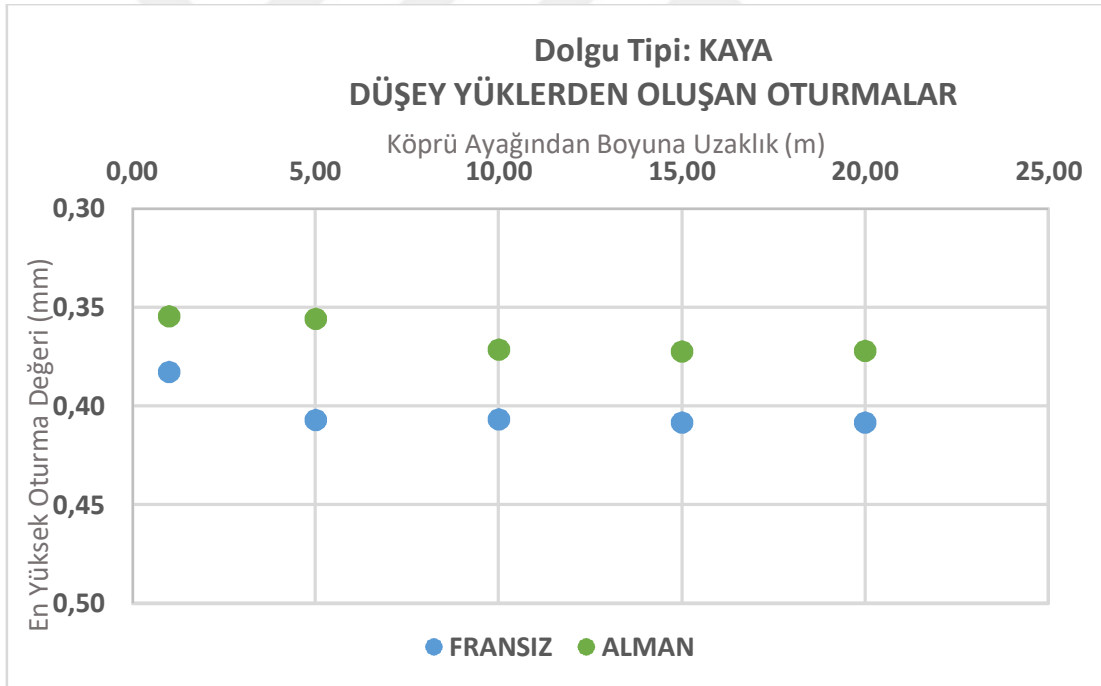
Analiz sonuçları Şekil 6.5 ile Şekil 6.8 arasında verilmiştir.



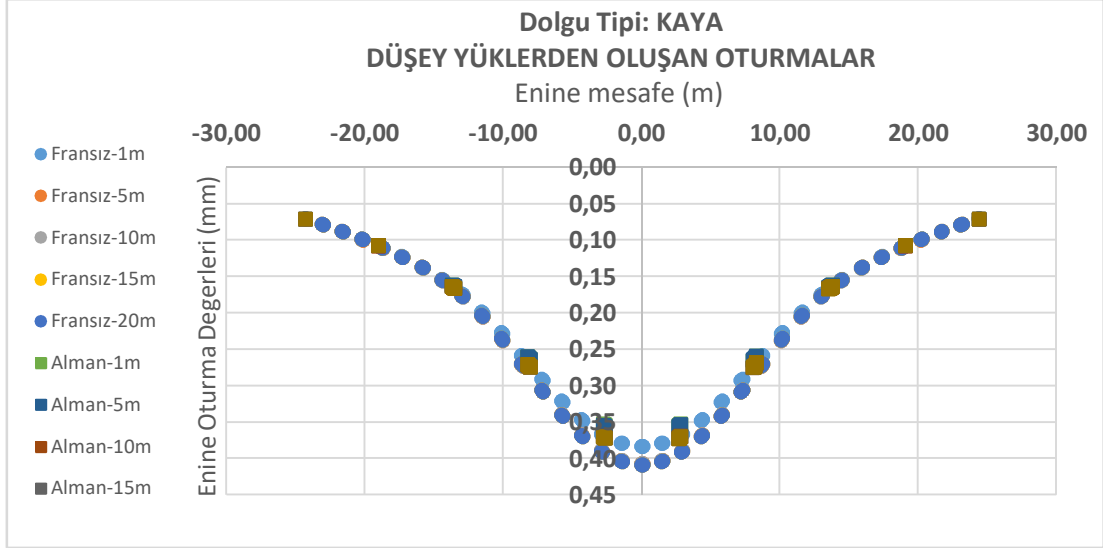
Şekil 6.5. Kaya tabanlı yaklaşım dolgusunda düşey gerilmeler (Fransız 20 m)



Şekil 6.6. Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında toplam yer değiştirmeler (Fransız 20 m)



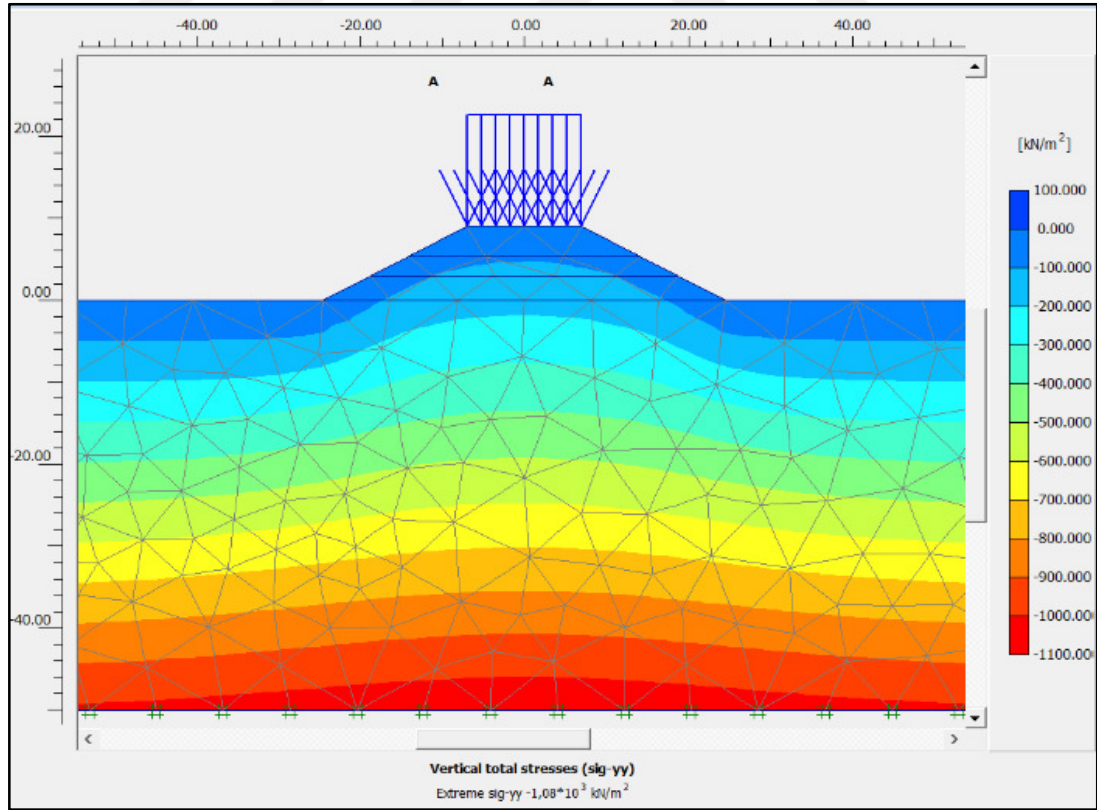
Şekil 6.7. Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında gerçekleşen düşey oturma değerleri



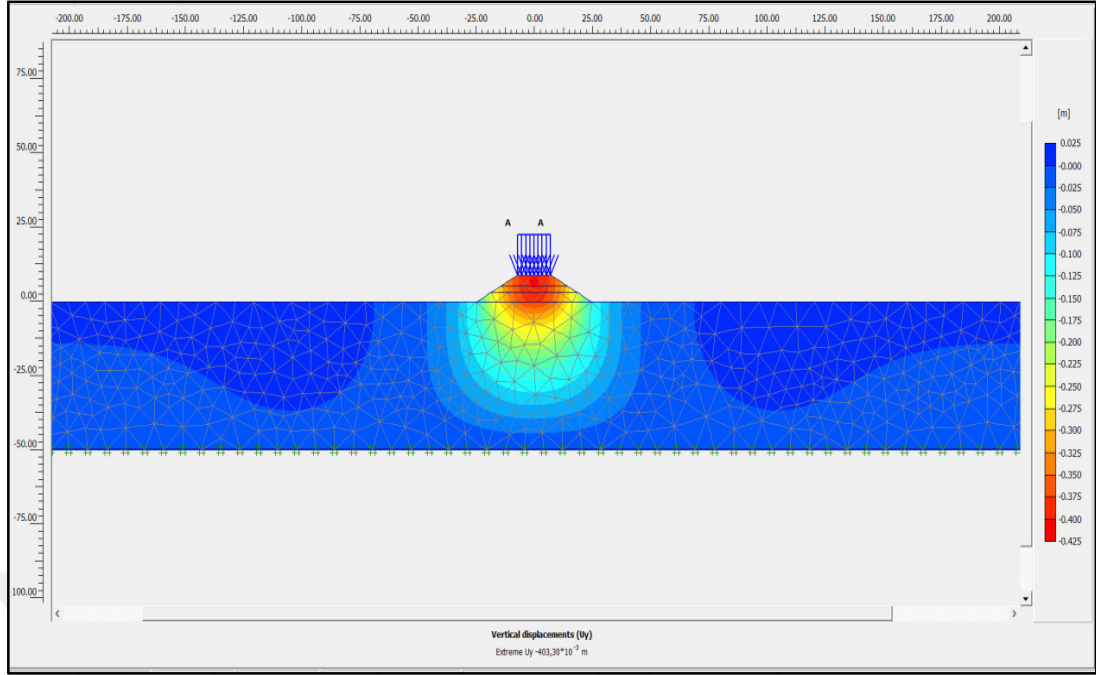
Şekil 6.8. Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte düşey yüklerden gerçekleşen oturma değerleri

6.4.1.2. Kum tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları

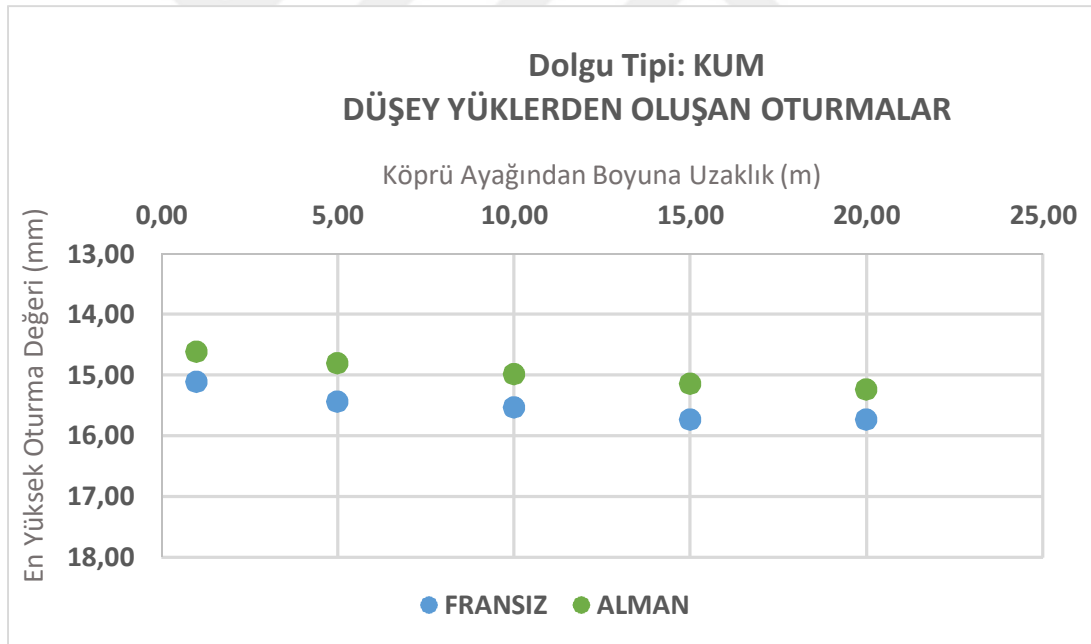
Analiz sonuçları Şekil 6.9 ile Şekil 6.12 arasında verilmiştir.



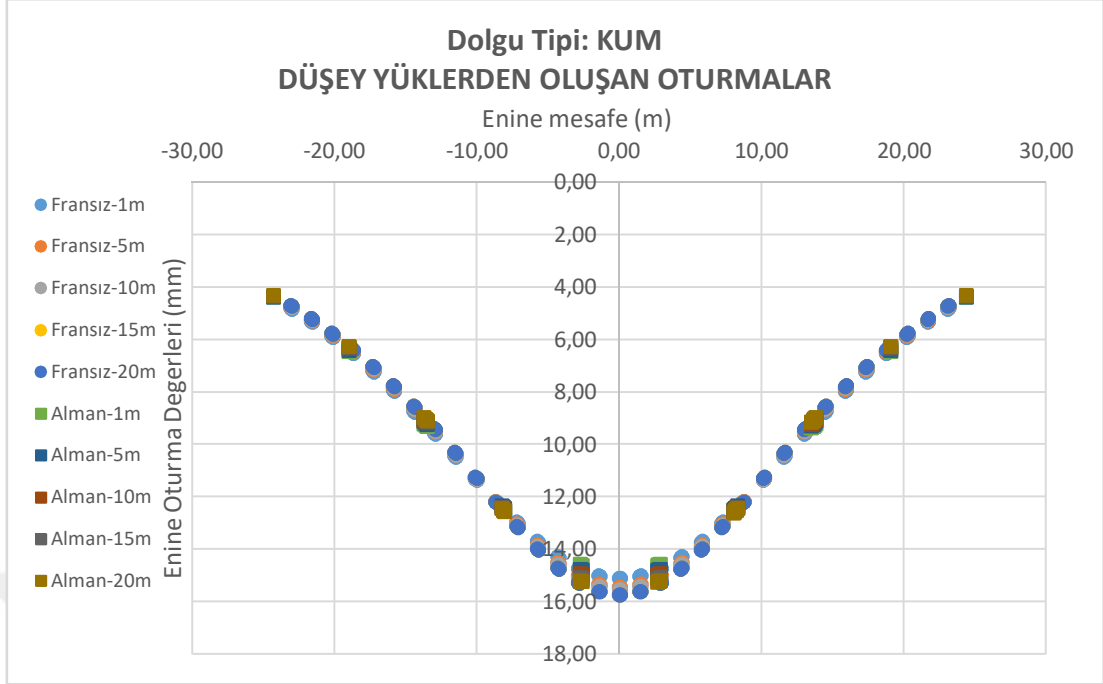
Şekil 6.9. Kum tabanlı yaklaşım dolgusu ortam düşey gerilmeler (Fransız 20 m)



Şekil 6.10. Kum tabanlı yaklaşım dolgularında toplam yer değiştirmeler (Franzıs 20m)



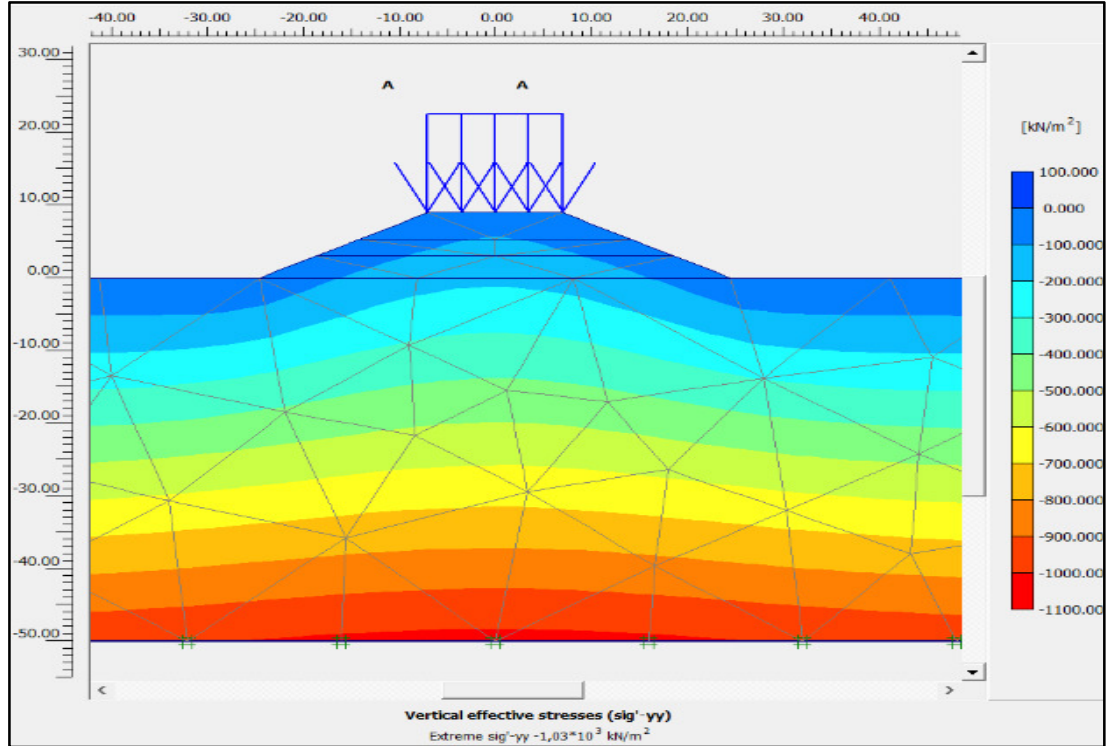
Şekil 6. 11. Kum tabanlı yaklaşım dolgularında düşey yüklerden oluşan oturma değerleri



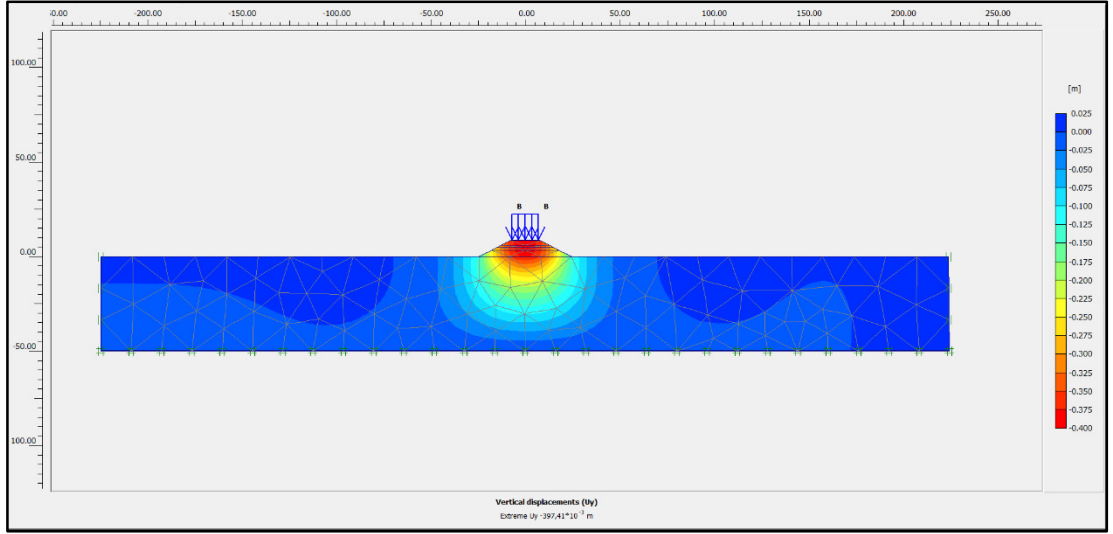
Şekil 6.12. Kum tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte düşey yüklerden gerçekleşen oturma değerleri

6.4.1.3. Kil Tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları

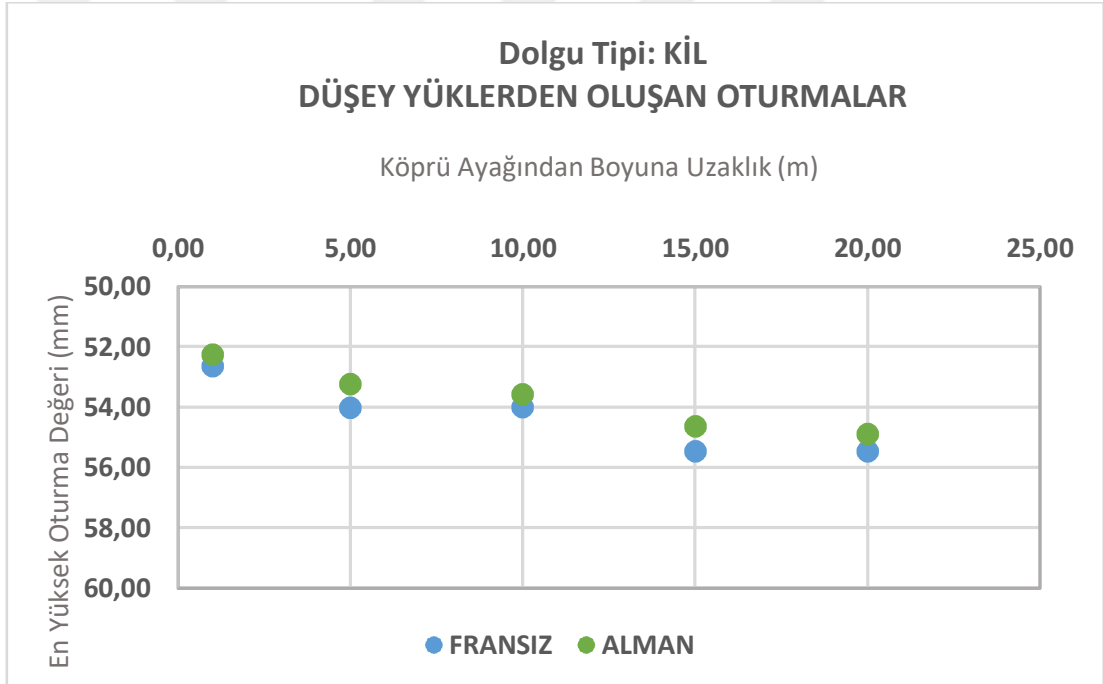
Analiz sonuçları Şekil 6.13 ile Şekil 6.16 arasında verilmiştir.



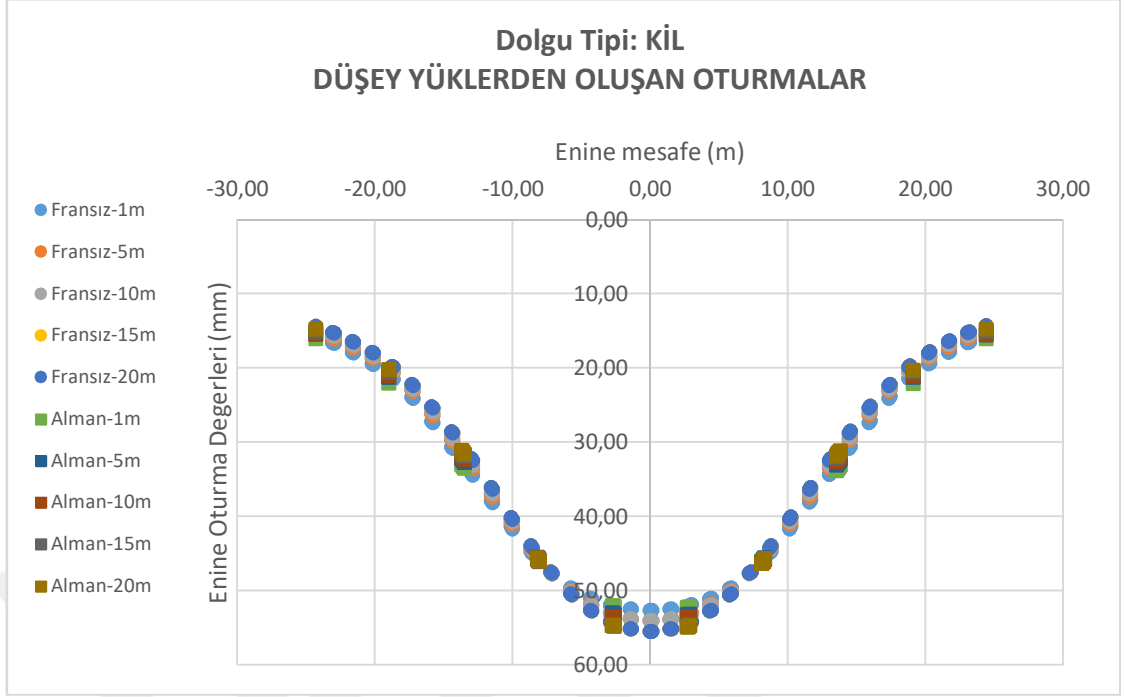
Şekil 6.13. Kil ortam düşey gerilmeler



Şekil 6.14. Kil tabanlı yaklaşım dolgularında toplam yer değiştirmeler (Alman 20 m)



Şekil 6.15. Kil tabanlı yaklaşım dolgularında düşey yüklerden oluşan oturma değerleri



Şekil 6.16. Kıl tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte düşey yüklerden gerçekleşen oturma değerleri

6.4.2. Toplam oturma

Tren geçişini simüle etmek amacı ile uygulanan yayılı yük ile birlikte oluşan toplam boyuna (güzergah eksenini boyunca) yer değişimleri incelendiğinde kaya tabanlı her iki yaklaşım dolgu modelinde de 3 mm civarında yüzeyde oturmaların olduğu görülmektedir. Bu oturma değerleri oldukça düşük olup ihmal edilebilir niteliktedir.

Bunla birlikte yaklaşım dolgusunun oturacağı birim rijitten plastiğe doğru geçerken toplam yer değişimleri (oturmalar) hissedilir ölçüde artmaktadır. Kum tabanlarda 135 mm seviyelerine çıkmaktadır. Kıl tabanda ise durum dahada dramatikleşmekte ve 380 mm seviyelerine çıkmaktadır.

Fransız ve Alman modelleri kendi içlerinde kıyaslandığında ise Alman modelinin gerek kum tabanda gerekse kıl tabanda 3-5 mm seviyesinde daha iyi performans gösterdiği görülsede istenilen ölçü ve miktarda olmadığı değerlendirilmektedir (Tablo 6.3).

Tablo 6.3. Boyuna toplam yer değiştirme. (değerler mm dir).

		Sanat yapısından uzaklık (m)				
		1	5	10	15	20
Fransız Dolgu Modeli	Kaya	3,04	3,18	3,18	3,18	3,18
	Kum	132,17	134,00	134,56	135,68	135,68
	Kil	371,62	375,91	376,00	380,17	380,17
Alman Dolgu Modeli	Kaya	2,90	2,91	3,00	3,01	3,01
	Kum	129,83	131,03	132,12	133,00	133,67
	Kil	369,47	372,75	373,25	376,44	376,56

Analizlerde yükleme ve toplam yer geğiştirmelere baktığımızda ise her iki dolgu modelinde de güzergah eksen kısmında en yüksek değerlere çıktığı ve eksenden uzaklaştıkça yerdeğişmelerin azaldığı görülmektedir.

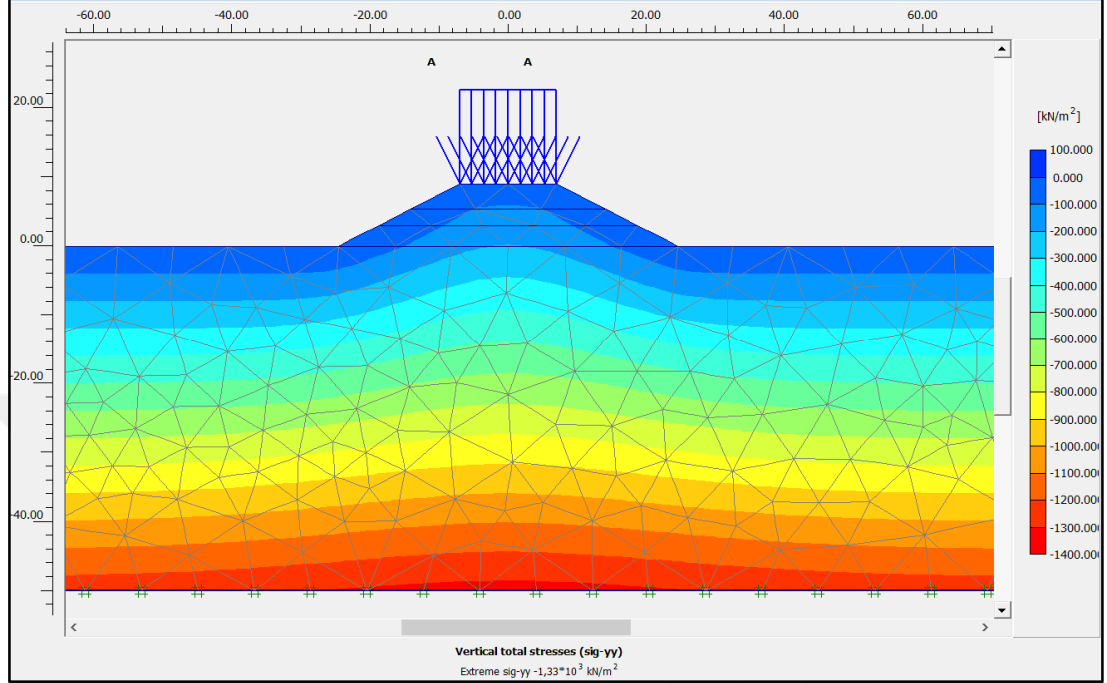
Bununla birlikte özellikle tren yükü altında gerçekteşen yerdeğiştirme miktarları taban ortam kayadan kile doğru artmaktadır.

Enine oturmalar Fransız ve Alman modelleri için kendi içlerinde kıyaslandığında ise düşey erilerde olduğu gibi kaya ortam için ihmal edilebilir niteliktedir.

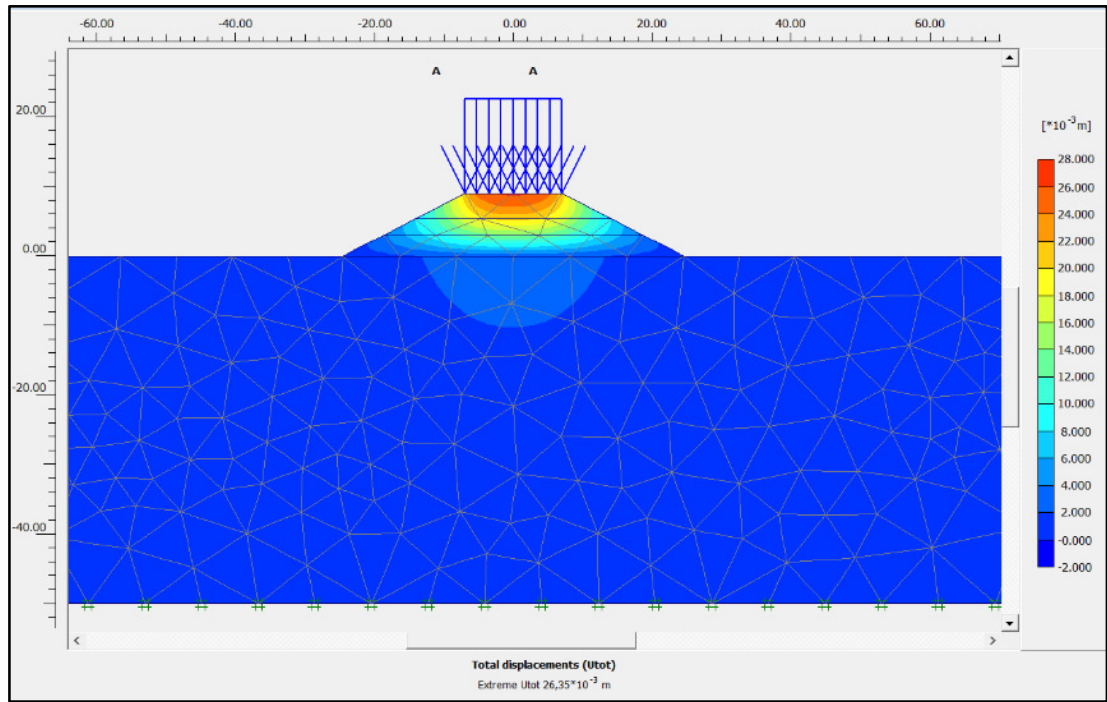
Ancak Alman modelinin gerek kum tabanda gerekse kil tabanda 3-5 mm seviyesinde daha iyi performans gösterdiği görülsede istenilen ölçü ve miktarda olmadığı değerlendirilmektedir.

6.4.2.1. Kaya tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları

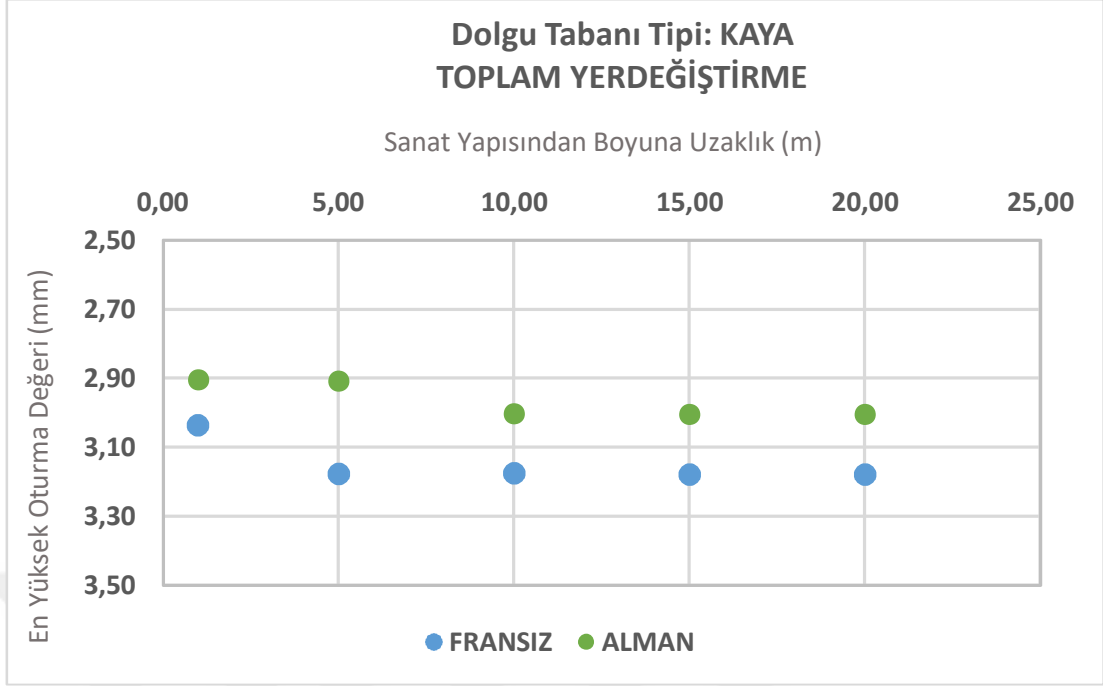
Analiz sonuçları Şekil 6.17 ile Şekil 6.20 arasında verilmiştir.



Şekil 6.17. Kaya Ortam düşey gerilmeler



Şekil 6.18. Kaya ortam toplam yer değiştirmeler



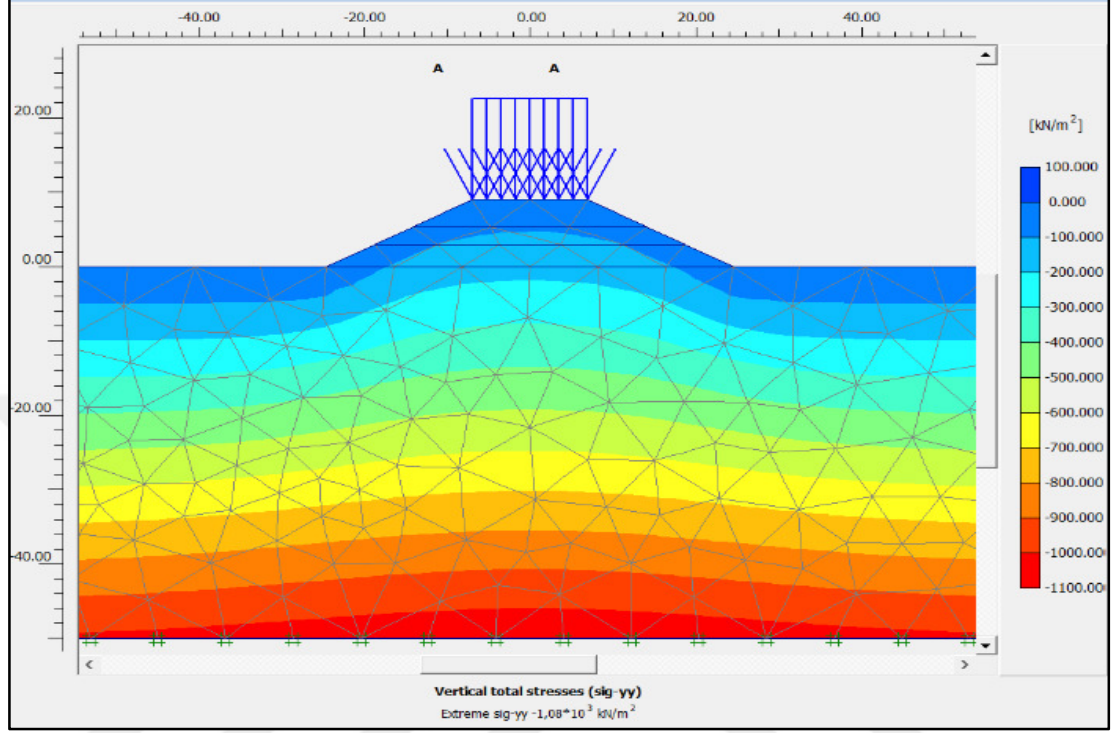
Şekil 6.19. Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında ekdende gerçekleşen toplam oturma değerleri



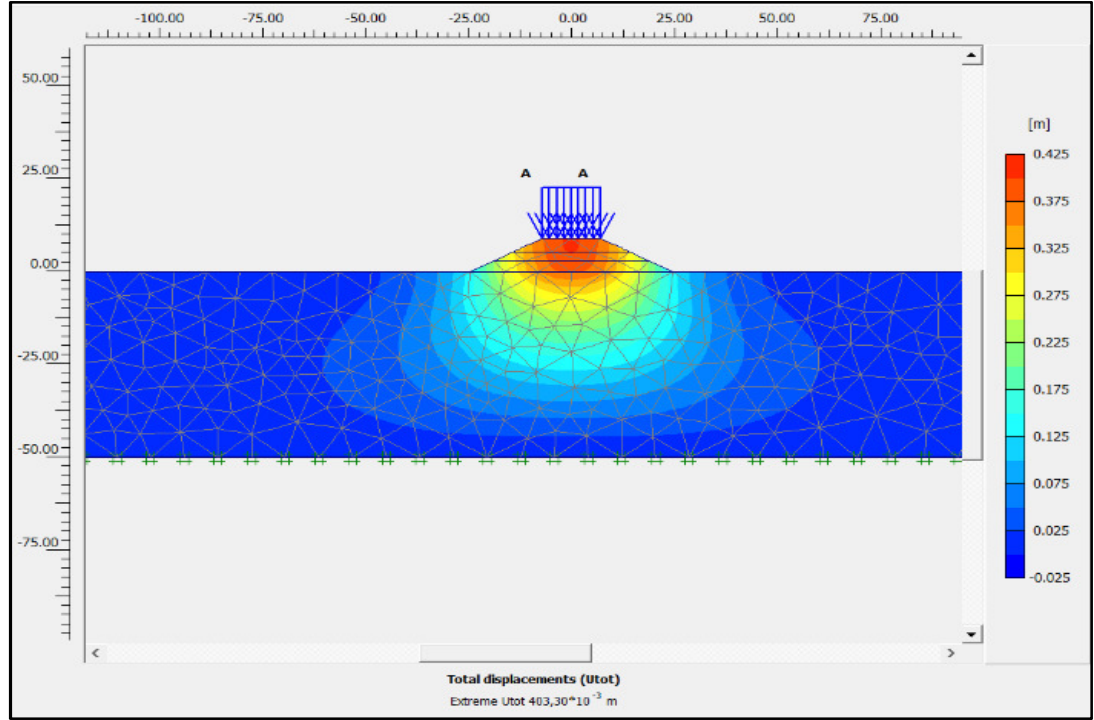
Şekil 6.20. Kaya tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte gerçekleşen toplam oturma değerleri

6.4.2.2. Kum tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları

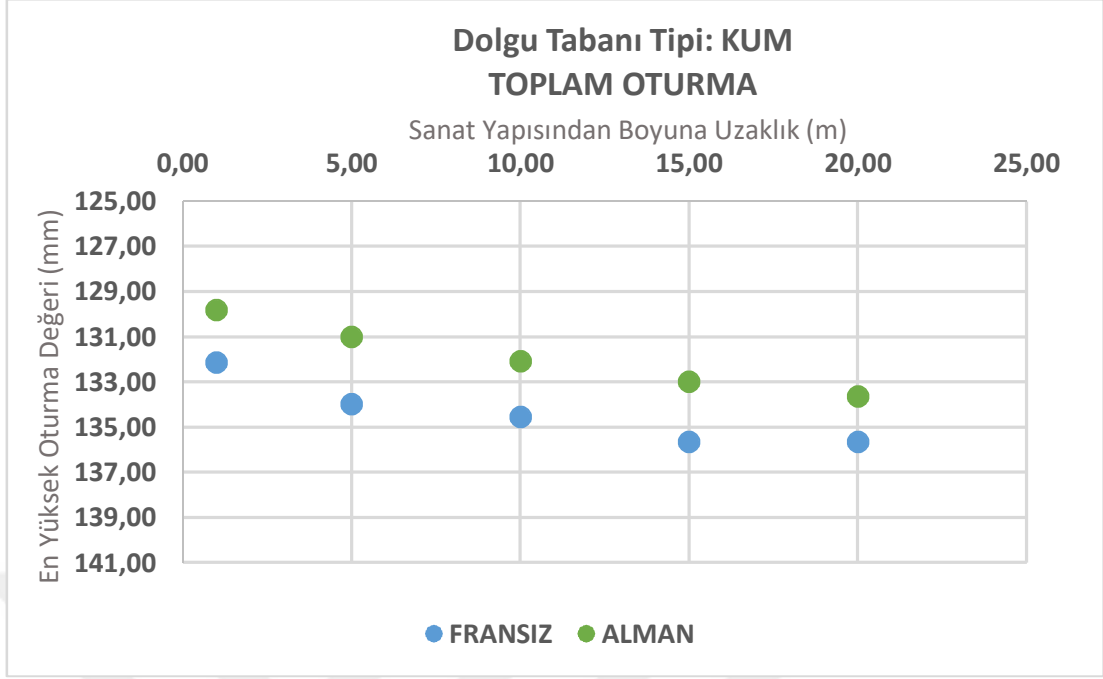
Analiz sonuçları Şekil 6.21 ile Şekil 6.25 arasında verilmiştir.



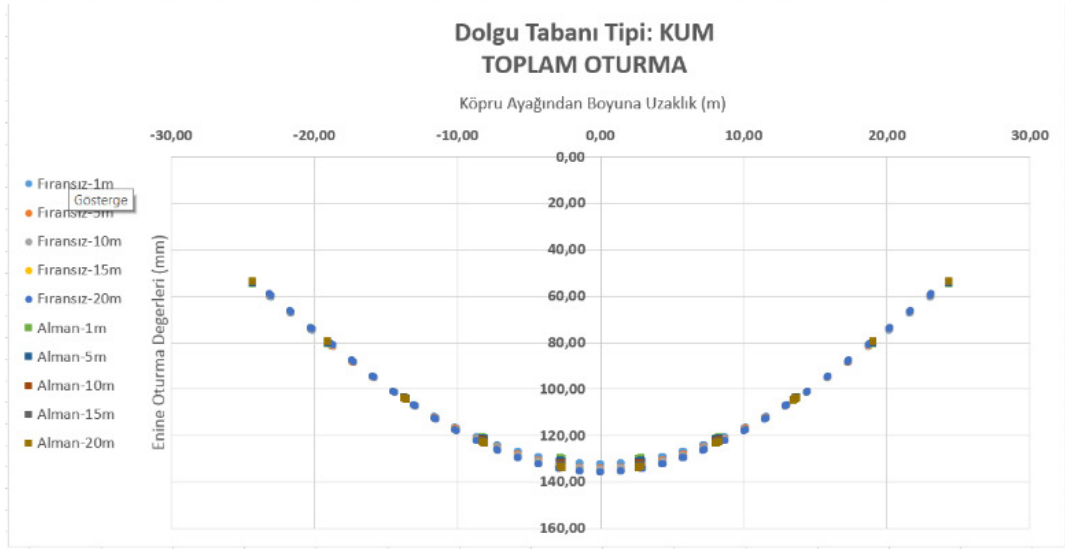
Şekil 6.21. Kum ortam düşey gerilmeler



Şekil 6.22. Kum ortam toplam yer değiştirmeler



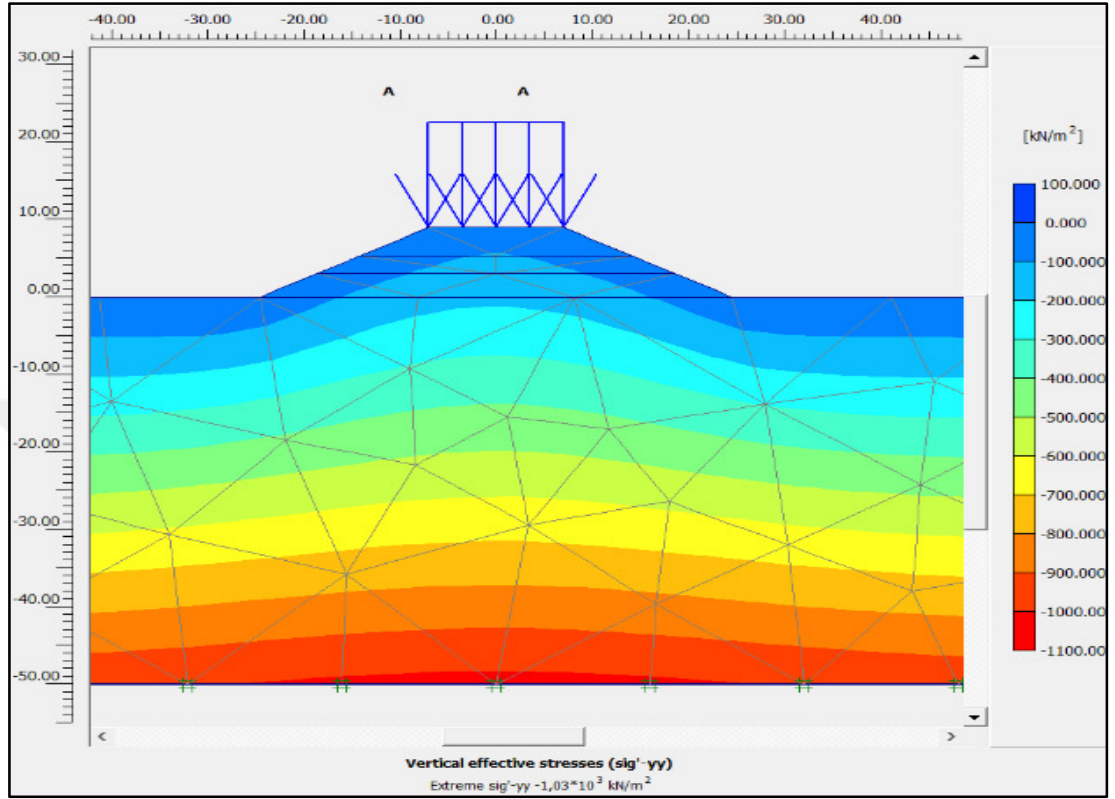
Şekil 6.23. Kum tabanlı yaklaşım dolgularında gerçekleşen toplam oturma değerleri



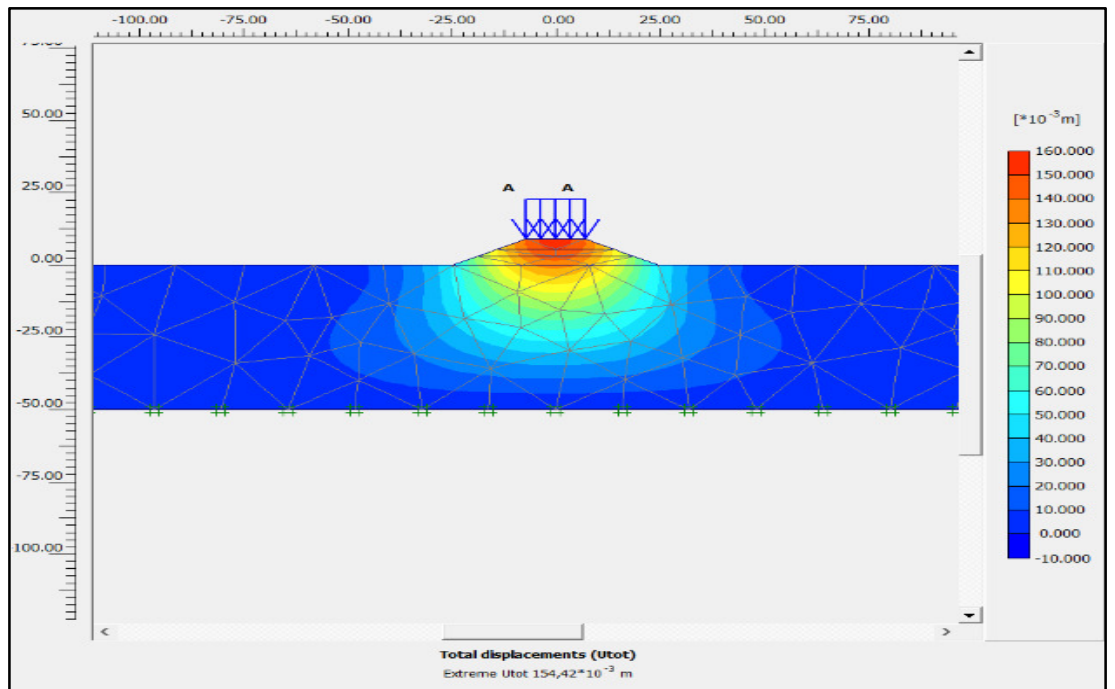
Şekil 6.24. Kum tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte gerçekleşen toplam oturma değerleri

6.4.2.3. Kil tabanlı yaklaşım dolgusu analiz sonuçları

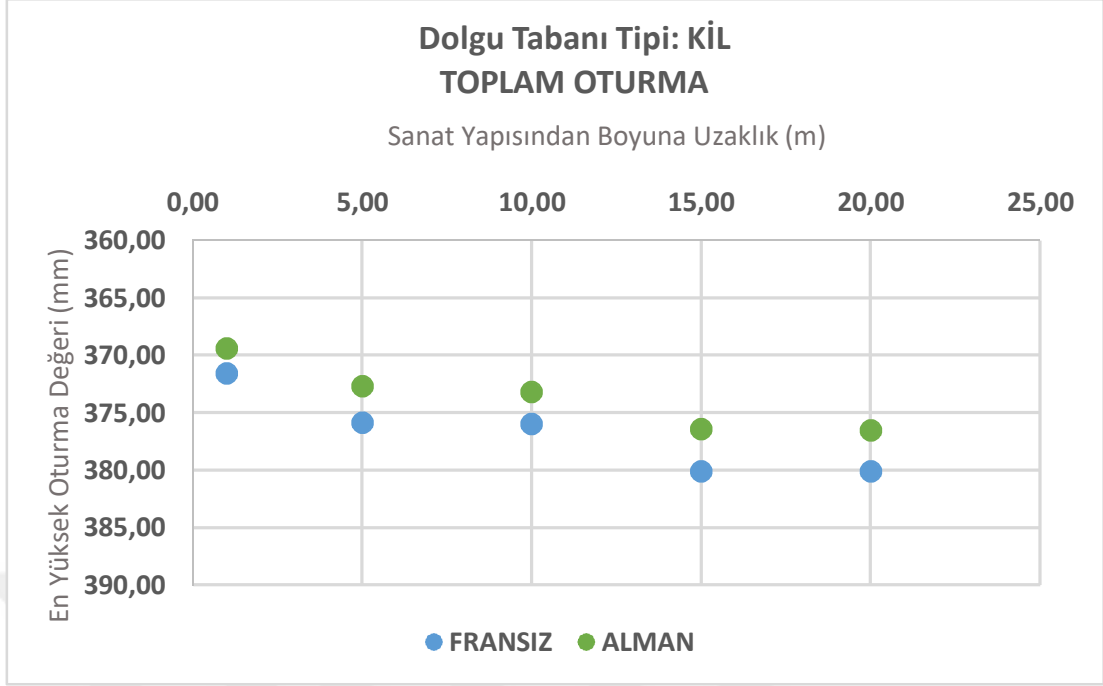
Analiz sonuçları Şekil 6.25 ile Şekil 6.28 arasında verilmiştir.



Şekil 6.25. Kil ortam düşey gerilmeler



Şekil 6.26. Kil ortam toplam yer değiştirmeler



Şekil 6.27. Kil tabanlı yaklaşım dolgularında gerçekleşen toplam oturma değerleri



Şekil 6.28. Kil tabanlı yaklaşım dolgularında enine kesitte gerçekleşen toplam oturma değerleri

6.5. Sonuçlar

Sanat yapısı ile dolgu arasında bulunan iki farklı (Fransız ve Alman) geçiş bölgesinin beklenen oturma dağlımlarının verimlilik açısından değerlendirilmeleri sayısal analiz ile yapılmıştır. 9 m yüksekliğindeki dolgu göz önüne alınarak yapılan değerlendirmelerde farklı zeminler üzerindeki geçiş bölgesi dolgusu boyunca meydana gelen oturma değişimleri irdelenmiştir.

Oturma hesabının sağlıklı olabilmesi için yaklaşım dolgusunun yapılacağı zeminin yerel koşullarının dikkate alınması gerekmektedir. Bu bölgelerde kademeli diferansiyel oturma dağılımının oluşması kaçınılmazdır. Yapılan bu çalışma ile;

1. Eğer dolgu rijit zemin üzerine inşaa ediliyor ise, üzerine gelen yükleme dolayısıyla oluşan oturmalar ihmal edilebilir. Geçiş bölgesi boyunca oluşan oturma dağılımı, beklenildiği gibi kademeli olarak gerçekleşmektedir.
2. Eğer dolgu deforme olabilir orta zemin yapısı (granüler zemin) zerine inşaa ediliyor ise toplam oturmalar geçiş bölgesi altındaki zeminin deforme olabilirdiğine bağlı olarak belirlenmiş olunacaktır. Bu durumda dolgu ağırlığından oluşan oturmalar inşaa sırasında artacaktır. Dış geçici yüklerin oluşturduğu farklı oturmalarından oluşan problemler sıradan bakım işleri yapılarak üzülebilir. Ayrıca bu durumda geçiş bölgesi boyunca oluşacak olan oturmalar kademeli olarak artmakta olup Alman modeli Fransız model tipine nazaran daha iyi performans göstermektedir.
3. Dolgunun kohezyonsuz zeminler üzerine inşaa edilmesi durumunda ise toplam oturma değerleri dışında granüler zemin için yapılan analiz sonuçları ile çok benzerlik göstermektedir. Bu durumda bilindiği gibi göz önüne alınması gereken ana faktör inşaa süresi ile uyumlu olacak oturmanın oluşacağı zamandır. Eğer bu sağlanamıyorsa zemin iyileştirmesi düşünülmelidir.

7. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Ülkemizde Yüksek Hızlı Demiryolu hatlarının yapımıyla güvenli, konforlu, ve hızlı ulaşım imkanı ile sosyal, ekonomik ve ticari hayata olumlu etkiler sağlanacağı aşıkardır.

Konvansiyonel hatlara göre daha özel tasarım kriterlerine sahip olan yüksek hızlı demiryollarının tasarım, yapım ve işletmeciliğinde daha fazla teknik ayrıntı ile birlikte, kısıtlı toleranslardan dolayı daha hassas bir yapı söz konusudur.

İşte bu çalışmada; yüksek hızlı demiryollarının projelendirilmesi ve yapım aşamalarında geoteknik çalışmalar ile, emniyet ve konfor açısından çok önemli olan olan yaklaşım dolgu modelleri ele alınmıştır.

Yüksek Hızlı Demiryollarında Geoteknik Çalışmaların Önemi:

Yüksek hızlı demiryollarının projelendirilmesi ve yapım çalışmaları kapsamında, öncelikle teknik ve ekonomik yönden en uygun güzergahın belirlenebilmesi amacıyla ilk aşamadan itibaren geoteknik çalışmalar başlar ve yapım işlerinin tamamlanmasına kadar hatta işletme aşamasında dahi devam eder.

Güzergah seçimi: Ülkemiz topografyası oldukça engebeli ve değişken olduğu için demiryolu güzergahında tünel, viyadük, yarma- dolgu ve zemim iyileştirme yapıları kaçınılmaz olmaktadır. Bu yapıların yapım ve işletmecilikteki bakım maliyetleri oldukça yüksektir. Öncelikle güzergah seçiminde birden çok alternatif çalışmanın yapılmasında fayda vardır. Bu farklı güzergahların maliyet analizlerinin yapılabilmesi yeterli ve verimli geoteknik çalışmaların yapılması ve sonuçlarının doğru değerlendirilmesine bağlıdır.

Tünel çalışmaları: Tünel açımında maliyeti etkileyen en önemli husus tahkimat sisteminin maliyeti ve yapım zorluğundan kaynaklanan imalat süresidir. Sağlam zeminlerde klasik yöntem (NATM) ile patlatma yapılarak çok hafif tahkimat ile günlük 8 metreye kadar ilerlemek mümkün iken, zayıf zeminlerde makinalı kazı ve

ağır tahkimat ile günlük ilerleme 1 metrenin altına düşebilmektedir. Bunun sonucunda sağlam ve zayıf zeminlerde yapım maliyeti oransal olarak 5-8 kat arasında değişebilmektedir.

Bu sebeple projelendirme aşamasında sağlam bölgelerde tünel aılmasına gayret edilmelidir. Ayrıca geoteknik çalışmalar ile heyelan bölgeleri ve fay zonlarının durumları incelenmeli ve bu bölgelerde her türlü yapının yapılmasından kaçınılmalı yada yüksek emniyet katsayıları ile gerekli önlemler mutlaka alınmalıdır. Stabilit sorunu olabilecek bölgelerden, özellikle yamaçlarda tünel aımından mümkün olduğunca uzak durulmalıdır. Yamalardan dağ içine doğru hattın ötelenmesi stabilit ve heyelan risklerini azaltacaktır. Tünel girişleri oluşturulurken yüksek ve derin tünel portalları yerine dışarıda aç –kapa ve kanopi yapıları yapılarak tünele dışardan başlanılması, stabilit problemlerini büyük lde engelleyerek maliyetlerin düşmesine sebep olacaktır.

Viyadük alışmaları: Viyadük ve köprülerin tasarımında bölgenin depremselliği ve sıvılaşma potansiyeli tasarım ve maliyet açısından büyük önem taşır. Bu amaçla bölgenin deprem derecelendirilmesi belirlenip, fay hatlarının konumu ve sıvılaşma analizleri için gerekli geoteknik çalışmalar sonucunda projelendirme yapılmalıdır. Yapı yüklerinin güvenle zemine aktarılmasını sağlamak için bazen yüzeysel temel, bazen de derin (kazıklı) temel projelendirmeleri için gerekli geoteknik çalışmalar tüm bölgeyi kapsayacak Şekilde yapılmalıdır. Ayrıca en az her ayakta 1 adet olmak üzere sondaj ve arazi deneyleri yapılmalıdır.

Yarmalar: Yarmalarda Şev ve yamaç stabilitesine uygun kazı, inşaat ve uygun destek sistemlerinin belirlenmesi için Şev bölgelerinde gerekli geoteknik çalışmaların yapılması büyük önem arz eder. Şev yapıları atmosferik koşullara açık yapılardır. Donma znme etkileri ile dağılma, yağış etkisi ile doygunlaşıp ağırlaşma ve Şişme etkileri gibi koşullarla uzun yıllar boyunca etkileşim halinde olunacaktır. Bu sebeple ilk tasarım ve yapımda stabil olan yarma Şevlerinde zamanla akma kopma yaşanması durumunda hattın güvenliği risk altında olacaktır. Hat uzun süre kapanabilir veya çok ciddi yer değiştirme hareketlerine maruz kalabilir. Bu gibi durumlarla karşılaşılmaması için öncelikle stabilit problemi olan bölgelerden kaçınılmalı. Kütle hareketlerinin oluştuğu veya oluşabileceği potansiyel ve heyelan alanlarının sınırları, derinliği,

kayma yüzeyi ve kayma mekanizmasının belirlenmesi için gerekli geoteknik çalışmalar yapılmalı.

Dolgular: Hat yapımında kullanılacak malzeme ocaklarının (dolgu, kum-çakıl, taş ve su temin yerlerinin) etütleri, incelenen güzergahın malzeme ihtiyacını eksiksiz, optimum kalitede ve maksimum ekonomi sağlayacak şekilde yapılmalıdır. Dolgu malzemelerinde teknik kriterlerin sağlanması için gerekli her türlü deneyler yapılmalıdır. Demiryolu altyapılarında büyük dolgu işlemlerinin gerçekleştirildiği projelerde en uygun sıkıştırma özelliklerinin seçimi ve yapım sonrası oturmaların sınırlandırılması için uygun malzeme ve serme sıkıştırma parametreleri belirlenmeli. Yüksek dolgular mayiyle birlikte, zemine ilave aşırı yük olarak karşımıza çıkar. Yüksek dolgularda, dolgu tabanı, şev eğimlerinden dolayı hat genişliğinden çok daha fazla alanın kullanılmasına sebep olur. Böylece aşırı yüklerle birlikte özellikle zayıf zeminlerde daha fazla alanın iyileştirilmesi yüksek maliyetler doğurur. Bu sebeplerden dolayı yüksek dolgulardan kaçınılmalıdır.

Zayıf Zeminler: Demiryolu hattının statik yükleri ve tren setlerinin dinamik yükleri altında yeterli taşıma kapasitesi ve duraylılığı olmayan zeminlerin iyileştirilmesi gerekir. Uygun iyileştirme yönteminin belirlenmesi adına, zeminin geoteknik özelliklerinin ortaya konulması için gerekli sonda, arazi ve laboratuvar deneyleri ve jeofizik çalışmaların yeterli seviyede olması gereklidir. Bölgesel olarak değişebilen demiryolu güzergahında her zemin morfolojisi için, zemin iyileştirme yöntem ve parametrelerinin ayrı ayrı belirlenmesi ve uygulanması için, sahada yeteri sıklıkla yukarıda belirtilen geoteknik çalışmaların yapılması önem arz eder. Ayrıca bölgenin deprem, dalga yükleri gibi tekrarlı yükler altındaki temel zeminlerinin göçmeye, sıvılaşmaya karşı tasarımı için gerekli geoteknik çalışmalar yapılmalı.

Menfezlerde Ve Alt Geçitler: Bölgenin yağış- havza ve hidrolojik hesaplarının uygun şekilde yapılabilmesi için geçmiş yağışların verileri uygun periyotlara göre seçilmeli ve geoteknik çalışmalar ile havzanın yüzey – yeraltı akış değerleri oluşturulmalı. Ayrıca yeraltı su seviyesinin tespiti de önemlidir. Menfez ve alt geçitlerin akar kotları tesis edilmelidir. Menfez ve alt geçitlerin tabanlarında zemin iyileştirme gerekiyorsa mutlaka yapılmalıdır.

Yüksek Hızlı Demiryollarında Yaklaşım Dolgularının Önemi:

Yüksek hızlı demiryolu işletmeciliğinde en çok karşılaşılan sorunların başında köprü, viyadük, menfez, altgeçit gibi sanat yapıları yaklaşımlarında, hat yataklarında meydana gelen oturmalaradır. Bu durum işletmecilik altında, bakım onarım maliyetleri, tren operasyonlarındaki gecikmeler vb. gibi nedenlerle maliyet artışlarına neden olmaktadır. Aynı zamanda konfor ve emniyeti olumsuz yönde etkilemektedir.

Yüksek hızlı demiryolu yapımında, zemin çalışmaları ve sanat yapıları arasındaki geçişlerde farklı oturmaları azaltmak ve emniyetli, konforlu, sarsıntısız bir geçiş sağlamak için uygun yaklaşım dolgu modeline karar verilmesi gerekmektedir. Yaklaşım dolgu modelinin belirlenmesinde, yapı kenar ayak tipi (açık, kapalı, alt geçiş, menfez, kazıklı vs.), inşa süreci, hattın işletme hızı, dolgu yüksekliği ve izin verilebilir oturma miktarı dikkate alınmalıdır.

Yaklaşım dolgusuna başlanılmadan önce, dolgunun oturacağı zeminin özelliklerinin belirlenmesi için gerekli geoteknik çalışmalar yapılmalı ve gerekli görülmesi durumunda, uygun zemin iyileştirme yöntemi ile zemin ıslah edilmelidir.

Yaklaşım dolgularının bölgedeki zemin ve demiryolu dinamik yükleri altındaki etkileşimlerinin, deformasyon analizleri, stabilite analizleri, dinamik analizler, zamana bağlı davranış analizleriyle modellenmesi ve sayısal analizler ile ortaya konularak uygun yaklaşım dolgu modelinin yapılmasına karar verilmelidir.

Belirlenen yaklaşım dolgu modelinin yapımında kullanılacak malzemeler teknik şartnamelerdeki değerleri sağlamalı. Malzemenin dayanımı, gradasyonu, su emmesi gibi mekanik özellikleri uygun olmalıdır. Malzemelerin hazırlanması ve istenilen özelliklerde yapım noktasına sevkiyatı mümkün olmalıdır.

Yaklaşım dolgu modellerinin yapım tekniğinde belirtilen tabaka kalınlıkları, tabakalar arası geçişler, serme - sıkıştırma teknikleri, şartnameler dahilinde belirlenmeli ve uygulanmalıdır. Uygulama sonrasında, işletmecilik öncesi ve işletmecilik sırasında kontrolleri ve takibi yapılarak ve gerekli koruma yapıları (drenaj, şev etek duvarı vs.) ile bakımları (malzeme takviyesi, şev koruma, drenaj temizliği vs.) aksatılmamalıdır.

KAYNAKLAR

- [1] <http://www.tr.railturkey.org>, (Ziyaret tarihi: 10 Mayıs 2017).
- [2] <http://www.tcdd.gov.tr>, (Ziyaret tarihi: 22 Mayıs 2017).
- [3] Sivrikaya O., Toğrol E., *Arazi Deneyleri ve Geoteknik Tasarımda Kullanımlar*, Birsen Yayınevi, 1. Baskı, İstanbul, 2009.
- [4] Ergun U., Özkan Y., Önalp A., Keçeli A., *Parsel Bazında Zemin – Temel Etüdlere ve Zemin İyileştirme İşleri Hakkında Yönetmelik Taslağı Ön Raporu*, Afet İşleri Genel Müdürlüğü, 26511, 1-115, 2005.
- [5] Sakaltaş M., *Zemin Etüt Ve Geoteknik Raporların İnşaat Mühendisliği Açısından İrdelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde, 2010, 271405.
- [6] Sivrikaya O., *Zemin Mekaniği-I Laboratuvar Deneyleri*, 1. Baskı, Niğde Üniversitesi Mühendislik Fakültesi, Niğde, 2012.
- [7] Uzuner, B.A., *Temel Zemin Mekaniği*, 1. Baskı, Teknik Yayın Evi, Ankara, 1998.
- [8] Kocaman M., *Zemin Etütlerinde Geoteknik ve Jeofizik yöntemlerin kullanılması ve Dikkatedilmesi Gereken Hususlar*, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya, 2008, 216264.
- [9] Şekercioğlu E., *Yapıların Projelendirilmesinde Mühendislik Jeolojisi*, 4. Baskı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Ankara, 2007.
- [10] Ulusay R., Gökçeoğlu C., Binal A., *Kaya Mekaniği Laboratuvar Deneyleri*, 3. Baskı, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara, 2011.
- [11] Önce G. ve Topal İ., *Kaya Mekaniği Deneyleri*, 1. Baskı, Dumlupınar Üniversitesi, Kütahya, 2005.
- [12] Bieniawski, Z. T., Engineering classification of jointed rock masses, *South African Institution of Civil Engineers*, 1973, **15**, 335-344.
- [13] Bieniawski, Z. T., Geomechanics classification of rock masses and its application in tunneling, *Proc. Third Int. Congress on Rock Mechanics*, Denver, USA, 10-15 June, 1974.
- [14] Bieniawski Z. T., Rock mass classifications in rock engineering, *Proceedings Symposium on Exploration for Rock Engineering*, Rotterdam, Holland, 1976.

- [15] Bieniawski, Z. T., The Geomechanics Classification in Rock Engineering Applications, *Proc. 4th Int. Cong. Rock Mech.*, Montreux, 1979.
- [16] Bieniawski, Z. T., *Engineering rock mass classifications*, 1st ed., John Wiley and Sons, USA, 1989.
- [17] Bieniawski, Z.T., Rock mass classification as a design and in tunnelling, *Tunnels and Tunnelling*, 1988, **20**(7), 19-22.
- [18] Hoek, E., Strength of rock and rock masses, *ISRM News Journal*, 1995, **2**(2), 4-16.
- [19] Akkaş Ü., Sıvılaşma Potansiyeli Ve Etkilerinin Azaltılması, Sakarya Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya, 2006, 181800.
- [20] Das B.M., Fundamental of soil dynamics, *Elsevier Scienc Publishing Co. Inc*, 1983, **11**(1), 353-374.
- [21] Ulusay R., Zemin Sıvılaşması, *TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası, Mavi Gezegen Popüler Yer Bilimleri Dergisi*, 2000, **2**, 47-56.
- [22] Çetin K. Ö., Unutmaz B., Zemin Sıvılaşması ve Sismik Zemin Davranışı, *Türkiye Mühendislik Haberleri*, 2004, **2**, 32-37.
- [23] Ansal A., Erken A., Kumlu zeminlerde sıvılaşma, *Deprem Araştırma Bülteni* 1985, **6**(1), 33-57.
- [24] Lade P.V., Yamamuro, J.A., Remedial measures against soil liquefaction from investigation and design to implement, *Edited by Japanese Geotech. Society, A.A: Balkema*, Rotterdam, Brookfield, 1999.
- [25] Lade P.V., Yamamuro, J.A., Physics and mechanics of soil liquefaction proceeding, *International Workshop On The Physics And Mechanics Of Soil Liquefaction*, Maryland, USA, 1999.
- [26] Seed H. B., Evaluation of soil liquefaction effects on level groundb during earthquakes, *Symposium on soil Liquefaction*, Philadelphia, USA, 1976.
- [27] Pusat, Ö., Sıvılaşmanın Etüdü, İzmir İçin Sismik Risk Analizi ve Sıvılaşma Uygulamaları, Yüksek Lisans Tezi, Dokuz Eylül Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, İzmir, 1989, 5988.
- [28] Vaid, Y.P., Chung, E.K.F., Kuerbıs, R.H., Stress path and steady state, *Canadian Geotechnical Journal*, 1990, **27**(2), **88-96**.
- [29] Çelik S.B., Denizli İl Merkezi Zeminlerinin Jeolojik, Jeoteknik Açından İncelenmesi ve Sıvılaşma Duraylılığının Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Denizli Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Denizli, 2003,136694.

- [30] Paixão A., Eduardo F., Rui C., Transition zones to railway bridges: track measurements and numerical modelling, *Engineering structures*, 2014, **80**(4), 435-443.
- [31] ERRI D 230.1/RP 3, Bridge ends. Embankment Structure Transition, *European Rail Research Institute*, Lisboa, Portugal, 1999.
- [32] Banimahd M., Woodward P.K., Kennedy J., Medero G., Behaviour of train-track interaction in stiffness transitions, *Proc Inst Civ Eng Transp* 2012, **14**(1), 165-205.
- [33] Coelho L. M. G., Structure/Embankment Transitions in Railway Infrastructures, *Behaviour and National and International Practices*, 2015, **22**, 1-10.
- [34] UIC CODE 719 R, Earthworks and track bed for railway lines, *Union Internationale des Chemins de Fer*, Paris, France, 2008.
- [35] Plaxis 8.2, Finite Element Code For Soil Rock Analyses, User Manual, Delf, 2006.
- [36] Örnek M., Laman A., Yıldız A., Demir M., Tekinsoy A., Ankrajlı İksa Sistemlerinin Sayısal Analizi, İnşaat Mühendisleri Odası, <http://www.imo.org.tr/resimler/ekutuphane/pdf/1518.pdf>, (Ziyaret tarihi: 22 Mayıs 2017).
- [37] Altun G., Ankrajlı ve ankrajsız derin kazı iksa sistemlerinin sayısal yöntemler ile analizi, Eskişehir Osmangazi Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Eskişehir, 2013, 337208.
- [38] Brinkgreve R. B. J., *Plaxis Finite Element Code for Soil and Rock Analysis*, 2nd. ed., A.A. Balkema Publishers, Netherland, 2002.

KİŞİSEL YAYINLAR VE ESERLER

Uluslararası bildiriler:

- [1] Mutman U., **Oğul K.**, Evaluation By Numerical Analysis Of Different Approach Filling Type Performance Used On Fast Train Railways, *ICETI International Conference On Engineering Technology And Innovation*, Sarajevo Bosnia and Herzegovina, 22-26 March 2017.
- [2] Poşluk E., **Oğul K.**, The evaluation of support performance for tunnels with different diameters excavated in weak graphitic shists, *EGU General Assembly*, Vienna, Avustria, 12-17 April 2015.
- [3] Poşluk E., **Oğul K.**, Topal İ., Tünellerde Karstik Boşlukların Geçilmesi: Ankara-İstanbul YHT Projesi 19 nolu Tünel Örneği, *23rd World Mining Congress & Expo*, , Antalya, Türkiye, 11-13 Mayıs 2013.
- [4] Poşluk E., Topal İ., **Oğul K.**, Aksoy C.O., Apaydın Poşluk E., Gıcır A., Özer S.C., Underground water problem in Ankara-Istanbul high speed railway construction tunnel no:36, *Eurock 2012, ISRM International Symposium*, Stockholm, Sweden, 28-30 May 2012.
- [5] Poşluk E., Topal İ., **Oğul K.**, Gıcır A., Poşluk E.A., Bilecik earthquake effect (11 July Mw=4,7) of Ankara – Istanbul high speed railway Project the tunnel 15, *World Tunneling Congress 2012*, Bangkok, Thailand, 20-22 May 2012.
- [6] Topal İ., **Oğul K.**, Poşluk E., Gıcır A., Specification and Supports of Tunnels in Ankara – İstanbul High Speed Railway Project, *International Symposium Practices and Trends for Financing and Contracting Tunnels and Underground Works*, Athens, Greece, 22-23 March 2012.
- [7] Topal İ., Gıcır A., **Oğul K.**, Aksoy C.O., Poşluk E., Özer S.C., Özacar V., 2011, Preparation work for TBM excavation on the Ankara-İstanbul high speed train project no 26 tunnel, *22nd World Mining Congress & Expo*, İstanbul, 11-16 September 2011.

Uluslararası makaleler (Expanded SCI Kapsamındaki yayınlar)

- [1] Aksoy C.O., Uyar Aldas G., Poşluk E., **Oğul K.**, Topal İ., Kucuk K., Non-deformable support system application at tunnel-34 of Ankara-Istanbul high speed railway Project, *Structural Engineering and Mechanics*, 2016, **58**(5), 869-886.

- [2] Aksoy C.O., **Oğul K.**, Topal İ. Poşluk E., Gicir A., Kucuk K., Uyar Aldas G., Reducing deformation effect of tunnel with Non-Deformable Support System by Jointed Rock Mass Model, *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2014, **40**, 218-227.
- [3] Aksoy C.O., **Oğul K.**, Topal İ., Özer S.,C., Ozacar V., Poşluk E., 2012, Numerical modeling of non-deformable support in swelling and squeezing rock, *International Journal of Rock Mechanics & Mining Sciences*, 2012, **52**, 61-70.

Yurt içi hakemli dergilerde yayınlanmış yayınlar:

- [1] **Oğul K.**, Topal İ., Poşluk E., Ankara - İstanbul Yüksek Hızlı Tren Demiryolunda Balast Hammaddesi Olarak Granit ve Bazaltın Birlikte Kullanılabilirliğinin Araştırılması ve Aşınma Dayanımlarına Etkisi, *MT Bilimsel, Yer altı Kaynakları Dergisi*, 2012, **1**, 81-89.

Ulusal bildiriler:

- [1] Poşluk E., **Oğul K.**, Çelik M., Balak E., Heyelanlı bölgelerde tünel güzergah çalışmaları, *67. Jeoloji Kurultayı*, Ankara, Türkiye, 14-18 Nisan 2014.
- [2] Poşluk E., Korkaç M., Gicir A., **Oğul K.**, Yüksek Hızlı tren tünellerinde alt yapı güvenlik önerileri, *1. Uluslar arası Raylı Sistemler Mühendisliği Çalıştayı (IWRSE'12)*, Karabük, Türkiye, 11-13 Ekim 2012.
- [3] Topal İ., Poşluk E., **Oğul K.**, Poşluk E.A., Akdaş H., Aksoy C.O., Aygar E.B., 2011, Ankara-İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesinde Bilecik İstasyon Şevleri tasarımı ve sayısal analizi, *KAYAMEK' 2011- X. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 8-9 Aralık 2011.
- [4] Poşluk E., **Oğul K.**, Topal İ., Korkaç M., Aygar E.B., 2011, Tünellerde zayıf kaya davranışı, Ankara – İstanbul Yüksek Hızlı Tren Projesi 34 nolu tünel örneği, *KAYAMEK' 2011- X. Bölgesel Kaya Mekaniği Sempozyumu*, Ankara, Türkiye, 8-9 Aralık 2011.

ÖZGEÇMİŞ

1981 yılında Eskişehir’de doğdu. İlk ve orta eğitimini Eskişehir’de tamamladı. 1998 yılında Türkiye Cumhuriyeti Devlet Demiryolları Meslek Lisesinden mezun oldu. 2003 yılında Dumlupınar Üniversitesi Maden Mühendisliği Bölümünden mezun oldu. 2005 Yılında Eskişehir Osmangazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği Anabilim Dalı’nda Yüksek Lisans öğrenimini tamamladı. 2009 yılından beri Yüksek Hızlı Demiryolu Yapım işlerinde görev yapmaktadır.

