İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AYAZAĞA SU TÜNELİNDE YAPILAN KONSOLİDASYON ENJEKSİYONU İLE KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN JEOİSTATİSTİKSEL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Faruk KAP

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

OCAK 2014

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AYAZAĞA SU TÜNELİNDE YAPILAN KONSOLİDASYON ENJEKSİYONU İLE KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN JEOİSTATİSTİKSEL ANALİZİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Ömer Faruk KAP
(505111007)

Maden Mühendisliği Anabilim Dalı

Maden Mühendisliği Programı

Tez Danışmanı: Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR

OCAK 2014

İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 505111007 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Ömer Faruk KAP**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı **"AYAZAĞA SU TÜNELİNDE YAPILAN KONSOLİDASYON ENJEKSİYONU İLE KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN JEOİSTATİSTİKSEL ANALİZİ"** başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR** .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Ataç BAŞÇETİN** .....
İstanbul Üniversitesi

Yrd. Doç. Dr. Cüneyt Atilla ÖZTÜRK .....
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **10 Aralık 2013**
Savunma Tarihi : **21 Ocak 2014**

ÖNSÖZ

'Ayazağa Su Tünelinde Yapılan Konsolidasyon Enjeksiyonu İle Kaya Kütlesi Özellikleri Arasındaki İlişkinin Jeoistatistiksel Analizi' adlı bu çalışma, her bilimsel çalışmada olması gerektiği gibi çalışmanın içeriğini denetleyen akademik ölçütler ve çalışmanın dış organizasyonunu betimleyen biçimsel ölçütler dikkate alınarak hazırlanmıştır.

Bu çalışmada temel düşünce, çok bilinmeyenli bir yapıya sahip olan kaya kütlesi özelliklerini enjeksiyon verileri kullanılarak farklı bir bakış açısıyla jeoistatistiksel yönden incelemek daha sonraki çalışmalara kaynak ve yardımcı olabilecek önemli hususları ortaya çıkarmaktır.

Tez çalışması boyunca birçok kişi ile görüşülüp çeşitli konularda yardımları alındığından bu çalışmanın tamamlanmasında yardımları olduğunu düşündüğüm kişilere teşekkürü borç bilirim.

Öncelikle, tez çalışmam boyunca tüm bilgi birikimi ve tecrübesini benden esirgemeyen, bilimsel içeriğin oluşturulmasında yardım ve katkılarda bulunan, değerli önerileriyle daima yönlendirici olan Tez Danışmanım Sayın Doç. Dr. Hakan TUNÇDEMİR'e tüm içtenliğimle teşekkürlerimi sunarım.

Araştırma sürecinde sağlamış olduğu imkânlar ve yardımlarından dolayı DSİ Maden Mühendisi Ural Tolga SEYHAN'a teşekkür ederim.

Ayazağa Tüneli çalışmaları hakkında vermiş olduğu bilgilerden dolayı Alke İnşaat Sanayi ve Ticaret A.Ş. bünyesinde görev alan Jeoloji Mühendisi Özgür AYÇİL'e ve Jeoloji Mühendisi Alper SARIYILDIZ'a teşekkür ederim.

Tez çalışmam boyunca maddi ve manevi desteklerini esirgemeyen aileme ve hep yanımda olan eşim Sevinç KESKİN'e sonsuz teşekkürlerimi sunarım.

Ocak 2014

Ömer Faruk KAP
(Jeoloji Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **xi**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xiii**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xv**
ÖZET ..... **xvii**
SUMMARY ..... **xix**
1. GİRİŞ **1**
1.1 Tezin Amacı 2
1.2 Literatür Araştırması 3
1.3 Hipotez 3
1.4 Yöntem 3
2. KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİ **7**
2.1 Giriş 7
2.2 Sınıflama Sistemlerinin Amacı ve Önemi 9
2.3 Q Sınıflama Sistemi 10
2.3.1 Blok boyutu (RQD/J_n) 12
2.3.1.1 Kaya kalite göstergesi (RQD) 12
2.3.1.2 Eklem takımı sayısı (J_n) 14
2.3.2 Bloklar arası makaslama dayanımı (J_r/J_a) 14
2.3.2.1 Eklem pürüzlülük sayısı (J_r) 14
2.3.2.2 Eklem alterasyon sayısı 15
2.3.3 Etkin gerilmeler (J_w/SRF) 16
2.3.3.1 Eklem su azaltma faktörü (J_w) 17
2.3.3.2 Gerilme azaltma faktörü (SRF) 17
3. ENJEKSİYON **19**
3.1 Giriş 19
3.2 Enjeksiyon Uygulamasının Tarihçesi 21
3.3 Enjeksiyon İşlemi 22
3.4 Enjeksiyon Türleri 24
3.4.1 Yapıldığı yere göre enjeksiyon türleri 25
3.4.1.1 Perde enjeksiyonu 25
3.4.1.2 Rezervuar enjeksiyonu 26
3.4.1.3 Temel enjeksiyonu 26
3.4.1.4 Tünel enjeksiyonu 26
3.4.2 Uygulanan enjeksiyon basıncına göre enjeksiyon türleri 27
3.4.2.1 Alçak basınçlı enjeksiyon 27
3.4.2.2 Orta basınçlı enjeksiyon 27
3.4.2.3 Yüksek basınçlı enjeksiyon 28

3.4.3 Yapılış yöntemlerine göre enjeksiyon türleri 28
3.4.3.1 Tek kademeli enjeksiyon 28
3.4.3.2 Çok kademeli enjeksiyon 28
3.4.4 Enjeksiyon kuyularının geometrik konumuna göre enjeksiyon türleri 30
3.4.5 Enjeksiyonda kullanılan karışım maddelerine göre enjeksiyon türleri 30
3.4.5.1 Çimento enjeksiyonu 30
3.4.5.2 Kimyasal enjeksiyon 30
3.5 Enjeksiyon Teknikleri 31
3.5.1 Çatlatma enjeksiyonu 31
3.5.2 Emdirme (permeasyon) enjeksiyonu 32
3.5.3 Kompaksiyon enjeksiyonu 32
3.5.4 Jet enjeksiyonu 33
3.6 Enjeksiyon Malzemesi 34
3.6.1 Su 35
3.6.2 Çimento 35
3.6.3 Dolgu malzemeleri 35
3.6.4 Katkı maddeleri 36
3.7 Enjeksiyon Ekipmanları 37
3.7.1 Karıştırıcı ve çalkalayıcı 37
3.7.2 Enjeksiyon pompası 39
3.7.3 Manometre 39
3.7.4 Tıkaçlar 40
4. AYAZAĞA TÜNELİ 41
4.1 Giriş 41
4.2 Konum 42
4.3 Genel Jeoloji 43
4.4 Tünel Tahkimat Tipleri 44
4.4.1 Tahkimat tipi I 45
4.4.2 Tahkimat tipi II 45
4.4.3 Tahkimat tipi III 46
4.4.4 Tahkimat tipi IV 46
4.4.5 Tahkimat tipi V 47
4.5 Ayazağa Tüneli Enjeksiyon Çalışması 47
4.5.1 Enjeksiyon işlemi 47
4.5.2 Kullanılan ekipmanlar 53
5. JEOİSTATİSTİK 55
5.1 Giriş 55
5.2 Kullanılan Yöntem 55
5.2.1 Tanımlayıcı istatistik 56
5.2.2 Variogram 58
5.2.3 Variogram model seçimi 64
5.2.4 Kriging 66
5.2.5 Haritalandırma 75
5.3 Sonuç 75
6. BULGULAR VE TARTIŞMA 77
6.1 Enjeksiyon Miktarları İle Enjeksiyon Delik Seviyelerinin İlişkisi 77
6.2 Enjeksiyon Miktarları İle RQD ve Q İlişkileri 78
6.3 Gerçek Veriler İle Çoğaltılmış Verilerin Regresyon Analizi 80
6.4 Çoğaltılmış Enjeksiyon Verileri İle Q İlişkisi 81
7. SONUÇ VE ÖNERİLER 83

KAYNAKLAR 87
EKLER..... 93
ÖZGEÇMİŞ..... 107

KISALTMALAR

ABD **:** Amerika Birleşik Devletleri
DSİ **:** Devlet Su İşleri
NATM **:** New Australian Tunneling Method
NGI : Norvegian Geotechnical Institute
PÇ : Portland Çimentosu
RMR : Rock Mass Rating System
RQD : Rock Quality Designation
SRF : Strength Reduction Factor
TBM : Tunnel Boring Machine
TSE : Türk Standardları Enstitüsü
UDK : Uygunluk Değerlendirme Kuruluşu

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Günümüze kadar geliştirilmiş kaya kütlesi sınıflamaları. 8
Çizelge 2.2 : Q sınıflama değerleri ve tanımları. 12
Çizelge 2.3 : RQD değerleri ve tanımı. 13
Çizelge 2.4 : Eklem takımı sayısı. 14
Çizelge 2.5 : Eklem pürüzlülük sayısı. 15
Çizelge 2.6 : Eklem alterasyon sayısı. 16
Çizelge 2.7 : Eklem su azaltma faktörü değerleri. 17
Çizelge 2.8 : Gerilme azaltma faktörü değerleri. 18
Çizelge 3.1 : Enjeksiyon çeşitleri. 25
Çizelge 3.2 : Çimento katkı maddeleri. 37
Çizelge 4.1 : SP-6 Cumhuriyet terfi deposu-kağıthane isale hattı bilgisi. 41
Çizelge 4.2 : Q değerleri, kazı tipleri, kazı uzunlukları. 44
Çizelge 4.3 : Günlük enjeksiyon raporu örneği. 52
Çizelge 5.1 : 3 nolu delik için jeoistatistik verileri. 57
Çizelge 5.2 : 3 nolu delik için 8 ve 9 nolu noktalar arası uzaklık. 59
Çizelge 5.3 : 3 nolu delik için lag class 1 listesi. 60
Çizelge 5.4 : 3 nolu delik için lag class 2 listesi. 61
Çizelge 5.5 : 3 nolu delik için lag class 3 listesi. 62
Çizelge 5.6 : 3 nolu delik için lag class 4 listesi. 63
Çizelge 5.7 : Bilinen noktalar ile bilinmeyen nokta arasındaki variogram fonksiyonu denklemleri. 67
Çizelge 5.8 : Mesafe matrisi. 69
Çizelge 5.9 : Değerler matrisi. 70
Çizelge 5.10 : Hesaplanmış küresel variogram değerlerinin denklemlerde gösterimi. 71
Çizelge 5.11 : Katsayılar (A), sonuç (C) ve bilinmeyen ağırlık (B) matrisleri. 72
Çizelge 5.12 : Kriging ile hesaplanan T noktasındaki enjeksiyon miktarı. 73
Çizelge 5.13 : Mesafenin tersi yöntemiyle bulunan T noktası için enjeksiyon değeri. 74
Çizelge 6.1 : Enjeksiyon deliklerinin listesi. 77
Çizelge 6.2 : RQD – Q – Enjeksiyon miktarı tablosu. 79
Çizelge 7.1 : Gerçek veriler ile çoğaltılmış veriler arasındaki katsayılar tablosu. 85

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Çalışma yöntemi akış şeması. 5
Şekil 2.1 : RQD hesaplanma yöntemi. 13
Şekil 3.1 : Başlıca enjeksiyon uygulamaları (U.S.Army, 1984). 20
Şekil 3.2 : Enjeksiyon donanımlarının bağlantı sırası (Craelius, 1990). 24
Şekil 3.3 : Yükselen kademe enjeksiyon. 29
Şekil 3.4 : Alçalan kademe enjeksiyon. 30
Şekil 3.5 : Enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi. 31
Şekil 3.6 : Çatlatma enjeksiyonu ile oluşan çatlaklar ve yatay sıkıştırma. 32
Şekil 3.7 : Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi. 33
Şekil 3.8 : Jet enjeksiyonu işlemi. 34
Şekil 3.9 : Karıştırıcı ve çalkalayıcının şematik gösterimi. 38
Şekil 3.10 : Enjeksiyon pompası. 39
Şekil 3.11 : Manometre 40
Şekil 3.12 : Tıkaç (paker). 40
Şekil 4.1 : Büyük İstanbul II. Merhale Melen Sistemi. 41
Şekil 4.2 : Ayazağa Tüneli kesiti ve topoğrafya. 42
Şekil 4.3 : Ayazağa Tüneli'nin konumunun uydu görüntüsü. 42
Şekil 4.4 : Tahkimat tipi I boy ve en kesiti. 45
Şekil 4.5 : Tahkimat tipi II boy ve en kesiti. 45
Şekil 4.6 : Tahkimat tipi III boy ve en kesiti. 46
Şekil 4.7 : Tahkimat tipi IV boy ve en kesiti. 46
Şekil 4.8 : Tahkimat tipi V boy ve en kesiti. 47
Şekil 4.9 : Ayazağa Tüneli'ne yerleştirilen çelik su boruları. 48
Şekil 4.10 : Çelik boru ile tünel arası dolgu betonu. 48
Şekil 4.11 : Enjeksiyon akım şeması (Bahçivan, 2011). 49
Şekil 4.12 : Ayazağa Tüneli'nde yapılan konsolidasyon enjeksiyonun şematik gösterimi. 49
Şekil 4.13 : Bir anonun 3 boyutlu görünümü ve delik düzeni. 50
Şekil 4.14 : SMS marka rotary sondaj makinesi. 53
Şekil 4.15 : Karıştırıcı ve Clivio marka enjeksiyon pompası. 53
Şekil 4.16 : Kuyu manometresi. 54
Şekil 4.17 : Mekanik paker. 54
Şekil 5.1 : Kullanılan yöntem akım şeması (Tunçdemir H. , 2010). 56
Şekil 5.2 : Tünel en kesiti üzerinde enjeksiyon deliklerinin numara ve konumları. 56
Şekil 5.3 : Tüneldeki teorik X ve Y eksenleri. 57
Şekil 5.4 : 3 nolu delik için verilerin noktasal dağılımı. 57
Şekil 5.5 : 3 nolu delik verilerinin tanımlayıcı istatistik analizi. 58
Şekil 5.6 : 3 nolu delik için variogram dağılımı grafiği. 63
Şekil 5.7 : Küresel model variogram grafiği. 64
Şekil 5.8 : 3 nolu delik için variogram grafiği ve parametreleri. 65

Şekil 5.9 : Kriging işleminde ele alınan noktalar ve hesaplanacak nokta..... 67
Şekil 5.10 : Ham ve oluşturulan verilerin aynı grafik üzerinde görünümü. 75
Şekil 6.1 : Enjeksiyon miktarlarının delik seviyesine göre dağılımı (Tunçdemir & Kap , 2013). 78
Şekil 6.2 : RQD ile Enjeksiyon miktarı ilişkisi. 79
Şekil 6.3 : Q değeri ile enjeksiyon miktarı ilişkisi. 80
Şekil 6.4 : 3a nolu deliğin enjeksiyon miktarlarının regresyon grafiği. 81
Şekil 6.5 : 3a nolu delik için enjeksiyon hacminin Q değerine göre değişimi. 81

AYAZAĞA SU TÜNELİNDE YAPILAN KONSOLİDASYON ENJEKSİYONU İLE KAYA KÜTLESİ ÖZELLİKLERİ ARASINDAKİ İLİŞKİNİN JEOİSTATİSTİKSEL ANALİZİ

ÖZET

Bu çalışmada, tünel tahkimatı ile kaya kütlesi arasında kalan boşlukların doldurulması amacıyla yapılan konsolidasyon (pekiştirme) enjeksiyonu uygulaması jeoistatistiksel açıdan irdelenerek analiz edilmiştir. Enjeksiyon verileri ile zayıf kaya kütlesi arasındaki ilişki incelenerek ortaya çıkan sonuçlar detaylı olarak raporlanmış ve yorumlanmıştır.

Çalışma sahası olarak, 'Melen Suyu Projesi' kapsamında 'SP-6 Cumhuriyet Terfi Deposu-Kağıthane Arası İsale Hattı' etabında bulunan Ayazağa Tüneli incelenmiştir. Bu tünel delme-patlatma yöntemi kullanılarak açılmıştır. Her adımda kazı aynasından faydalanarak Q kaya sınıflama değerleri kaydedilmiştir. Önceden belirlenmiş tahkimat tipi tablosuna bakılarak Q değerine göre tahkimatın yapılmasının ardından su taşıyacak olan çelik borular yerlerine yerleştirilmiştir. Çelik boru ile tünel arasında kalan kısım dolgu betonu ile doldurulmuştur. Ortamın stabilitesini sağlamak için ise tahkimat ile kayaç arasındaki boşluklar ve çatlaklar konsolidasyon enjeksiyonu yapılarak doldurulmuştur. Kazı esnasında elde edilen jeolojik parametreler ile enjeksiyon sırasında elde edilen enjeksiyon verilerinden faydalanılarak kaya kütlesi kalitesi ile basılan enjeksiyon miktarı arasındaki ilişki jeoistatistik methoduyla detaylı bir şekilde incelenmiştir.

Çalışmaya ilk olarak, literatür araştırmaları ile önceki çalışmalar incelenerek başlanmıştır. Bu kapsamda Q kaya kütle sınıflandırması, enjeksiyon uygulamaları, çalışma sahasının jeolojisi ve jeoistatistik konuları detaylı olarak incelenmiştir. Ayazağa Tüneli'nde çalışmaları gerçekleştiren firmanın proje yetkilileriyle görüşülerek çalışmalar yerinde gözlemlenmiş, gerekli bilgiler edinilmiş ve mevcut veriler alınmıştır.

Ayazağa Tüneli, projenin 20+586,96 ile 18+009,91 km'leri arasında bulunmaktadır. Fakat elde edilen veriler 20+583 - 20+229 ve 19+389 - 18+256 km'leri arasını kapsamaktadır. Veri olarak, bu km'ler arasında bulunan ayna profili haritaları ve enjeksiyon raporlarındakilerden faydalanılmıştır. Jeoistatistiksel yöntem kullanılarak mevcut veriler yüksek doğruluk oranı ile istenilen miktarda çoğaltılmıştır. Bu sayede inceleme daha detaylı ve sağlıklı bir şekilde gerçekleştirilebilmiştir.

Elde edilen bulgular incelendiğinde, çelik boruların tepesindeki deliklerde basılan enjeksiyon miktarları en yüksek, orta kısımdaki deliklerde orta, taban kısımdaki deliklerde ise en düşük olduğu görülmüştür. Bunun sebebi de, tünel kazısı sonrasında tünelin üstünde kalan kısmın tünele doğru akma isteğiyle gevşemesi daha boşluklu bir yapı meydana getirmesindendir.

Ayrıca, konsolidasyon enjeksiyonunun kaya kütlesi özelliklerine göre değişimini tespit edebilmek amacıyla kaya kütle sınıflaması değeri olan Q Tünelcilik indeksi ve kaya kalitesi değeri olan RQD parametreleri ile enjeksiyon miktarı arasındaki ilişki irdelendiğinde kaya kütlesinin kalitesi arttıkça bünyesine giren enjeksiyon miktarının azaldığı görülmüştür.

Sonuç olarak, konsolidasyon enjeksiyonunun kaya kütlesi özelliklerine göre değişiminin tespiti için kaya kütle sınıflama değeri olan Q ve kaya kalitesi değeri olan RQD parametreleri ile enjeksiyon miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir. Enjeksiyon miktarının kaya kütlesi özelliklerine göre değişimini daha detaylı görebilmek için her enjeksiyon deliği kendi içerisinde incelenmesi doğru bir yönlenme olacaktır. Bunun için enjeksiyon miktarlarının metraja bağlı olarak dağılımından faydalanılmalıdır. Fakat mevcut verilerin mesafeye göre homojen dağılmış olmaması ve aynı metrajlara denk gelmemesi sebebiyle öncelikle jeoistatistik yöntemi kullanılarak mevcut verilerin miktarı yüksek doğruluk oranıyla çoğaltılmış ve aynı metrajlara denk gelen veriler birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Böylece örnekleme çerçevesi arttırılarak daha detaylı inceleme gerçekleştirilebilmiştir. Bu sayede enjeksiyon delikleri ayrı ayrı değerlendirilerek Q değerleri ile enjeksiyon miktarları arasındaki ilişkiyi göstermek amacıyla çizilen grafikler incelendiğinde bu iki parametrenin eğilim çizgilerinin zıt yönde olduğu görülmüştür. Bu da kaya kütle kalitesi azaldıkça enjekte edilen enjeksiyon miktarının arttığını görsel olarak doğrulamaktadır.

GEOSTATISTICAL EVALUATION OF RELATION WITH ROCK MASS PROPERTIES AND CONSOLIDATION GROUT CARRIED OUT IN AYAZAGA WATER CONDUIT TUNNEL

SUMMARY

For past few decades, demands in underground structures, what mainly is transport and energy industry, have increased because of economical, social and environmental causes in Turkey like other developing countries. This case makes tunneling become important issue. Tunneling is the common work field for several disciplines such as geological, mining and civil engineering.

Since 1990s population has increased in Istanbul due to immigration. It causes imbalance between demanding and supplying water. To solve this main problem, 'Melen Water Project' was created. With this project, the water of Melen River in Düzce where is 17 km far from Istanbul will be transported by steel pipes in underground. Thus, permanent solution will be made against public demands and seasonal droughts.

The study field is Ayazağa Tunnel where is a part of 'SP-6 Cumhuriyet Terfi Deposu-Kağıthane Arası İsale Hattı' in 'Melen Water Project'. Ayazağa tunnel is a water conduit tunnel with a length of 2557m and a steel pipe diameter of 4m. Tunnel move upward by an inclination of 0.08% since it has 2m elevation between starting and ending points of tunnel. Overburden thickness of tunnel is 90m in average. Tunnel is projected by a final flow capacity with 32 m^3/sec. (DSİ, 2010).

Tunnel geologic units covered Devonian Kartal, Carboniferaus Thracian, Neogen Belgrad, Kuaterner Aluvional Formations as well as diabase and andesite dykes (Emiroğlu, 2010).

New Austrian Tunnelling Method (NATM) was used for tunnel excavation and supports. Conventional drilling and blast method is selected for loosening and excavating rock. If the blasting method is not allowed, a hydraulic breaker is practiced for extracting weak formation.

Q values were found out by recording data collected from face profiles by geologists. The Q classification is performed for the determination of rock classes, face penetration length in every cycle, maximum stand up times and, support type selection. A cross sectional view of face is drawn in a paper sheet. Then, all parameters related to calculate Q were filled out and evaluated on the paper as a report. Up to them, 5 different support types were fixed into tunnel perimeter and beyond. Steel pipes transferring water were inserted into tunnel after supporting process completed. After that, filling grouting was injected into the clearance between tunnel support and steel pipe. Moreover, by an aim at stabilization on the geological environment that includes voids and cracks, consolidation grout application was performed between tunnel support and rock mass. While excavating

it, geological and grouting data were recorded, and by using this data, the relationship between rock mass quality and amount of the grout volume was studied by geostatistical method (Tunçdemir & Kap, 2013).

In this study, consolidation grout applied for filling voids between tunnel support and geological formation is analysed geostatictically. A relation with grouting data and geological parameters are examined. Eventually, results are recorded in detail and evaluated for interpretation.

Main aim is to examine geological study, excavation, supporting, consolidation grouting application in Ayazağa tunnel, then to prove effects of rock mass parameters on grouting amount and choosing support type. Therefore, the results obtained in this study will be useful for the following projects in the future.

Past studies in same field are investigated to make researcher's view wider. For this study, there are some past studies is giving below:

Bieniawski (1989) stated that RMR rock mass classification value and tunnel supporting types have opposite relation because supporting type and quantity increase with decrease of rock mass quality.

Another study by Grimstad and Barton (1993) shows that Q rock mass classification value and tunnel supporting types have opposite relation because supporting type and quantity increase with decrease of rock mass quality.

Bahçivan (2011) also observed that rock mass quality and consolidation grouting have obvious relation. To this study, this relation is opposite between Q rock mass classification value and grout amount injected rock mass, so grout amount increases with getting worse geological conditions.

All these studies were examined in detail that causes drawing way to right direction for researcher. Hypothesis is whether consolidation grout amount depends on geological parameters and their relation is opposite. Grout amount injected into voids and cracks increases with a decrease quality of rock mass. The study and research were carried out with this view to prove hypothesis.

At the beginning, a literature survey carried out and previous studies were found out. Q rock mass quality classification, grouting methods, geology of study field, and geostatistical estimation was clearly documented. Necessary and avaliable data were collected and injection process in Ayazağa Tunnel were examined well by the help of the engineers of contractor company.

Ayazağa Tunnel settles on kilometers between 20+586,96 and 18+009,91 of Melen Project. However, the data collected includes the kilometers between 20+583 and 20+229 , 19+389 and 18+256. In these kilometers, tunnel face profile maps and grouting reports were recorded. By geostatistical method, the data in hand were multiplied for an assesment with high accuracy, so that it is able to study in detail and accurately.

In study field, there are 589 grouting holes that were examined. For this area Q rock mass classification value changes between 0,25 and 0,027. It means geological conditions are very poor and extremely poor. Based upon analyses of records, it is

shown that amount of the grout volume injected into the top holes of steel pipe was high. However, amount of grout volume in middle level of steel pipe is less than them and in the bottom of steel pipe is the least. This situation shows that rock mass loads tends to move down from crown to bottom of tunnel after excavation, this is because some spaces is experienced on the crown of tunnel.

Geostatistical process was first proposed by Matheron in 1971 based on regionalized variable theory. It uses global x and y coordinates pointing out the areal variables. In these coordinates, whatever it is, a z parameter map is plotted by using known values coordinates. Geostatistical calculation actually focuses on evaluating values of points where its values are unknown from those where its values are known in a coordinated area. It is generally used for reserve estimation of underground mines from well logs. Besides, it was used in tunneling activities such as determination of settlement map of a sewerage tunnel in Istanbul (Tuncdemir et al. 2011). Numerous studies have emerged in various sciences so far.

In this thesis on Ayazağa conduit tunnel, 2D geostatistical analysis is performed for every drilling holes with respect to their x and y coordinates and their AIV Values by using Tercan & Saraç (1988) concept because Q values and hole coordinates are randomly intersected. By using 2D geostatistical estimation technique the number of AIV values can be multiplied and these new estimated values coordinates definitely overlap on Q values coordinates. Hence, one can compare and interpret same coordinated values.

Each grouting hole number has about 50 different grouting points and its datas. 50 datas could be increased to 1200 datas multiplied with geostatistical method. To prove the accuracy of this multiplication process, regression analysis was carried out between origin datas and multiplied datas. Regression graphics shows that most of correlation coefficients are very close to 1. It proves that multiplication process was highly accurate.

To observe the changes of consolidation grout volume to rock quality, the relation of consolidation grout between Rock Mass Quality Classification (Q) and Rock Quality Designation (RQD) was analysed. What the correct way to see this relation in detail is examining each injection hole separately. For that reason, distribution of grout data for all range is needed. However, because of inhomogeneous distribution of it and not to be Q and injection datas in same meters, geostatistic method was used. In this way, datas can be multiplied with high accuracy as much as needed. Then Q and injection datas get in same meters. Thus, it can be possible to examine in detail by spreading sample set. After all this process, it is shown that amount of consolidation grout has an inverse relationship between Rock Mass Quality Classification (Q) and Rock Quality Designation (RQD). It means that grout volume injected increases with a decrease on rock mass quality.

Moreover, examining injection holes seperately and putting data in Q and grout volume, trend lines of these two parameters shows opposite direction. It is visually stated that rock mass quality increases with a decrase on amount of grout volume.

1. GİRİŞ

Son yıllarda, gelişmekte olan ülkelerdeki gibi Türkiye'de de ekonomik, sosyal ve çevresel nedenlerle yer altı yapılarına olan ihtiyaç -ulaşım ve enerji sektörü başta olmak üzere- birçok alanda artmıştır. Bu durum tünelcilik konusunu önemli bir noktaya taşımaktadır. Tünelcilik, çalışma koşulları nedeniyle jeoloji, maden ve inşaat mühendisliği gibi farklı disiplinlerin ortak çalışma alanıdır (Solak, 2009).

Yatay ya da az eğimli, yapay yeraltı geçitlerine "tünel" denir. Tünellerin ana kullanım amaçları motorlu taşıt, metro ve demiryolu ulaşımı ve su veya atık su iletimidir. Bunların dışında yaya geçişleri, baraj inşasında derivasyon kanalları, enerji hatları geçişi gibi birçok özel amaca yönelik açılan tüneller mevcuttur.

Tünel teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak tünel uygulama yöntemleri de gelişmektedir. Tünel uygulama yöntemleri, tünel güzergahının topoğrafyası, jeolojik özellikleri ve tünel geometrisi gibi parametreler değerlendirilerek belirlenir. Günümüzde tünel uygulamaları, Aç-kapa yöntemi, Tünel açma makineleri (kısmi ve tam mekanize tünel açma makineleri) kullanılan yöntem, Batırma Tüp Tünel yöntemi ve Delme-patlatma (klasik) yöntemi olarak sıralanabilir (Ünlütepe, 2003).

1990'lardan itibaren dikkat çekici şekilde yoğun göç alan İstanbul'da suyun arz ve talep dengesinde meydana gelen eksikliği gidermeye yönelik geliştirilen 'Melen Suyu Projesi' adı altında 'Büyük İstanbul II. Merhale Melen Sistemi' ile evsel tüketimin yanı sıra büyüyen sanayinin su ihtiyacının artmasına ve yaşanan dönemsel kuraklıklarla ortaya çıkan su krizine Düzce ilinde bulunan Melen Çayı'ndan faydalanarak kalıcı bir çözüm bulunması amaçlanmaktadır (DSİ, 2012).

Bu çalışmada projenin 'SP-6 Cumhuriyet Terfi Deposu-Kağıthane Arası İsale Hattı' etabında bulunan Ayazağa Tüneli incelenmiştir. Proje kapsamında 18+009,91 ile 20+586,96 km'leri arasında bulunan Ayazağa Tüneli delme-patlatma yöntemi kullanılarak açılmıştır. Çökel kayaçların bulunduğu ortamda 5 m çaplı tünelde tahkimatın yapılmasından sonra yerleştirilen suyu taşıyacak olan çelik boruların çapı 4 m'dir. Tünel tahkimatı ile çelik boru arasında kalan boşluk, dolgu betonu ile

doldurulmuştur. Tünel stabilitesini tam anlamıyla sağlamak amacıyla ikincil olarak kayaç ile tahkimat arasında kalan boşluklar konsolidasyon enjeksiyonu yöntemi ile doldurulmuştur.

Bu tez kapsamında yukarıda bahsedilen tünel için elde edilen verilerin kısıtlı olmasından dolayı 20+583 - 20+229 ve 19+389 - 18+256 km'leri arası yapılan konsolidasyon enjeksiyonu çalışmaları incelenmiştir.

Kazı esnasında jeoloji mühendisleri tarafından işlenmiş olan ayna jeoloji haritaları ve jeolojik parametreler kullanılarak elde edilen Q kaya sınıflama değerleri ile basılan enjeksiyon miktarı arasındaki ilişki irdelenmiştir.

Enjeksiyon verileri incelendiğinde farklı noktalarda anomali gösterdiği tespit edilmiştir. Dolayısıyla 2 boyutlu jeoistatistiksel analiz yapılarak verilerin optimizasyonu sağlanmıştır. Analiz sırasında ''*Maden Yataklarının Değerlendirilmesinde Jeoistatistiksel Yöntemler* (Tercan & Saraç, 1988)'' kitabında önerilen ve kömür damarları için geliştirilen Jeoistatistiksel Rezerv Hesabı yöntemi kullanılmıştır. Bu yöntem sayesinde değerler optimize edilerek veri sayısı arttırılmıştır. Tüm bu çalışmalar neticesinde belirli km'ler arasında kaya kütlesi ile enjeksiyon miktarları arasında yüksek ilişki olduğu görülmüştür.

1.1 Tezin Amacı

Tünellerde yapılan tahkimat ve enjeksiyon uygulamaları ortamın kaya kütle özelliklerine göre değişiklik göstermektedir. Dolayısıyla bu uygulamalar ile formasyon arasındaki ilişki iyi bir şekilde tanımlanırsa daha sonra yapılacak çalışmaların fizibilite sürecinde doğru karar verme ve uygulamaları başarıyla sonuçlandırma olasılığı artar.

Ayazağa Tüneli'nde yapılan jeolojik araştırma, kazı, tahkimat, konsolidasyon enjeksiyonu uygulamalarını irdeleyip kaya kütlesi parametrelerinin enjeksiyon miktarı ve tahkimat seçimi üzerindeki etkilerini somut olarak ortaya koymak çalışmanın temel amacını oluşturmaktadır. Böylelikle bu çalışmada elde edilen sonuçların gelecekte benzer ortamlar için yapılacak projelere de ışık tutması ve fayda sağlaması hedeflenmektedir.

1.2 Literatür Araştırması

Çalışma konusuyla parallelik gösteren önceki çalışmalar incelenmiş ve bilgi toplanarak konuya bakış açısı genişletilmiştir.

Bieniawski (1989) tarafından yapılan çalışmada, RMR kaya kütle sınıflaması değeri ile tünel tahkimat tipleri arasında ters orantı olduğu gösterilmiştir. Kaya kalitesi azaldıkça gereken destek miktarı ve çeşidi de artmaktadır.

Grimstad ve Barton (1993) tarafından yapılan çalışmada, Q kaya kütle sınıflaması değeri ile tünel tahkimat tipleri arasındaki ilişki gösterilmektedir. Bu ilişkiye göre kaya kalitesi azaldıkça gereken destek miktarı ve çeşidi artmaktadır.

Bahçivan (2011) tarafından yapılan çalışmada, kaya kalitesi ile konsolidasyon enjeksiyonu arasında ilişki olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmaya göre, Q kaya kütle sınıflaması değeri ile kaya kütlesi içine basılan şerbet miktarı arasında ters orantı vardır. Yani jeolojik durum kötüleştikçe enjekte edilen şerbet miktarı artmaktadır.

Tüm bu araştırmalar detaylı olarak irdelenerek bu çalışma için aydınlatıcı yol göstermesi sağlanmıştır. Önceki çalışmalarda elde edilen bu sonuçlar irdelendiğinde bu çalışmada ortaya çıkacak muhtemel sonuçlar kestirilmiş ve jeoistatistik analizle doğruluğu denetlenmiştir.

1.3 Hipotez

Çalışmanın hipotezi, tünellerde yapılan konsolidasyon enjeksiyonunun miktarının jeolojik parametrelere bağlı olarak değişip değişmediği ve bu ilişkinin ters orantılı olup olmadığının tetkikidir. Yani, ortamın kaya kalitesi azaldıkça içerdiği boşluk ve çatlaklardan dolayı enjekte edilen enjeksiyon miktarı artmalıdır. Bu bakış açısıyla çalışmalar gerçekleştirilip hipotezin doğruluğu araştırılmıştır.

1.4 Yöntem

Çalışmaya ilk olarak literatür araştırması ile başlanmıştır. Bu kapsamda, çalışma sahası ve civarının jeolojik özellikleri hakkında bilgi edinmek amacıyla önceki bilimsel çalışmalar incelenmiştir. Çalışma kapsamında değinilen kaya kütle sınıflamaları, tünel açma yöntemleri, tünellerde uygulanan enjeksiyon yöntemleri hakkında bilgi toplanmıştır.

İkinci olarak, arazi çalışmaları sürecinde zeminin mühendislik özellikleri, enjeksiyon verileri ve uygulamalara ait jeoteknik bilgi toplanmış derlenmiştir. Kaya kütle özellikleri tespitinde ayna jeoloji haritaları, jeomekanik parametreler ve dolayısıyla kaya kütle sınıflaması olan Q değerlerinden faydalanılmıştır. Enjeksiyon verileri olarak, çelik boruların ano, ring ve enjeksiyon basılacak delik numaraları, enjeksiyon km'leri ile birlikte enjeksiyon miktarları elde edilmiştir.

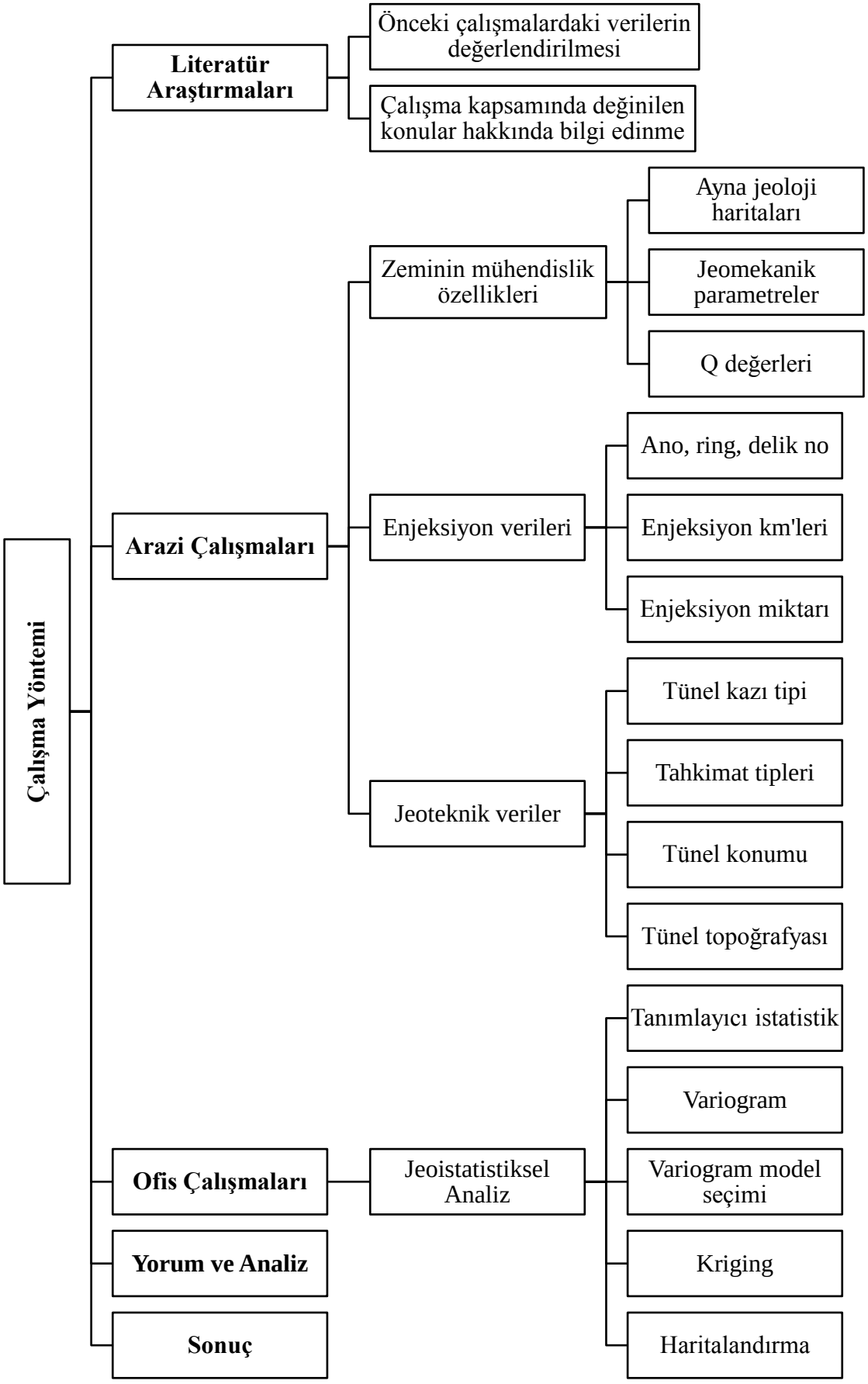
Jeoteknik bilgi kapsamında Tünel kazı tipi, uygulanan tahkimat tipleri, tünelin konumu ve tünelin topoğrafyası gibi bilgiler de kayda alınmıştır.

Üçüncü olarak, ofis çalışmaları sürecinde jeoistatistiksel analiz gerçekleştirilmiştir. Jeoistatistiksel analiz yapılırken tanımlayıcı istatistik, variogram, variogram model seçimi işlemlerinin ardından kriging (Matheron, 1971) ile elde edilen veriler haritalandırılmıştır.

Dördüncü olarak, yorum ve analiz kısmında ise elde edilen tüm veriler bir arada değerlendirilmiş, bilimsel bakış açısıyla yorumlanarak analiz edilmiştir.

Son olarak, çalışma kapsamında ortaya konan bulgular detaylı olarak tartışılmış ve elde edilen sonuçlar belirlenmiştir.

Kullanılan yöntem sırasıyla **Şekil 1.1**'de gösterilmektedir.



Şekil 1.1 : Çalışma yöntemi akış şeması.

2. KAYA KÜTLE SINIFLAMA SİSTEMLERİ

2.1 Giriş

Yer altı kazı projelerinde kaya kütlesinin sınıflaması, üzerinde durulması gereken en önemli konuların başında gelmektedir. Fizibilite ve tasarım sürecinde öncelikle çalışma sahasının jeomekanik açıdan irdelenmesi gerekmektedir. Bu aşamada elde edilen veriler aracılığıyla kaya kütle sınıflaması yapılarak jeolojik ortamların karakteristiği çıkarılabilir. Bu da kaya kütlesi için gerekli olan kalıcı veya geçici tahkimatın, dayanıklılığın ve deformasyon özelliklerinin önceden tahmin edilmesini sağlar.

Karayolu, demiryolu vs. tünellerinin tasarımında kullanılmak amacı ile önerilen "kaya sınıflaması yardımı ile tünel tasarımı" yöntemlerinden son yıllarda en çok kullanılanlar Bieniawski (1973)'nin RMR ile Barton, vd. (1974)'nin Q kaya sınıflama yöntemleridir. Bu yöntemler ilk başlarda madencilik dışındaki tünellerin tasarımı için önerilmiştir. Laubscher (1977) ile Kondorski vd. (1983)'nin madencilikte kullanılmak amacı ile Bieniawski (1973)'nin önerdiği jeomekanik sınıflama sisteminde değişiklikler yapmışlardır. RMR ve Q sınıflama sistemleri sırasıyla Bieniawski, (1989) ve Grimstad ile Barton, (1993) yılları arasında günümüzdeki son şekillerini almıştır (Ulusay & Sönmez, 2002).

En eski ve en çok bilinen sınıflama sistemi, Terzaghi (1946)'nin kaya yükleme sınıflamasıdır. Bu sınıflama, tahkimat üzerine binen yükler ile tahkimat seçimine dayanan bir yöntemdir. Terzaghi'den günümüze kadar farklı araştırmacılar tarafından geliştirilen çok sayıda kaya kütlesi sınıflaması **Çizelge 2.1'**de verilmiştir (Bieniawski, 1989 ve Ulusay & Sönmez, 2002'den yararlanılarak).

Çizelge 2.1 : Günümüze kadar geliştirilmiş kaya kütlesi sınıflamaları.

Sınıflama Sisteminin Adı	Geliştiren(ler)	Geliştirildiği Ülke	Uygulama Alanları
1. Kaya yükü	Terzaghi, 1946	A.B.D	Çelik destekli tüneller
2. Desteksiz durma süresi	Lauffer, 1958	Avusturalya	Tünelcilik
3. NATM	Pacher vd., 1964	Avusturalya	Tünelcilik
4. RQD	Deere vd., 1967	A.B.D	Karot loglama, tünelcilik
5. ESR	Wickham vd., 1972	A.B.D	Tünelcilik
6. RMR Sistemi	Bieniawski, 1973 (en son yenilenme 1989-A.B.D)	G.Afrika	Tüneller, madenler
RMR Sistemi ile ilgili değişiklikler:			
	Weaver, 1975	G.Afrika	Sökülebilirlik
	Laubscher, 1977	G.Afrika	Madencilik
	Olivier, 1979	G.Afrika	Bozunabilirlik
	Ghose ve Raju,1981	Hindistan	Kömür madenciliği
	Moreno Tallon, 1982	İspanya	Tünelcilik
	Kendorski vd., 1983	A.B.D	Sert kaya madenciliği
	Nakao vd., 1983	Japonya	Tünelcilik
	Serafim vd., 1983	Portekiz	Temeller
	Vallejo, 1983	İspanya	Tünelcilik
	Ünal, 1983	A.B.D	Kömür madenciliğinde tavan saplaması uygulamaları
	Romana, 1985	İspanya	Tünelcilik
Düzeltilmiş RMR '85	Newman ve Bieniawski, 1985	A.B.D	Kömür madenciliği
	Sandbak, 1985	A.B.D	Delinebilirlik
Basitleştirilmiş RMR '85	Brook ve Dharmerante, 1985	Sri lanka	Madencilik
	Smith,1986	A.B.D	Taranabilirlik
	Venkateswarlu, 1986	Hindistan	Kömür madenciliği
	Robertson, 1988	Kanada	Şev duraylılığı
M-RMR	Ünal ve Özkan, 1990	Türkiye	Madencilik
Düzeltilmiş RMR '93	Sheorey, 1993	Hindistan	Kömür Madenciliği
7. Q Sistemi	Barton vd., 1974	Norveç	Tüneller ve yer altı boşlukları (odaları), madencilik
Q Sistemi ile ilgili değişiklikler:			
	Kirsten,1982	G.Afrika	Kazılabilirlik
	Kirsten,1983	G.Afrika	Tünelcilik
Modifiye Q	Grimstad ve Barton, 1993	Norveç	Tüneller, yer altı boşlukları, madencilik

Çizelge 2.1 (devam) : Günümüze kadar geliştirilmiş kaya kütlesi sınıflamaları.

Sınıflama Sisteminin Adı	Geliştiren(ler)	Geliştirildiği Ülke	Uygulama Alanları
Modifiye Q	Sheorey, 1993	Hindistan	Kömür madenciliği
8. Dayanım-boyut	Franklin, 1975	Kanada	Tünelcilik
9. Temel jeoteknik sınıflaması ISRM, 1981		Uluslararası	Genel amaçlı
10. MBR	Cummings vd., 1982	A.B.D	Sert kaya madenciliği
11. RMS	Stille vd., 1982	İsveç	Metal madenciliği
12. Birleştirilmiş sınıflama sistemi	Williamson, 1984	A.B.D	Genel İletişim Amaçlı
13. RMZ	Dong vd., 1989	Çin Halk Cumhuriyeti	Kömür Madenciliği
14. RTR	Inyang, 1991	A.B.D	Tünelcilik, madencilik, şevler
15. SGDM	Milne ve Potvin, 1992	Kanada	Madencilik
16. GC	Mendes vd., 1993	Portekiz	Kömür madenciliği
17. CMRR	Molinda ve Mark, 1993	A.B.D	Kömür Madenciliği
18. RFI	Singh vd., 1994	Hindistan	Kömür madenciliği
19. RMI	Palmstrom, 1985	İsveç	Tünelcilik

2.2 Sınıflama Sistemlerinin Amacı ve Önemi

Kaya kütle sınıflamaları ön hazırlık ve tasarım belirleme aşamalarında, öncelikle kılavuz niteliğindedir. Yani, bu yöntemlerin gözleme dayalı mühendislik sezgilerinin yerine geçemeyeceği unutulmamalıdır. Sınıflama sistemlerinin bu çerçevede algılanması ve doğru kullanılması halinde projenin başarılı olması sağlanır. Kaya kütle sınıflamaları birçok amaca yönelik geliştirilmiştir.

Bieniawski (1988)'e göre kaya kütlesi sınıflama sistemlerinin başlıca amaçları şunlardır:

- Kaya kütlesinin davranışını etkileyen önemli parametreleri belirlemek,
- Kaya kütlesini kendi içerisinde benzer özellikler gösteren bölgelere ayırarak değişik kalitedeki kaya kütlesi sınıflarını belirlemek,
- Her kaya kütlesi sınıfının özelliklerinin anlaşılması amacıyla esaslar oluşturmak,
- Herhangi bir sahadaki kaya kütlesi koşullarıyla ilgili olarak kazanılan deneyimleri diğer sahalarda karşılaşılan koşullarla karşılaştırıp ilişki kurmak,
- Mühendislik tasarımı için sayısal veri tabanı ve bir kılavuz oluşturmak,

- Mühendisler arasında ortak temele dayalı teknik iletişimi sağlamak.

Tüm bu amaçlar ışığında elde edilecek kazanımlar ise;

- En az sayıda sınıflama parametresi esas alınarak, toplanan verilerle saha çalışmalarının kalitesinin arttırılması,
- Tasarıma yönelik amaçlar için sayısal veri sağlanması,
- Daha doğru mühendislik kararlarının alınabilmesinin ve projelerde daha etkin bir iletişimin sağlanmasıdır.

Kaya kütlesi sınıflamaları geliştirilirken, girdi parametrelerinin tayin edilebilir ve kaya kütlesinin özelliklerini yansıtabilir nitelikte olması önem kazanmıştır. Kaya kütle sınıflamalarında kullanılan parametrelerden başlıcaları şunlardır (Ulusay & Sönmez, 2002):

a) Kaya malzemesinin dayanımı

b) RQD (kaya kalite göstergesi)

c) Jeolojik parametreler (Süreksizliklerin aralığı, yönelim, pürüzlülük, açıklık, bozunma, dolgu, devamlılık)

d) Yeraltı suyu koşulları

e) Gerilme alanı

f) Başlıca faylar ve kıvrımlar

Ayazağa Tüneli için tahkimat tasarımı belirlenirken Q kaya kütlesi sınıflaması kullanıldığı için bu çalışmada Q sınıflama sistemi üzerinde durulacaktır.

2.3 Q Sınıflama Sistemi

Kaya tünelcilik kalitesi Q veya NGI (Norvegian Geotechnical Institute) sistemi olarak bilinen sınıflama sistemi Barton, vd. (1974) tarafından tünel destek analizinde eklem pürüzlülüğü, eklem dolgularının sürtünme dayanımı ve kaya yükünün az çok ihmal edildiğini iddia ederek özellikle tünel desteği için önerilmiştir.

Q sistemi, ortaya atılmasından sonra dünya çapında büyük ilgi toplamıştır. Bununla ilgili sayısız çalışmalar ve birçok gelişme yayınlanmıştır. Q değeri geliştikçe, TBM tünellerinde Q_{TBM} değeri de geliştirilmiştir.

Q sisteminin bir başka uygulaması ise Q değeri ile bağlantılı olarak tünellerin enjeksiyonudur. Bu çalışma kapsamında araştırılan husus bununla ilgilidir ve aralarındaki ilişki incelenmiştir.

Kaya tünelcilik kalitesi Q, üç önemli zemin parametresinin fonksiyonu olarak verilmiştir.

1. Blok boyutu (RQD/J_n)
2. Bloklar arası makaslama dayanımı (J_r/J_a)
3. Etkin gerilmeler (J_w/SRF)

Birbirinden bağımsız 6 parametrenin fonksiyonu olarak **(2.1)** nolu eşitlik ile hesaplanmaktadır.

$$Q = \frac{RQD}{J_n} \times \frac{J_r}{J_a} \times \frac{J_w}{SRF} \qquad \textbf{(2.1)}$$

Burada;

RQD: Kaya kalite göstergesi

J_n: Eklem takımı sayısı

J_r: Eklem pürüzlülük sayısı

J_a: Eklem alterasyon sayısı

J_w: Eklem su azaltma faktörü

SRF: Gerilme azaltma faktörüdür.

Bu formül ile elde edilen Q değerlerine karşılık gelen kaya kütlesi sınıflaması değerleri **Çizelge 2.2**'de gösterilmektedir. Ayrıca diğer parametreler de Barton vd. (1974) tarafından aşağıda listelendiği şekliyle verilmiştir.

Çizelge 2.2 : Q sınıflama değerleri ve tanımları.

Kaya Kütlesi Kalitesi (Q)	Kaya Kütlesi Durumu
1000-400	Son derece iyi
400-100	Aşırı iyi
100-40	Çok iyi
40-10	İyi
10-4	Orta
4-1	Zayıf
1-0,1	Çok zayıf
0,1-0,01	Aşırı zayıf
0,01-0,001	Son derece zayıf

Bu çizelgede görüldüğü gibi Q değeri 1000 ile 0,001 arasında değişmekte ve "son derece iyi" ile "son derece zayıf" sınıfları arasında tanımlanmaktadır.

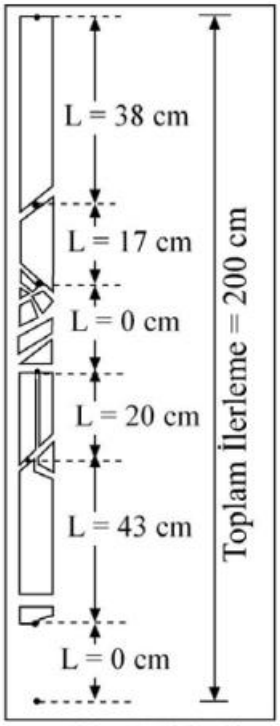
2.3.1 Blok boyutu (RQD/J_n)

Blok boyutu değeri, kayanın genel yapısını belirler ve blok boyutunun ölçüsünü gösterir. Örneğin RQD ve J_n parametrelerinin değerleri sırasıyla 100-10 ve 0.5-20 arasında olabilir, bu da bize yaklaşık olarak en iri blok boyutu 200 cm ve en küçük parça da 0,5 cm olabileceğini gösterir. Daha küçüğü için de zemin boyutu denilebilir.

2.3.1.1 Kaya kalite göstergesi (RQD)

RQD başlangıçta Deer 1966 tarafından önerilen bir sınıflama sistemidir. Daha sonra sınıflam sistemlerinin parametresi olarak kullanılmaya başlamıştır. Bir karot numunesindeki 10 cm'den büyük karot parçalarının uzunluklarının toplamının toplam karot uzunluğuna bölümüyle elde edilen, kendi başına küçük bir sınıflama sistemidir. Bu ifade **(2.2)** nolu eşitlik ile gösterilmektedir. **Şekil 2.1**'de RQD hesaplama yöntemi verilmiştir.

$$RQD = \frac{\sum 10\ cm'den\ büyük\ karot\ parçalarının\ uzunlukları}{Toplam\ karot\ uzunluğu} \qquad \textbf{(2.2)}$$



$$RQD = \frac{38+17+20+43}{200} = \%\ 59$$

Şekil 2.1 : RQD hesaplanma yöntemi.

RQD değerine bağlı olarak kaya tanımı **Çizelge 2.3**'de verilmiştir.

Çizelge 2.3 : RQD değerleri ve tanımı.

Kaya tanımı	RQD,%	Notlar
A: Çok düşük	0-25	* 0<RQD< 10 olursa hesaplamada pratik olarak 10 alınır
B: Düşük	25-50	
C: Orta	50-75	
D: iyi	75-90	
E: Çok iyi	90-100	

Yıllarca yapılan araştırmalardan toplanan bilgiler göstermiştir ki; RQD ve diğer eklem ölçümleri arasında bir ilişki bulmak zordur, çünkü RQD bir boyutlu olarak 10 cm'den büyük parçalardan hesaplanan bir değerdir.

Karotların bulunmaması halinde, m^3'deki toplam eklem sayısı (J_v) toplanarak Plamström (1974)'un verdiği bağlantı ile yaklaşık olarak hesaplanır **(2.3)**.

$$RQD = 115 - 3{,}3 \times J_v \qquad \textbf{(2.3)}$$

2.3.1.2 Eklem takımı sayısı (J_n)

Eklem takımı sayısı olarak tanımlanan J_n, eklem takımı durumuna göre 0,5 ile 20 arası değer almaktadır. **Çizelge 2.4**'de verildiği gibi eklem takımı sayısına karşılık J_n değerleri okunabilir.

Çizelge 2.4 : Eklem takımı sayısı.

Eklem takımı sayısı	J_n	Notlar
A: Masif hiç veya birkaç eklem	0,5-1,0	* Kesişmede (3 x J_n) Portalda (2 x J_n) alınır.
B: Bir eklem takımı	2	
C: Bir eklem takımı, düzensiz eklemler	3	
D: iki eklem takımı	4	
E: iki eklem takımı, düzensiz eklemler	6	
F: Uç eklem takımı	9	
G: Uç eklem takımı, düzensiz eklemler	12	
H: Dört veya fazla eklem takımı, düzensiz çok eklemli	15	
J: Tamamen ufalanmış kaya, zemin gibi	20	

2.3.2 Bloklar arası makaslama dayanımı (J_r/J_a)

Bloklar arası makaslama dayanımı olan J_r/J_a , dolgulu veya dolgusuz süreksizlik yüzeylerinin pürüzlülük ve süreksizlik karakteristiklerini dolayısıyla makaslama dayanımını vermektedir.

Küçük kaya oynamaları sonrasındaki kaya yüzeyleri teması, kazıyı büyük kayıplardan korumak için çok önemli bir faktördür. Kaya yüzeyleri arasında temasın olmadığı yerler, tünel dayanıklılığı için tercih edilmeyen yerlerdir.

2.3.2.1 Eklem pürüzlülük sayısı (J_r)

Eklem pürüzlülük sayısı ile bloklar arası makaslama dayanımı arasında doğru orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Dolayısıyla eklem pürüzlülük sayısı arttıkça Q değeri de artar ve kayacın kalitesi artmış olur. **Çizelge 2.5**'te eklem pürüzlülük sayısı verilmektedir.

Çizelge 2.5 : Eklem pürüzlülük sayısı.

Eklem pürüzlülüğü	J_r	Notlar
(a) Eklem yüzeyleri dokanak halinde veya *(b) Dokanağın 10 cm 'den az bir makaslama ile sağlanması*		
A: Süreksiz eklemler	4	*Ortalama eklem aralığı 3m'den fazla ise değerlere 1 eklenmelidir
B: Dalgalı-pürüzlü	3	
C: Dalgalı-düz	2	
D: Dalgalı-cilalı	1,5	
E: Düzlemsel-pürüzlü	1,5	*Makaslama izleri olan düzlemsel cilalı eklemlerde Jr değeri 1.5 alınabilir
F Düzlemsel-düz	1	
G: Düzlemsel-cilalı	0,5	
(c) Makaslamada dokanak yok		
H: Kaya duvan temasını önleyecek kalınlıkta kil mineralli zon	1	
I: Kaya duvarı temasını önleyecek kalınlıkta kumlu, çakıllı veya ezilme zonu	1	
Not: Dalgalı, düzlemsel tanımları eklemin en az 2 m 'lik uzunluğu boyunca olan genel yapısını; pürüzlü, düz, cilalı kavramları yüzeyi daha küçük ölçekte tanımlar.		

2.3.2.2 Eklem alterasyon sayısı

Eklem alterasyon sayısı ile bloklar arası makaslama dayanımı arasında ters orantılı bir ilişki bulunmaktadır. Dolayısıyla eklem alterasyon sayısı arttıkça Q değeri de azalır ve kayacın kalitesi azalmış olur.

Çizelge 2.6'da eklem alterasyon sayısı verilmektedir (Barton vd., 1974 ve Barton, 2000).

Çizelge 2.6 : Eklem alterasyon sayısı.

Eklem alterasyon sayısı	**J_a**	**Yaklaşık ϕ (°)**
(a) Kaya ile dokanak (mineral dolgu yok, sadece sıvama)		
A: Temas yüzeyi sert dolgu halinde	0,75	-
B: Eklem cidarı ayrışmamış, yüzeysel lekeler var	1,0	25-35
C: Eklem cidarları az ayrışmış, yumuşamayan tipte kumlu parçacıklar, kilsiz ayrışmış kaya vb.	2,0	25-30
D: Siltli ve kumlu, killi sıvama, az miktarda yumuşamayan tipte killi malzeme	3,0	20-25
E: Yumuşayabilen, düşük sürtünmeli kil mineralli sıvama, kaolinit, talk, grafit vb. az miktarda şişen kil (sıvama süreksiz, kalınlığı 1-2 mm' den az olunca)	4,0	8-10
(b) Dokanağın 10 cm bir makaslama ile sağlanması (ince mineral dolgu)		
F: Kumlu parçalar, kilsiz ayrışmış kaya vb.	4,0	25-30
G: Yüksek derecede aşırı konsolide yumuşamayan tip kil mineralli dolgu (5 mm'den ince, sürekli)	6,0	16-24
H: Orta veya az derecede aşırı konsolide kil, yumuşamayan tip kil mineralli dolgu (5 mm'den ince, sürekli)	8,0	12-16
J: Şişen killi dolgu, montmorillonit vb (5 mm'den ince, sürekli), J_a, şişen malzeme yüzdesine göre ve temas şartlarına göre değişir	8,0-12,0	6-12
(c) Makaslamada duvarla temas yok		
K: Ayrışmış veya ezilmiş	6,0	-
L: Bölgeler, bantlar veya ufalanmış kaya veye kil	8,0	-
M: G,H ve J maddelerine bakınız	8,0-12,0	6-24
N: Siltli veya kumlu kil, az miktarda ince taneli malzeme, bölgesel veya bant şeklinde	5,0	-
O: Kalın, sürekli kil bölgeleri veya bantları (kil için)	10,0-13,0	6-24
P: G, H ve J maddelerine bakınız	13,0-20,0	6-24

2.3.3 Etkin gerilmeler (J_w/SRF)

Etkin gerilmeler hesaplanırken J_w/SRF oranı, iki gerilme parametresinden oluşan karmaşık, ampirik bir orandır. Bu oran arttıkça Q artar ve böylece kaya kalitesi artmış olur.

2.3.3.1 Eklem su azaltma faktörü (J_w)

Eklem su azaltma faktörü (J_w), eklemlerin mukavemetini etkileyen su basıncının ölçüsüdür. Bu değer arttıkça Q değeri de artar. **Çizelge 2.7**'de eklem su azaltma faktörü değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.7 : Eklem su azaltma faktörü değerleri.

Eklem suyu indirgeme faktörü	**J_w**	**Su basıncı (MPa)**
A: Kısmi veya çok az su gelimi, (< 5 l/dk)	1	< 0,1
B: Orta derecede su gelimi, eklem dolgularında yıkanma	0,66	0,1-0,25
C: Sağlam kayada fazla su gelimi ve basıncı, dolgusuz eklemler	0,5	0,25-1
D: Fazla su gelimi ve basıncı, dolgularda belirgin yıkanma	0,33	0,25-1
E: Patlama aşamasında fazla su gelimi ve basıncı, zamanla azalacak şekilde	0,2-0,1	> 1
F: Patlama aşamasında fazla su gelimi ve basıncı, zamanla azalma yok	0,1-0,05	> 1
Not: C ve F maddeleri genel yaklaşımlar olup, drenaj önlemleri varsa J_w artırılmalıdır.		

2.3.3.2 Gerilme azaltma faktörü (SRF)

Gerilme azaltma faktörü, toplam gerilmenin bir parametresi olarak nitelendirilebilir. Bu terim aktif gerilimi belirleyen bir faktördür. **Çizelge 2.8**'de gerilme azaltma faktörü değerleri verilmiştir.

Çizelge 2.8 : Gerilme azaltma faktörü değerleri.

Gerilme azaltma faktörü	**SRF**		
(a) Tünel kazısı sırasında kaya kütlesinde gevşeme oluşturabilecek ve kazıyı kesen zayıflık zonları			
A: Kimyasal olarak parçalanmış veya killi zon oluşumları, çok zayıf çevre kayası (herhangi bir derinlikte)	10		
B: Kimyasal olarak parçalanmış veya killi tek zayıflık zonu içeren kaya (kazı derinliği < 50m)	5		
C: Kimyasal olarak parçalanmış veya killi tek zayıflık zonu içeren kaya (kazı derinliği > 50m)	2,5		
D: Sağlam kayada birçok makaslama zonu, zayıf çevre kayası (herhangi bir derinlikte)	7,5		
E: Sağlam kayada tek makaslama zonu, (kazı derinliği >50m)	5,0		
F: Sağlam kayada tek makaslama zonu, (kazı derinliği >50m)	2,5		
G: Gevşek, açık eklemler, yoğun eklemli (herhangi bir derinlikte)	5,0		
(b)Sağlam kaya, kayada gerilme problemleri		σ_c / σ_1	σ_θ / σ_c
H: Düşük gerilme, yüzeye yakın, açık eklemli	2,5	>200	<0,01
J: Orta gerilme, gerilme koşulları elverişli	1,0	200-10	0,01-0,3
K: Yüksek oranda gerilme, çok yakın yapı. Tünel duvarlarının stabilitesinde problemli olabilir	0,5-2,0	10-5	0,3-0,4
L: Masif kayada 1 saat içinde orta derecede dilimlenme	5-50	5-3	0,5-0,65
M: Masif kayada birkaç dakika içinde kaya patlaması ve dilimlenme	50-200	3-2	0,65-1
N: Sağlam kayada yamulma şeklinde kaya patlaması ve ani dinamik deformasyon	200-400	<2	>1
(c)Sıkışan kaya: Yüksek gerilme altında yumuşayan kayanın plastik deformasyonu			
0: Orta derecede sıkıştıran kaya basıncı	5-10		1-5
P: Yüksek derecede sıkıştıran kaya basıncı	10-20		> 5
(d) Şişen kaya: Su içeriğine bağlı olarak kimyasal şişme			
R: Düşük kaya basıncında şişme	5-10		
S: Yüksek kaya basıncında şişme	10-15		

Not: Etken makaslama zonları kazıyla kesişmezse SRF değerleri %25-50 azaltılır. $5 \leq \sigma_1 / \sigma_3 \leq 10$ ise, $0{,}75.\sigma_c$, $\sigma_1 / \sigma_3 > \mathbf{10}$ ise $0{,}5.\sigma_c$ kadar değer azaltılır. Tünelde tavan derinliği genişlikten az ise SRF 2,5'dan 5'e artırılmalıdır. Kazı etkisinden kurtularak genelleştirme yapılabilmesi için SRF = 5- 2,5 - 1 ve 0,5 değerlerinin artan derinlikle paralel kullanılması önerilir (örn. 0-5, 5-25 , 25-250 , >250 m)

3. ENJEKSİYON

3.1 Giriş

Zeminin veya kayacın mühendislik özelliklerini arttırmak amacıyla çimento, harç, bentonit veya çeşitli organik-inorganik kimyasal maddelerin kaya kütlesindeki süreksizliklere veya zemin boşluklarına basınç altında doldurulmasına '*enjeksiyon*' denir (Özkan, 2006).

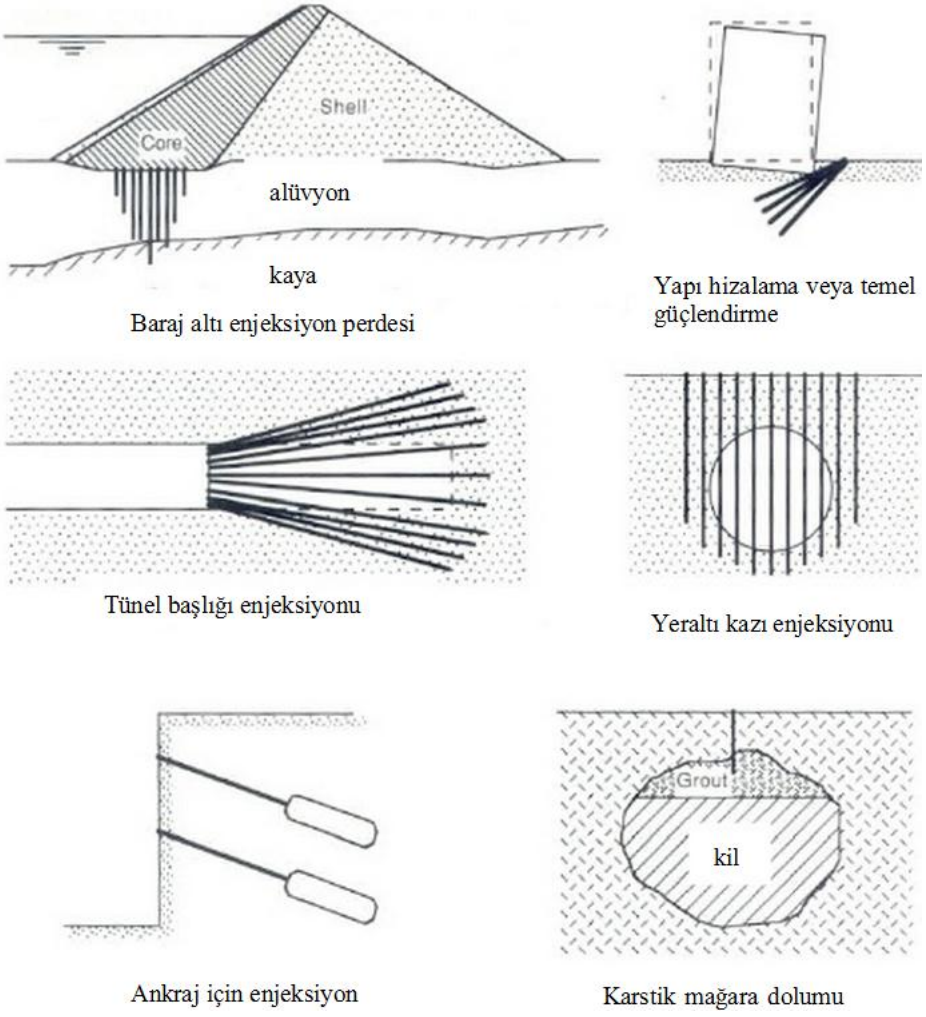
Zemin içerisine enjekte edilen şerbet, boşluklarda jel veya katı oluşturarak boşlukları doldurur. Enjeksiyon, zorlu zemin koşullarında çok yönlü uygulamaya da imkan sağlamaktadır (Balkıs, 2009).

Genellikle enjeksiyon masraflı bir uygulama olmasına rağmen projenin uygulanmasında ve sonrasında çıkabilecek sorunları önlediği için sonuçta ekonomik olmaktadır. Enjeksiyon uygulamasının sağlamış olduğu avantajlar şunlardır:

- ✓ Aşırı oturmaları önlemek amacıyla boşlukları doldurma,
- ✓ Mevcut yapıların büyütülmesi halinde zeminin emniyet gerilmesini artırma,
- ✓ Yeraltı su akışını önleme ve sızıntıyı azaltma,
- ✓ Kazık çakımı işlemlerinde düşük kohezyonlu zeminin oturmasını önleme,
- ✓ Tünel kazıları sırasında deplasmanları kontrol altına alma,
- ✓ İksa problemlerini rahatlatmak amacıyla zemin güçlendirmesi,
- ✓ Kazıkların düşey ve yatay kapasitelerini artırma,
- ✓ Deprem esnasında sıvılaşmaya karşı gevşek tabakaları taşlaştırma,
- ✓ Temeli alttan destekleme,
- ✓ Şev stabilizasyonunu sağlama,
- ✓ Şişen zeminleri kontrol altında tutma.

Teknolojinin gelişimine paralel olarak enjeksiyon uygulamaları da gelişme göstermekte ve bu sayede kullanım alanları artmaktadır. Başlıca enjeksiyon

uygulama alanları **Şekil 3.1**'de gösterildiği gibi baraj tabanındaki geçirimli birimin su sızdırmasını engellemek amacıyla yapılan perde enjeksiyonu, yapıları taşıyan zeminlerin stabilitesini sağlamak veya zemini güçlendirmek için yapılan enjeksiyon, tünellerde dayanımsız formasyonlarda kazı esnasında olabilecek göçükleri engellemek amacıyla yapılan tünel başlığı ve kazı enjeksiyonu, ankrajların saplanabileceği koşulu sağlamak amacıyla yapılan enjeksiyon ve karstik boşlukları doldurmak amacıyla yapılan enjeksiyon uygulamalarıdır.



Şekil 3.1 : Başlıca enjeksiyon uygulamaları (U.S.Army, 1984).

Zemin enjeksiyonları özellikle son 10-15 yıllık bir süreç içerisinde tünel kazısı dolayısıyla yüzeydeki veya yakın çevredeki yapılarda meydana gelebilecek zararlı oturmaların engellenmesinde, deprem esnasında sıvılaşabilecek gevşek, suya doygun granüler zeminlerin sıvılaşma potansiyellerinin azaltılmasında ve zeminlerin taşıma kapasitesinin artırılmasında kullanılmıştır (Bell, 1993).

Enjeksiyon teknolojisinin kökeni diğer zemin iyileştirme teknikleri gibi eskiye dayanmakla beraber bu teknoloji hem yeni enjeksiyon malzemeleri hem de bu malzemelerin zemin içerisine nüfuz ettirilmesi bakımından sürekli bir gelişim içerisindedir. Burada dikkatle üzerinde durulması gereken nokta, bütün bu uygulamalar için aynı enjeksiyon malzemesinin ve enjeksiyon parametrelerinin kullanılamayacağıdır (Wallace, 1982).

Birçok farklı uygulama alanına sahip olan enjeksiyonun başarılı bir şekilde uygulanabilmesi için enjeksiyon tekniklerinin, enjeksiyon harcı türlerinin, dolgu malzemelerinin özelliklerinin ve zeminin enjeksiyona karşı göstereceği davranışın bilinmesi gerekmektedir (Bakım, 2007). Zemindeki boşlukların büyüklüğüne ve enjeksiyonun amacına göre uygun enjeksiyon malzemesinin belirlenmesi gerekmektedir. Enjeksiyon malzemesinin zemin içerisine yerleştirilme biçimine ve zemin özelliklerine bağlı olarak da farklı enjeksiyon teknikleri geliştirilmiştir. Enjeksiyon malzemesi ve enjeksiyon parametreleri (enjeksiyon basıncı, enjeksiyon hızı, enjekte edilen hacim vb.) zemin koşullarına (dane çapı dağılımı, rölatif sıkılık, geostatik gerilmeler vs.) ve uygulama amacına yönelik olarak tasarlanmalıdır.

3.2 Enjeksiyon Uygulamasının Tarihçesi

Enjeksiyon teknolojisinin geçmişi yaklaşık 200 yıl öncesine dayanır. Savak onarımı için kil ve akışkan kirecin Fransa'da 1802 yılında Charles Brigny tarafından pompa yardımıyla enjeksiyonu, ilk enjeksiyon uygulaması olarak kabul edilmektedir. Fransa'da 19. yüzyıl boyunca hidrolik yapı çalışmalarında ve diğer önemli yapılarda bu uygulama devam ettirilmiştir. 1856 yılında İngiltere'de Kinippe tarafından çimento enjeksiyonu yapılmış ve uygulama otoyol tünellerinin çevresindeki boşlukların doldurulması için 1864 yılından beri kullanılmıştır (Lenzini & Bruss, 1975). Sodyum silikat çözeltisinin zeminlerin enjeksiyon çalışmalarında kullanımına ait patenti Jeziorsky'nin almasıyla kimyasal enjeksiyon uygulamaları 1887 yılında başlamıştır. Belçikalı mühendis Albert Francois 1914 yılında, çimento enjeksiyonundan önce, silikatizasyon adı verilen ve sodyum silikat ve alüminyum sülfat çözeltilerini içeren yöntemi kullanmıştır. Bu teknik, zor yeraltı suyu koşulları altındaki geniş maden şaftlarında kullanılmıştır. 1934 yılında Charles Langer, sodyum silikat ve metalik tuzların jel haline geçmesi için katılaşma zamanlarının kontrolünde kullanılan tek çözelti (one - solution) yöntemini geliştirmiştir. 1950'lerde

etil asetat yardımıyla silikatın jel (pelte) haline getirilmesi sağlanmıştır. Bunun yanında diğer kimyacılar silikat çözeltisinin pH değerlerini değiştirerek hem jel haline geçme zamanlarını kontrol edebilmişler hem de dayanımı yüksek silikat jelleri elde etmişlerdir. 1940 yılı başlarında silikatsiz tek çözelti yöntemi geliştirilmiştir. Bu yöntemle lignokromlar (lignosülfit, lignosülfanat gibi) çözeltisinin içine bikromat karıştırılmasıyla jel haline dönüştürülmüştür (Özkan, 2006). 1950'lerde polimer bilimindeki hızlı gelişmeler, zeminin doygunlaştırılması için kimyasal polimer sistemleri uygulamasının üzerine dikkatleri çekmiştir. Kimyasal akralit ince taneli kumların ve siltlerin enjeksiyonunda kullanılmıştır. Çünkü, bu kimyasal çözelti düşük viskositeli ve geniş katılaşma zaman aralığında kontrol edilmektedir (Lenzini & Bruss, 1975).

Enjeksiyon uygulamalarında, teknolojinin gelişmesiyle beraber 1933 yılından itibaren güçlü pompalar kullanılmaya başlanmış ve enjeksiyonun kullanım alanları hızla artmıştır. 1950'li yıllarda ABD'de kompaksiyon enjeksiyonu uygulanmaya başlanmıştır (Tunçdemir, 2004). 1960-1970 yılları arasında Japonya'da jet enjeksiyonu geliştirilmiş ve günümüzde de yaygın olarak kullanılmaktadır (Yılmaz, 2007). Ayrıca enjeksiyon malzemesindeki yeni gelişmeler de enjeksiyonun daha yaygın kullanılmasına olanak vermiştir.

3.3 Enjeksiyon İşlemi

Enjeksiyon işlemi temel olarak üç adımda gerçekleştirilir. Bunlar sırasıyla; enjeksiyonun yapılacağı noktalara gereken uzunlukta kuyuların açılması, zeminin jeolojik özelliklerine göre belirlenen enjeksiyon şerbetinin hazırlanması ve son olarak da kuyuya enjeksiyon şerbetinin basılması şeklinde gerçekleşir (Balkıs, 2009).

Enjeksiyon işlemine başlarken dikkat edilmesi gereken en önemli hususlar su şekildedir;

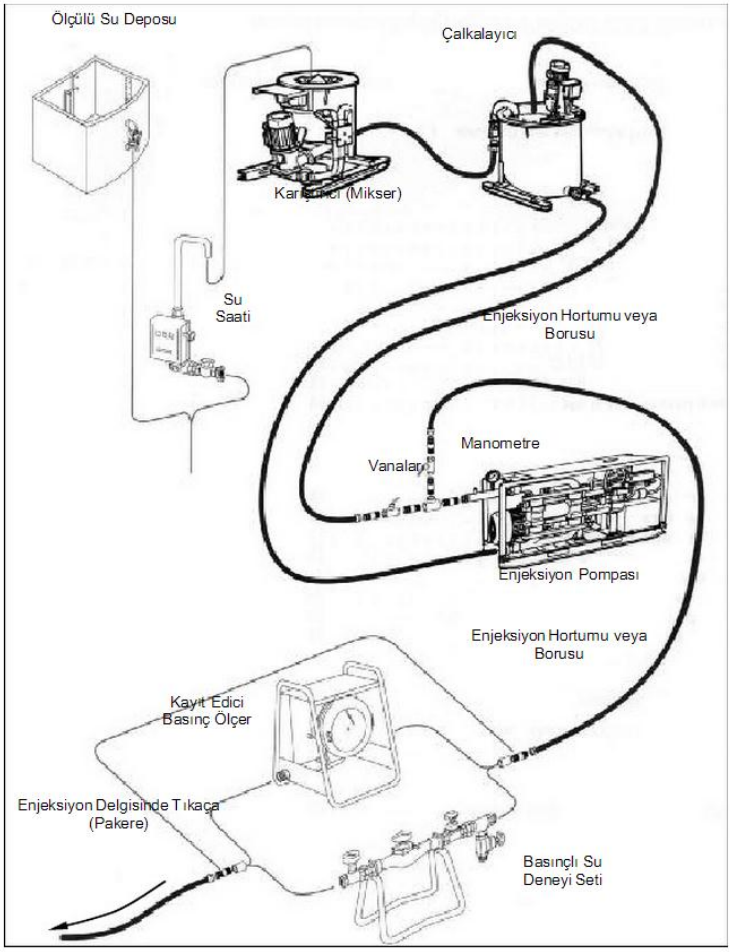
- Hangi tür enjeksiyon şerbeti kullanılmalı,
- Hangi enjeksiyon basıncı uygulanmalı,
- Hangi delik aralıklarında uygulanmalı,
- Ne kadar miktarda şerbet gerekir

Bu soruların karşılığını aldıktan sonra enjeksiyon işlemine geçilir. Enjeksiyonda formasyona verilen karışımın gidişi ile basıncın yükselişi arasında ters orantı mevcuttur. Karışımın gidişi yavaşladıkça basınçta bir yükselme görülür. İnce karışımlarla yapılan enjeksiyonlarda basıncın istenilen değere yükselme süresi uzun, yoğun karışımlarla yapılanlarda ise bu süre kısadır. Kalın karışımlarla yapılan enjeksiyonlarda basıncın ani olarak yükselmesi ile yanılmalar olabilir. Bu ya tij ve boruların tıkanmasından veya formasyonda oluşan geçici bir tıkanmadan kaynaklanabilir.

Her kademede enjeksiyona başlandığı zaman basınçlar genellikle istenilen değere yükselmez. Enjeksiyona devam edildikçe kademede boşluk ve çatlakların karışımla dolması neticesinde basınçta bir yükseliş görülür, istenilen basınç elde edilince zemine verilen karışım, mevcut dolgunun sıkıştırılmasını ve daha ince çatlakların doldurulmasını sağlar ve basınçta da devamlı bir yükseliş, zeminin karışımı kabul etmemesi hali görülür. Enjeksiyonda bu duruma "refü" denilir (Özocak, 1994).

Enjeksiyon sonrası istenilen sonuca ulaşabilmek ve bu uygulamanın ekonomik olabilmesi için enjeksiyon amacının belirlenmesi, enjeksiyonu yapılacak olan kaya kütlesinin özelliklerinin belirlenmesi, enjeksiyon türü ve tekniğinin belirlenmesi ve delme ve enjeksiyon ekipmanlarının tespiti gereklidir (Nonveiller, 1989).

Bir enjeksiyon işleminde, ölçüsü bilinen bir su deposunda bulunan su, su saatinden geçerek karıştırıcıya dökülür. Burada, su ile çimento karıştırılır. Oluşan enjeksiyon şerbeti çalkalayıcıya gönderilerek burada basıma hazır bir şekilde bekletilir. Çalkalayıcı sayesinde şerbet içerisindeki tanelerin çökelmesi engellenmiş olur. Enjeksiyon pompası çalkalayıcıdan aldığı şerbeti paker aracılığıyla deliğe istenilen basınçta enjekte eder (**Şekil 3.2**).



Şekil 3.2 : Enjeksiyon donanımlarının bağlantı sırası (Craelius, 1990).

3.4 Enjeksiyon Türleri

Enjeksiyon türünün asıl belirleyicisi zeminin doğal yapısıdır. Dolayısıyla her enjeksiyon türünün kendine özgü uygulama kriterleri ve uygulama parametreleri mevcuttur.

Enjeksiyon türüne ve uygulama tekniğine karar vermeden önce arazide çeşitli deneyler yapılmalıdır. Uygulama yapıldıktan sonra da tekrar deney yapılarak uygulamanın doğruluğu ve yeterliliği kontrol edilmelidir.

Enjeksiyon türleri **Çizelge 3.1**'de gösterildiği gibi yapıldığı yere göre perde enjeksiyonu, rezervuar enjeksiyonu, temel enjeksiyonu; uygulanan enjeksiyon basıncına göre alçak basınçlı enjeksiyon, orta basınçlı enjeksiyon, yüksek basınçlı enjeksiyon; yapılış yöntemlerine göre tek kademeli enjeksiyon, çok kademeli enjeksiyon; enjeksiyon kuyularının geometrik konumuna göre dikey, yatay, ışınsal,

açılı ışınsal enjeksiyon; enjeksiyonda kullanılan karışım maddelerine göre ise çimento enjeksiyonu, kimyasal enjeksiyon olarak ayrılır (Pamuk, 2006).

Çizelge 3.1 : Enjeksiyon çeşitleri.

Yapıldığı Yere Göre	l)Perde Enjeksiyonu
	2)Rezervuar Enjeksiyonu
	3)Temel Enjeksiyonu
	4)Tünel Enjeksiyonu
Uygulanan Enjeksiyon Basıncına Göre	1) Alçak Basınçlı Enjeksiyon
	2) Orta Basınçlı Enjeksiyon
	3) Yüksek Basınçlı Enjeksiyon
Yapılış Yöntemlerine Göre	1) Tek Kademeli Enjeksiyon
	2) Çok Kademeli Enjeksiyon
Enjeksiyon Kuyularının Geometrik Konumuna Göre	Dikey, yatay, ışınsal, açılı ışınsal
Enjeksiyonda Kullanılan Karışım Maddelerine Göre	1) Çimento Enjeksiyonu (Süspansiyon Şeklindeki Karışımlar)
	2) Kimyasal Enjeksiyonu (Solüsyon Şeklindeki Karışımlar)

3.4.1 Yapıldığı yere göre enjeksiyon türleri

3.4.1.1 Perde enjeksiyonu

Perde enjeksiyonları yeraltısuyuna karşı geçirimsiz perdeler veya bir başka deyişle yeraltı barajları oluşturmak amacıyla yapılırlar. Enjeksiyon perdesi düz bir hat boyunca kuyu açma ve enjeksiyon basma silsilesi ile meydana gelir. Perde her şekil ve konumda olabilir. Örneğin, barajda su sızıntılarını engellemek için düşey veya eğimli, derin kazı veya şaftlarda dairesel, tünellerde "boru kemer" uygulamasında yatay şekillerde olabilir. Perde enjeksiyon, tek sıra veya birden fazla parallel sıra şeklinde de uygulanabilir (U.S.Army, 1970).

Perde enjeksiyonu çalışma alanının jeolojik ve topoğrafik yapısına ve enjekte edilecek jeolojik yapının mühendislik özelliklerine göre çeşitli konum ve derinliklerde olabilirler. Perde enjeksiyonu çoğunlukla barajlarda uygulanmaktadır (Pamuk, 2006). Genellikle betonarme barajlarda baraj aksının menba tarafında, dolgu

barajlarda ise baraj çekirdeği altında yer alır. Perde enjeksiyon, derinlikleri geçirimsiz tabakaya ulaşıncaya kadar yapılacağı için geçirimli tabaka kalınlığına bağlıdır (Özocak, 1994). Bu yüzden de perde enjeksiyon en derin yapılan enjeksiyon türüdür. Enjekte edilecek olan kayanın kalitesi ile uygulanması gereken enjeksiyon basıncı arasında da doğrusal bir ilişki bulunmaktadır. Başlangıçta delik aralıkları en geniş şekilde alınırken bu aralıklar, enjeksiyon ve kayanın özelliklerine göre gittikçe daraltılarak yapılır. Perde ekseni boyunca söz konusu aralıklarla yapılan enjeksiyon işlemlerinden sonra kuyuların orta noktalarına tekrar enjeksiyon yapılarak enjeksiyon işlemine devam edilir. Böylece ikinci seride yapılmış enjeksiyonlar, aynı zamanda birinci seride yapılan enjeksiyonların kontrolü de yapılmış olmaktadır. Perde tamamlanıncaya kadar, yani geçirimsizlik tolerans sınırlarına girinceye kadar delik aralıkları kısaltılarak bu işleme devam edilir (Pamuk, 2006).

3.4.1.2 Rezervuar enjeksiyonu

Baraj sahasındaki duraysız boşlukların, ömrü biten madendeki boşlukların ve karstik boşlukların ve çatlakların sağlamlaştırılması için yapılan enjeksiyondur. Enjeksiyon şerbetine dolgu malzemeleri konularak enjeksiyonun özellikleri geliştirilebilir ve bu sayede dayanımı arttırılır.

3.4.1.3 Temel enjeksiyonu

Baraj, köprü, bina gibi zemine çok büyük miktarda basınç uygulayan yapıların oturacağı temelin iyileştirilmesine yönelik yapılan enjeksiyondur. Bu sayede aşırı oturmaları önlemek amacıyla boşlukları doldurma, yeni yapılar veya mevcut yapıların büyütülmesi halinde zeminin emniyetli gerilmesini artırma, yer altı su akımını kontrol altına alma, tünel kazıları sırasında deplasmanları kontrol etme, iksa problemlerini rahatlatmak amacıyla zemin güçlendirmesi, kazıkların düşey ve yatay kapasitelerini artırmak, sıvılaşmaya karşı gevşek kum tabakalarını taşlaştırma, temeli alttan destekleme, şev stabilizasyonu, şişen zeminlerin stabilizasyonu yapılmış olur (Çevik, 2012).

3.4.1.4 Tünel enjeksiyonu

Yer altında yapılan her çalışmada olduğu gibi tünellerde de yapılan kazı sürecinde sahanın jeomekanik özelliklerini korumak ve tünel stabilitesini sağlamak için tahkimatın yanı sıra gerekirse enjeksiyon uygulaması da yapılmaktadır. Enjeksiyon

tahkimat yapımı esnasında veya sonrasında uygulanabilir. Bunlar, kontakt (dokanak) ve konsolidasyon (pekleştirme) enjeksiyonlarıdır.

Kontakt enjeksiyonu

Tünel, galeri, denge bacası, şaft gibi yapılarda kaplama betonu ile temel kaya (veya beton ile çelik kaplama) arasındaki boşlukları doldurmak amacı ile yapılan enjeksiyondur. Bu sebeple 'backfill grouting' (boşluk enjeksiyonu) olarak da adlandırılır (Henn, 1996). Bu boşluklar aşırı sökülme, betonun donma sürecinde oluşan büzülme veya tünel duvarının konumunun tam yerleştirilememesi sonucunda oluşur. Bu sebeple tünelin tepesi kontakt enjeksiyonun başlıca yapıldığı bölgedir (U.S.Army, 1970). Kontak enjeksiyonlarının yapılması için tünel kaplama betonlarının prizini alması ve 28 günlük basınç dayanım değerlerine ulaşması için beklenmelidir. Kontak enjeksiyonlarında uygulanan basınçlar, projeye ve tünel yüksekliğine göre değişkenlik gösterir (Özkan, 2006).

Konsolidasyon Enjeksiyonu

Tünel çevresindeki formasyonların birincil ve ikincil boşluklarının doldurularak birbirine bağlanması, pekiştirilmesi, konsolidasyonunun üzerine gelecek olan yükü taşıyabilecek düzeye çıkarılması ve kuvvetlendirilmesi amacıyla yapılır. Zayıf kaya koşulları ve su sızma problemleri olan bölgelerde yapılması öngörülür. Delik derinlikleri yapının ağırlık ve büyüklüğüne göre değişmektedir. Konsolidasyon enjeksiyonuna kontak enjeksiyonun tamamlanmasından 15 gün sonra başlanılır. Tamamlanmış olan yapının içerisinden uygulama gerçekleştirilir (Pamuk, 2006).

3.4.2 Uygulanan enjeksiyon basıncına göre enjeksiyon türleri

3.4.2.1 Alçak basınçlı enjeksiyon

Enjeksiyonun 10 bar'dan daha az bir basınçla basılması durumudur. Genellikle yüzeye yakın yerlere uygulanırlar. Sondaj derinliği 5-15 metredir (Özocak, 1994). Özellikle tünellerde tahkimat ile formasyon arasındaki boşlukların doldurulması (kontakt) amacıyla yapılan enjeksiyonlar bu sınıfa girer (Pamuk, 2006).

3.4.2.2 Orta basınçlı enjeksiyon

Enjeksiyon basıncının 10-30 bar arasında olduğu durumdur. Sondaj boyları da 15-30 m arasındadır (Özocak, 1994). Barajların, büyük yapıların ve tünellerin ilk 15-30

metrelik kısımlarının enjeksiyon basıncı olup konsolidasyon ve temel enjeksiyonları bu kademeye girmektedir (Pamuk, 2006).

3.4.2.3 Yüksek basınçlı enjeksiyon

Genellikle baraj gövdesi altında ve yamaçlarında geçirimsiz perde oluşturmak için yapılan enjeksiyon uygulamalarında kullanılır ve 30 bar'ın üzerinde basınçla yapılır. Uygulanan basınç, duruma göre 70 bar'a kadar çıkabilir (Özocak, 1994).

3.4.3 Yapılış yöntemlerine göre enjeksiyon türleri

3.4.3.1 Tek kademeli enjeksiyon

Derin olmayan enjeksiyon türleri olan kontak, konsodilasyon, temel ve rezervuar enjeksiyonlarında uygulanabilmektedir. Ancak jeolojinin çok karmaşık ve koşulların çok bozuk olduğu bazı formasyonlarda çok kademeli enjeksiyon da uygulanabilir.

3.4.3.2 Çok kademeli enjeksiyon

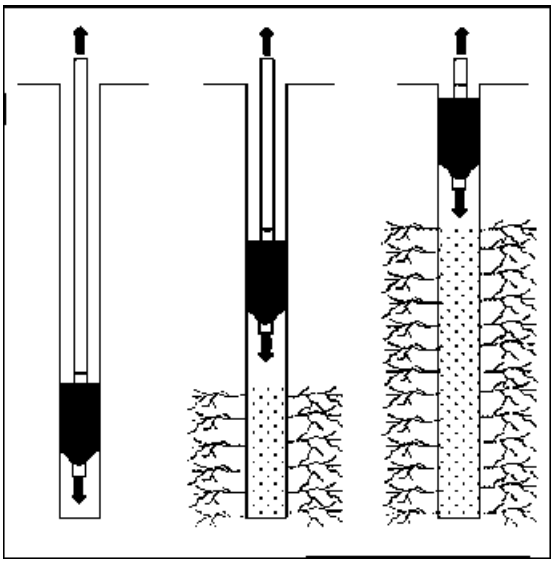
Değişik özelliklere sahip derin enjeksiyon yapılan projelerde tek kademeli enjeksiyon kesinlikle yetersiz kalmakta ve çok kademeli enjeksiyon yapılmasını gerektirmektedir. Çok kademeli enjeksiyonlar yükselen kademe ve alçalan kademe enjeksiyonları olarak ikiye ayrılabilir.

Yükselen kademe enjeksiyonu

Enjeksiyon kuyusunun kendini tutabilen litolojide olduğu koşullarda istenilen derinlikte enjeksiyon yapmaya olanak sağlayan bir yöntemdir.

Kuyu taban derinliğine kadar delinir ve tıkaç (paker) deliğin istenilen derinliğine tutturulur. Tıkaç tutturulmadan önce kuyu yıkanır. Temel kayadaki çatlak ve eklemlerin kuyudaki üst sınırına tıkaç tutturarak etkili bir enjeksiyon yapılabilir.

Bu yöntemle aşağıdan yukarıya doğru belirli aralıklarla sistematik olarak tıkaç tutturularak enjeksiyon yapılır. Kuyu sondajı bittikten sonra enjeksiyon uygulamasına geçildiği için bu yöntemde zaman oldukça kısalmaktadır. Daha çok geçirimsizlik sağlama amacıyla yapılan bir uygulamadır (Özkan, 2006)**. Şekil 3.3**'te yükselen kademe enjeksiyon gösterilmektedir.

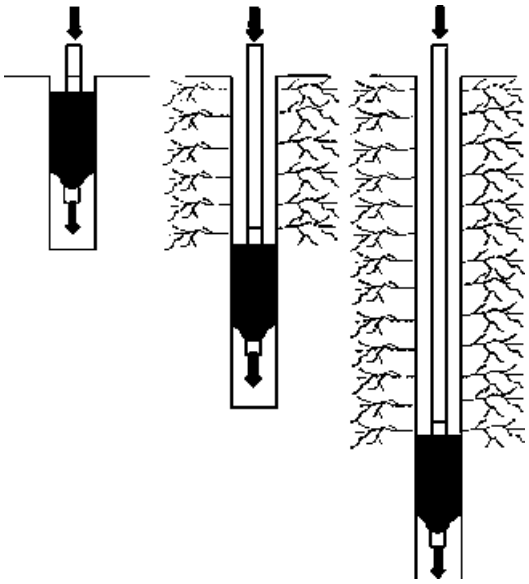


Şekil 3.3 : Yükselen kademe enjeksiyon.

Alçalan kademe enjeksiyonu

Bu yöntem kuyuda yıkıntı olabilecek çok çatlaklı ve taneli zeminlerde ve karstik boşlukların doldurulmasında da kullanılır.

Kuyu birinci kademe için önceden belirlenen derinliğe kadar delinir, delik enjeksiyon öncesi yıkanır, su testi yapılır ve enjeksiyon işlemi basınç altında gerçekleştirilir. Bunu izleyerek çimento henüz katılaşmaya başlarken delikteki çimento şerbeti yıkanır ve ikinci kademe için yukarıda yapılan işlemler, kaya içindeki çimento şerbeti tamamen prizini aldıktan sonra tekrarlanır. Her kademe için kuyu derinleştikçe basınç artırılır. Bu yöntem pahalı olmasına rağmen, yüzeyden olacak sızmaları en aza indirgeyecek bir sistem olduğu için tercih edilir. Bunun yanında her kademede uygulanan işlemin fazlalığı ve priz süresince bekleme durumu olduğundan uzun zaman alan bir yöntemdir (Özkan, 2006). **Şekil 3.4**'te alçalan kademe enjeksiyon gösterilmektedir.



Şekil 3.4 : Alçalan kademe enjeksiyon.

3.4.4 Enjeksiyon kuyularının geometrik konumuna göre enjeksiyon türleri

Bulunulan konum ve enjeksiyon yapılmak istenen noktanın durumunun birbiriyle ilişkisine göre farklı yön ve doğrultularda bu işlem gerçekleştirilebilir. Bunlar dikey, yatay, ışınsal ve açılı ışınsal enjeksiyon olarak sıralanabilir.

3.4.5 Enjeksiyonda kullanılan karışım maddelerine göre enjeksiyon türleri

3.4.5.1 Çimento enjeksiyonu

Geniş bir kullanım alanı olan çimento (Portland çimentosu), enjeksiyonda da kullanılan maddelerin başında gelmektedir. Enjeksiyonun türüne, amacına ve kayacın özelliklerine göre çeşitli maddelerle karıştırılabildiği gibi sadece su ile karıştırılarak da kullanılabilir. Çimento+su, çimento+kil+su, çimento+kil+kaya tuzu, çimento+baca külü+su başlıca karışım şekilleridir. Çimento enjeksiyonunda ayrıca, enjeksiyonun gidişine göre prizi hızlandırıcı ($CaCl_2$, $NaCl_2$ ve $NaSiO_3$), priz geciktirici (doygun tuzlu su, karbonatlar, alçıtaşı, Fe ve Mg tuzları) ve diğer kimyasal maddeler kullanılabilir (Pamuk, 2006).

3.4.5.2 Kimyasal enjeksiyon

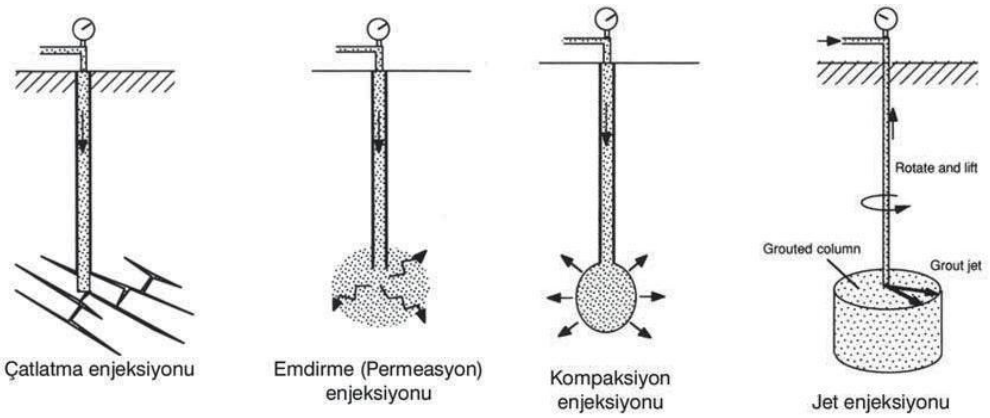
Kimyasal enjeksiyon, enjeksiyonun maksimum mukavemeti göstermesi ve formasyonun en ince süreksizliklerine kadar enjekte edilebilmesinin istenildiği durumlarda çimento ile karıştırılarak kullanılır. Dolayısıyla çimento enjeksiyonundan

daha pahalıdır. Kimyasal enjeksiyonların bir kısmı zehirlidir ve korozyona sebep olmaktadır. Bundan dolayı zorunlu hallerde kullanılması daha uygundur.

Kimyasal enjeksiyonlar genellikle %10 ile %20 arasında ince tane içeren zeminlere permeasyon (emdirme) tekniğiyle enjekte edilmektedir. Başlıca kimyasal enjeksiyon maddeleri silikatlar, reçineler, polimerler ve akrilamitlerdir. Yaygın olarak kullanılanı silikat enjeksiyonlarıdır (Keskin, 2010).

3.5 Enjeksiyon Teknikleri

Enjeksiyon işlemi amacına yönelik farklı basınçlarda ve farklı özellikte enjeksiyon şerbetleri kullanılarak çatlatma enjeksiyonu, emdirme (permeasyon) enjeksiyonu, kompaksiyon enjeksiyonu, jet enjeksiyonu şeklinde yapılabilir (Mitchell J. K., 1981). **Şekil 3.5**'te enjeksiyon teknikleri gösterilmektedir (Tunçdemir, 2004).



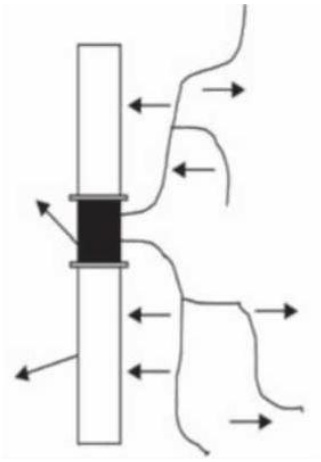
Şekil 3.5 : Enjeksiyon tekniklerinin şematik gösterimi.

3.5.1 Çatlatma enjeksiyonu

Çatlatma enjeksiyonu Avrupa'da ortaya çıkmakla beraber diğer enjeksiyon tekniklerine göre daha yenidir. Burada zeminin kontrollü bir şekilde, kararlı fakat düşük vizkoziteli çimento enjeksiyonu ile yüksek basınçlarda (40 bar) çatlatılması söz konusudur. Çatlatma enjeksiyonunun gelişimi tünel veya kazı aktiviteleri esnasında meydana gelen oturmaları önleme çalışmalarına dayanmaktadır.

Çatlatma enjeksiyonu sonucunda zemin içerisinde ağaç dallarına benzer bir şekilde sertleşmiş çimento kanalları oluşmakta ve bu sayede zemin kontrollü bir şekilde ve bölgesel olarak sıkıştırılmaktadır (**Şekil 3.6**). Çimento şerbeti başlangıçta yüksek basınçlarda enjekte edilmekte ve zeminin çatlamasıyla beraber oluşan çatlaklar

çimento ile doldurulmaktadır. Oluşan çatlakların boyu, genişliği ve hacmi enjeksiyon basıncına ve mevcut geostatik gerilmelere bağlıdır (Tunçdemir, 2004).



Şekil 3.6 : Çatlatma enjeksiyonu ile oluşan çatlaklar ve yatay sıkıştırma.

Bu enjeksiyon tekniği temel olarak emdirme enjeksiyonunun mümkün olmadığı düşük geçirimliliğe sahip, ince daneli zeminlerin stabilizasyonunda uygulanmaktadır.

3.5.2 Emdirme (permeasyon) enjeksiyonu

Emdirme enjeksiyon en eski ve en çok kullanılmış enjeksiyon çeşididir. Bu enjeksiyon tekniğinde düşük viskoziteli enjeksiyon malzemesi, zemin içerisindeki boşluklara, düşük basınçlarda nüfuz etmekte dolayısıyla zeminin hacmi ve yapısında bir değişiklik meydana getirmemektedir. Zemin içerisine enjekte edilen malzeme zamanla sertleşir ve böylece zeminin mekanik ve hidrolojik özelliklerini değiştirerek mukavemeti arttırır ve geçirgenliği azaltır. Amaç zeminin daneleri arasındaki boşlukları doldurmak olduğundan enjeksiyon malzemesi zeminin dane[1] çapı göz önünde bulundurularak seçilmektedir (Mitchell & Wade, 1992).

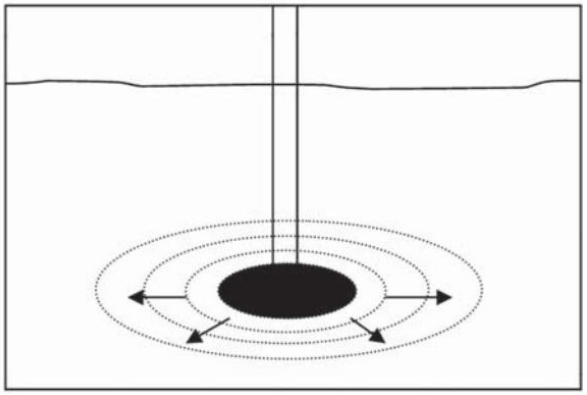
3.5.3 Kompaksiyon enjeksiyonu

50 yıl kadar önce ABD'de uygulanmaya başlayan kompaksiyon enjeksiyonu yöntemi, çoğunlukla zayıf veya yumuşak zeminlerin sıkıştırılmasında, temel ve döşemelerin alttan desteklenmesinde, yapı oturmalarının kontrol edilmesinde, farklı oturmalar gösteren yapı temellerinin rehabilitasyonunda ve tekrar eski seviyelerine yükseltilmesinde kullanılmıştır (Warner & Brown, 1982). Kompaksiyon enjeksiyonu tüm zeminler için kullanıldığından diğer enjeksiyon yöntemlerinden ayrılmaktadır.

[1] Zemini oluşturan parçacık

Kompaksiyon enjeksiyonu zeminin türü ve yapısına göre genellikle 2 ile 4 m aralığında uygulanmaktadır (Mollamahmutoğlu & Babuçcu, 2006).

Kompaksiyon enjeksiyonu, yüksek basınç altında viskoz bir karışımın zemin içine enjekte edilmesi işlemidir. Zemin içine enjekte edilen şerbet, enjekte edildiği bölgede topaklanarak zemini sıkıştırmaktadır. Dolayısıyla bu yöntemde enjekte edilen şerbetin zemin boşluklarına girmeksizin zemin içinde bir kütle oluşturulması amaçlanmaktadır. Zemini iç bölgeden sıkıştırmaya yönelik bu işlem için yüksek basınçlar gerekmektedir. Su-çimento-kum ve bentonit karışımından oluşan bu şerbet zemine yaklaşık 4 bar basınçla enjekte edilir (Genç, 2008). Bu uygulama sonucunda zeminin orjinal yapısı bozularak radyel olarak sıkıştırılır. Bu yöntem çoğunlukla zayıf veya yumuşak zeminlerin sıkıştırılmasında uygulanır. **Şekil 3.7**'de kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi verilmiştir (Essler, Drooff, & Falk, 2000).



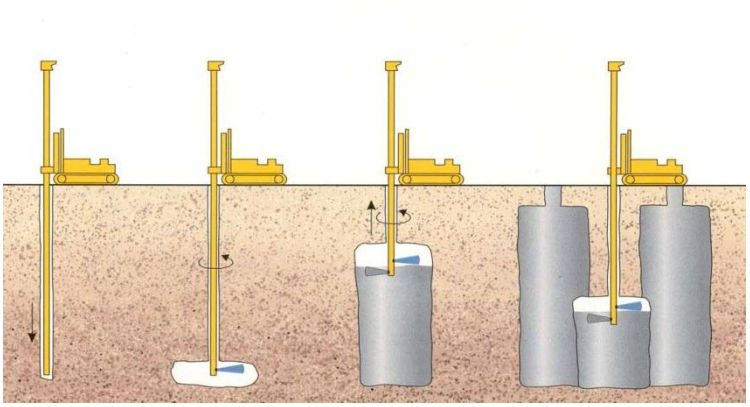
Şekil 3.7 : Kompaksiyon enjeksiyonunun şematik gösterimi.

3.5.4 Jet enjeksiyonu

Yeni ve oldukça pahalı olan jet enjeksiyonu, zeminin yerinde enjeksiyon materyali ile karıştırılması işlemidir. Sondaj makinesi ile istenilen derinliğe inildikten sonra sondaj serisi kendi ekseni etrafında dönerek yavaşça yukarı çekilir (**Şekil 3.8**). Bu esnada enjeksiyon malzemesi çok yüksek basınçla (400-700 bar) zeminin içine sondaj borularında bulunan enjektörler ile püskürtülür. Zemin parçalanarak enjeksiyon malzemesiyle biririne karışır (Demiröz & Karaduman, 2009).

Oluşan bu yapıya çimentolu zemin anlamına gelen 'soilcrete' denilmektedir (Welsh & Burke). Bu yapı ile zemin iyileştirilerek düşük permeabiliteli ve yüksek dayanıma

sahip formasyonlar elde edilir (Kim & Lee, 1998). Jet enjeksiyon yöntemi bu amaca ulaşılmasında en iyi enjeksiyon metotlarından biridir (Bakım, 2007).



Şekil 3.8 : Jet enjeksiyonu işlemi.

Jet grouting yöntemi, hemen her tür zayıf zemin tiplerinde ve kum, çakıl, kil gibi doğal zemin elemanlarının oluşturduğu kombinasyonlarda, diğer iyileştirme metotlarından (mini kazık, dinamik kompaksiyon, vip dren, zemin dondurulması vb.) daha hızlı, güvenilir, kalıcı ve ekonomik bir çözüm alternatifidir. Geleneksel enjeksiyon metotlarına karşı ise; zemin iyileştirici çimentonun miktarı delme ve sevk işleminden önce hesaplandığı için, işin birim ve toplam maliyetlerine çok hassas yaklaşımlar mümkündür. Temel takviyesinde deformasyonların az oluşu, kolonların istenilen derinliklerde üretilebilmesi, arazi şartlarına göre inşaat süresini %30-60 kısaltabilmektedir.

Jet enjeksiyon methodunun çok geniş uygulama alanları vardır (Bakım, 2007). Yöntemin en çok kullanıldığı alanlar; derin temeller, tünel kazısı öncesi zemin ıslahı ve tünel duvar takviyeleri, yeni temellerin takviyesi, eski temellerin güçlendirilmesi, iksa duvarları, dip tapalan, zemin suyuna geçirimsiz perdeler, şev stabilizasyonu, zemin ankrajlan, sığ kazılarda şevlerin tutulması, kazı tabanından su gelmesinin Önlenmesi, zemin (Lunardi, 1977).

3.6 Enjeksiyon Malzemesi

Enjeksiyon işlemlerinde kullanılan enjeksiyon malzemeleri olarak su, çimento, dolgu malzemeleri ve katkı maddeleri olarak sıralanabilir.

3.6.1 Su

Su, karışıma akışkanlık özelliğini veren ve en ucuz olması itibarı ile en yaygın kullanılan maddedir. Çimento esaslı karışımlarda kullanılan su; içmeye uygun, içinde bakteri bulunmayan, % 5'den fazla sülfat, % 0.5'den fazla klorid, şeker, yosun gibi asılı madde bulundurmayan veya yüksek alkali içermeyen sular olmalıdır (Özocak, 1994).

3.6.2 Çimento

Günümüzde en çok kullanılan hidrolik bağlayıcı olan çimento, enjeksiyonun ana maddesini oluşturur. Su ile tepkimesinde sertleşerek etrafındaki maddeleri birbirine yapıştırma özelliğine sahip malzemelere denilen çimento; kalker, kil, alçıtaşı, silisli kumun çeşitli işlemler sonrasında karıştırılmasıyla elde edilir.

Türk Standartlarında yer alan başlıca çimento türleri şunlardır:

Portland çimentosu (PÇ 32,5): Bu çimentolar katkısız çimentolardır. Hammadde karışımının pişmesi sonucunda elde edilen klinker %3-5 oranında alçı taşı katılarak öğütülmesi sonucunda elde edilir.

Yüksek dayanımlı Portland çimentoları (PÇ 42,5 , PÇ 52,5) : Bunlar da Portland çimentosu sınıfından olup dayanımları daha yüksektir, özgül yüzeyleri ve C3S miktarları daha yüksek katkısız çimentolardır.

Erken dayanımı yüksek çimentolar (EYÇ 52,5): Bunlar daha kısa sürede yüksek dayanım kazanan, katkısız çimentolardır.

Beyaz Portland çimento (BPÇ 70, BPÇ 85): Bunlar dekoratif amaçlı katkısız çimentolardır. Dekoratif açıdan önemli olmalarına rağmen dayanım bakımından Portland çimentoları ile eşdeğer olarak üretilmektedirler. Hammaddeleri kimyasal bileşim bakımından özenle seçilir.

3.6.3 Dolgu malzemeleri

Dolgu malzemelerinin amacı karışımın homojenliğini artırmak ve enjeksiyon masraflarını azaltmaktır. Belirli dolgu malzemeleri kullanılarak teknik avantajlar sağlanabilir. Bunlar; su kusmayı azaltma, priz geciktirme ve akıcılık artırma şeklindedir.

Kullanılan dolgu malzemeleri puzzolanlar (volkanik kül, tüf), ince kumlar ve killer ve diğer katkı maddeleridir. Bunlardan puzzolanlar reaksiyona girerken, kumlar ve killer girmezler.

Puzzolanlar, silikatlar ve alüminyum silikatlar gibi kendi kendine çimento (aşmazlar, bir çimentolu bileşik oluşturmak için su içinde serbest kireç ile reaksiyona girerler. Doğal olarak oluşan puzzolanlar ince bir şekilde zemin arduvası, sünger taşı ve diatomit içerirler; toz kömürün yanması sonucu yan ürün olarak ortaya çıkan uçucu kül ve taşlaşmış yüksek fırın cürufu suni puzzolanlara örnektir. Bu uçucu kül ve cüruf artık malzemelerdir. Puzzolanlann maksimum dane boyutu olarak 0.5 mm tavsiye edilir.

İnce kumlar, ekonomik enjeksiyon yapmak için saf su-çimento karışımına katılır. Gerekli olan kayma mukavemeti görece olarak fazla sürtünmeli, az sulu karışımlara kum katarak elde edilebilir. Kum dayanıklılık, büzülme ve alkali reaksiyonlara dayanıklı olma özelliği olduğu için tercih edilir. Kullanılacak kum, sert ve dayanıklı taşların kumu olmalıdır. Danelerin şekli, genel olarak yuvarlak veya kübik, ince ve orta irilikte olmalıdır. İçinde organik maddeler ile sodyum sülfat ve kil olmamalıdır.

Killer, çok küçük dane boyutlarına sahip olduklarından su emme kapasiteleriyle düşük konsantrasyonlarda bile çimentonun çökelmesini önleyerek karışımın stabilitesini artırırlar. Genellikle illit ve kaolinit kili kullanılır. Gerekli mukavemetin istendiği kaya enjeksiyonu ve zemin konsolidasyonunda, kil muhtevası bentonit kullanılarak minimumda tutulur. Su/Çimento oranı = 1-3 değerleri için %2-5 oranında bentonit kullanılır. Bentonit kolloidal özellik gösteren, plastisitesi yüksek olan bir kil çeşitidir. Bentonit hidrolik sızdırmazlık amacıyla perde enjeksiyonunda kullanılır (Özocak, 1994).

3.6.4 Katkı maddeleri

Katkı maddeleri, karışımın özelliklerini değiştirmek amacıyla küçük oranlarda karışıma katılarak kullanılmaktadır. Fazla aluminalı ve fazla sülfatlı çimentolarla uyumlu değildir. Katkı maddeleri iyi bir karışım yapmak için yedek malzeme olarak kabul edilmemelidir ve rastgele kullanılmamalıdır. Katkı maddeleri hızlandırıcı, geciktirici, akışkanlık artırıcı, hava sürükleyici, genişletici ve su kusmayı önleyici maddeler olarak sınıflandırılmaktadır (Özocak, 1994).

Çizelge 3.2'de yaygın olarak kullanılan çimento katkı maddeleri, kimyasal bileşimleri, optimum dozajları ve özelliği verilmektedir.

Çizelge 3.2 : Çimento katkı maddeleri.

Katkı maddesi	Kimyasal Bileşim	Optimum Dozaj	Notlar
Hızlandırıcı	kalsiyum klorür	1-2	donma ve pekleşmeyi hızlandırır
	sodyum silikat sodyum aluminat	0.5-3	donmayı hızlandırır
Geciktirici	kalsiyum lignosülfanat	0.2-0.5	Akışkanlığı arttırır ve pekleşme mukavemetini etkiler
	tartarik asit	0.1-0.5	
	şeker	0.1-0.5	
Akışkanlık Artırıcı	kalsiyum lignosülfanat	0.2-0.3	
	deterjan	0.05	havayı tasfiye eder
Hava Sürükleyici	vinsol reçine	0.1-0.2	%10'a kadar havayı tasfiye eder
Genişletici	alüminyum tozu	0.005-0.02	%15'e kadar genişleme (priz sonrası)
	doymuş tuzlu su	30-60	%1'e kadar genişleme (priz sonrası)
Su Kusmayı önleyici	selüloz eter	0.2-0.3 (s/ç =0,7)	karışım suyunun *%5'* İne eşdeğer
	alüminyum sülfat	%20'e kadar (s/ç <5 için)	havayı tasfiye eder

3.7 Enjeksiyon Ekipmanları

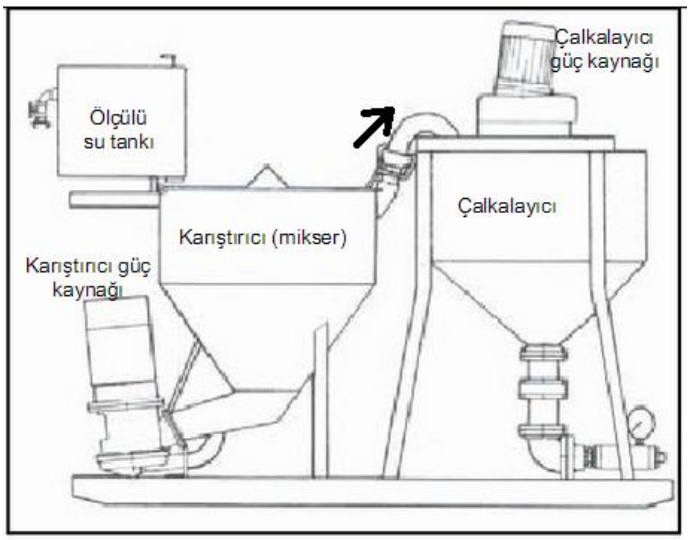
3.7.1 Karıştırıcı ve çalkalayıcı

Karıştırıcılar (mixer); çimento, bentonit, kum, su ve gerektiğinde kimyasal maddeleri homojen halde birbirine karıştırmak için mekanik olarak çalışan dönme hızı yüksek (1500 devir/dakika) ekipmanlardır. Karışıma giren maddelerin oranını dikkatle kontrol etmek amacıyla üzerlerinde tartı cihazı ve duyarlı ölçü kapları bulundurulur. Karıştırıcılarda, silindirik karıştırma haznesi içine monte edilmiş bir mil ve buna bağlı kanatlar yardımıyla karışıma katılan maddeler birleştirilir. Karıştırma haznesindeki mil ve kanatların hareketi, haznenin tabanına veya üstüne yerleştirilmiş olan güç kaynağından sağlanır. Mile hareketi sağlayan güç kaynağı,

elektirikli, hidrolik veya havalı sistem olabilir. Karıştırıcılar, dönen millerin konumlarına ve karıştırırken hazne içinde oluşan sekile göre sınıflandırılabilir. Buna göre kolloidal karıştırıcı, lastik kanatlı karıştırıcı, kürek şeklinde kanatlı karıştırıcı gibi türleri vardır (Özkan, 2006).

Çalkalayıcı (agitator); hazırlanmış olan enjeksiyon karışımlarında taneciklerin askıdaki (süspansiyon) durumlarını korumak için mekanik olarak karıştırıcı düzeneğe sahip silindirik tanklardır. Çalkalayıcılar, karıştırıcı hacimlerine göre en az eşit veya daha büyük hacimde olmalıdır. Çimento enjeksiyonlarında kullanılan çalkalayıcıların kapasiteleri 400 - 700 litre arasındadır (Craelius, 1990). Çalkalayıcılar, kırıntı ve yabancı maddelerin enjeksiyon pompasına gitmesini önleyecek şekilde bir elek ile donatılmıştır. Bir deliğe veya enjeksiyon kademesine verilen enjeksiyon karışım hacmini ölçmek için bazı çalkalayıcılarda, litre cinsinden hacmi belirten bir ölçek sistemi bulunmaktadır.

Çalkalayıcılarda, karıştırıcılarda olduğu gibi kanatların dönmesini sağlayan güç kaynağı, elektirikli, hidrolik veya havalı sistem olabilir. Çalkayıcıların dönme hızları karıştırıcılara göre daha yavaştır (60- 100 devir/dakika). Dönüş hızının azaltılması bir dişli sistemiyle sağlanır. Geri dönüşlü enjeksiyon yönteminde, enjeksiyon deliğinden geri dönen enjeksiyon karışımı çalkalayıcılara aktarılır (Özkan, 2006). **Şekil 3.9**'da karıştırıcı ve çalkalayıcının şematik gösterimi verilmektedir.



Şekil 3.9 : Karıştırıcı ve çalkalayıcının şematik gösterimi.

3.7.2 Enjeksiyon pompası

Enjeksiyon pompaları, uygulanacak enjeksiyon işlerine göre çeşitli çalışma basıncına sahip, çimento yanında, orta ve kaba boyuttaki (1-8 mm) kumlu karışımları da basabilecek kapasitede basınç ve akım özelliklerini taşıyan pompalardır. **Şekil 3.10'**da görüldüğü gibi enjeksiyon işlerinde işin niteliğine ve ortamına göre yaygın olarak pistonlu ve helozonik pompalar kullanılır (Özkan, 2006).



Şekil 3.10 : Enjeksiyon pompası.

3.7.3 Manometre

Uygulanacak enjeksiyon işlerine göre çeşitli kapasitede ve yağ içinde çalışan manometre (basınç ölçer) anlık enjeksiyon basıncını gösteren ekipmandır **(Şekil 3.11)**. Enjeksiyonda çalışacak manometreler içi yağ dolu ve özel diyafram içeren manometre koruyucusu ile donatılmıştır. Farklı çapta hortumlara veya borulara bağlanabilecek şekilde ve değişken basınç değerlerine göre üretilir (Chemgrout Inc., 2002). Basınç ölçerlerin (manometrelerin) kayıt yapabilen tipleri de bulunmaktadır (Özkan, 2006).



Şekil 3.11 : Manometre.

3.7.4 Tıkaçlar

Enjeksiyon delgilerinde kademeli enjeksiyon işlerinin yapılabilmesi için tıkaçlar kullanılır. Mekanik yolla genişleyen veya hava - sıvı yardımıyla şişirilebilen lastiğin yardımıyla tıkaç kuyu içine sıkıca tutturulur. Bu lastik yardımıyla enjeksiyon işlemininin yapıldığı kademenin diğer kademe ile bağlantısı kesilmiş olur. Böylece sadece o kademede enjeksiyon işlemi gerçekleştirilir (Özkan, 2006). Enjeksiyon uygulamalarında kullanılan tıkaç **Şekil 3.12**'de görülmektedir.



Şekil 3.12 : Tıkaç (paker).

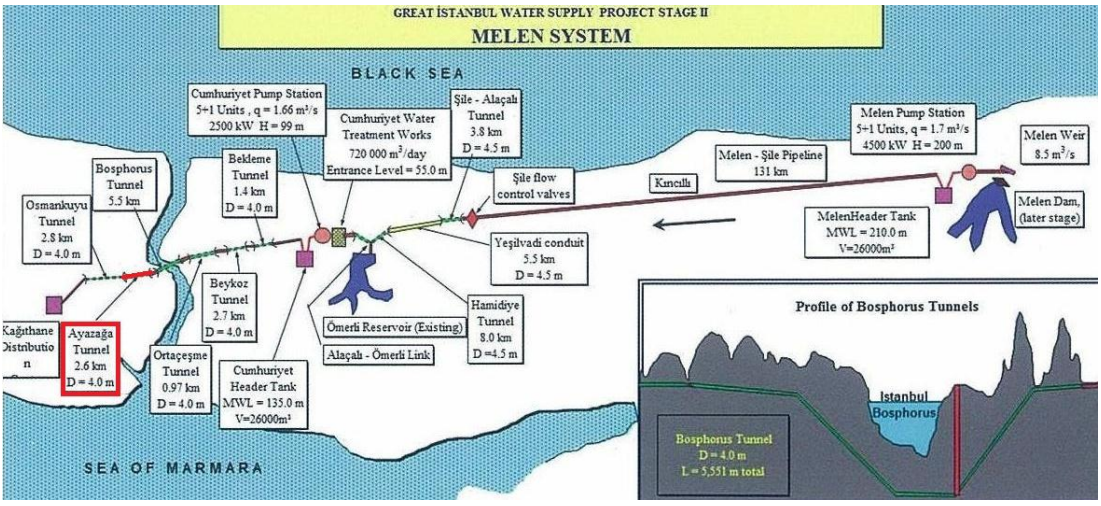
4. AYAZAĞA TÜNELİ

4.1 Giriş

İstanbul'a Melen Çayı'ndan su taşıyacak olan 'Büyük İstanbul II. Merhale Melen Sistemi'nin 'SP-6 Cumhuriyet Terfi Deposu-Kağıthane Arası İsale Hattı' etabı içerisinde kalan Ayazağa Tüneli, 4 m çaplı, 2557 m uzunluğunda dairesel kesitli çelik kaplamalı iletim borusunu kapsamaktadır (**Çizelge 4.1, Şekil 4.1**).

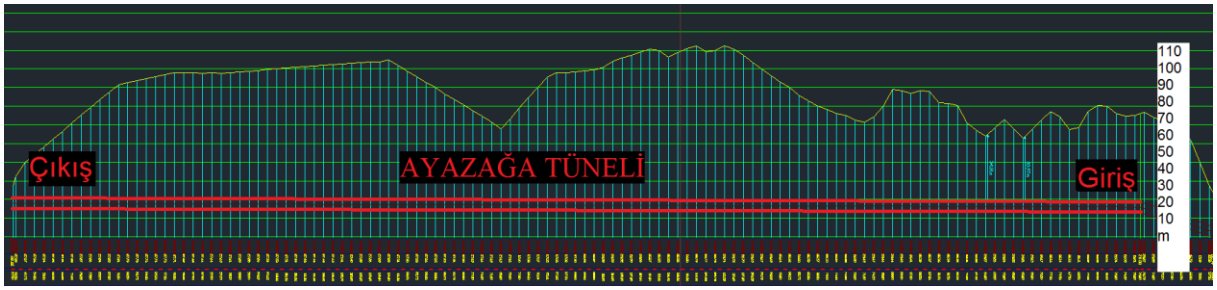
Çizelge 4.1 : SP-6 Cumhuriyet terfi deposu-kağıthane isale hattı bilgisi.

Projenin Adı	Cum. Terfi Tankı -Osmankuyu -Kağıthane Arası Boru Hattı
Maksadı	İçmesuyu
İşin Muhtevası	12 170 m isale hatt ı+ 4 887 m kondüvi + Tünel İnş.
Yeri	Ortaçeşme-Boğaziçi-Ayazağa
Müteahhidin Adı	ALKE-ATAÇ Müş .Teşebbüs Ort. + (ERCİYAS Boru)
İhale Bedeli	35 565 689 TL
İşe Başlama- BitişTarihi	12.01.2001-24.04.2011
Fiziki Gerçekleşme (%)	87
Kapasitesi	∅ 2500 ve ∅ 4000 mm boru 12 170 m + 4 887 m tün.
Jeoloji	Ordiv. Altere kumtaşı-Çam.taşı-Silttaşı ve Konglom.
Kamulaştırma	24 ha yapıldı (7525 ha kam.ve 9975 m^2 geçici irtfak)



Şekil 4.1 : Büyük İstanbul II. Merhale Melen Sistemi.

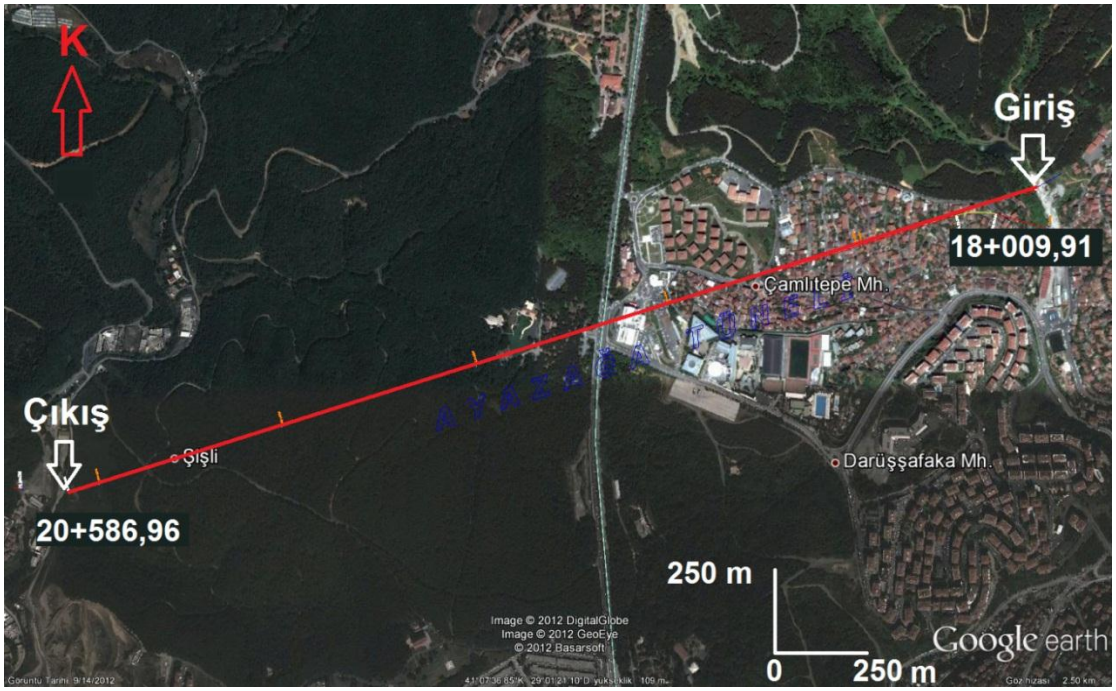
Tünel giriş ile çıkış noktaları arasında 2 m'lik kot farkı olması sebebiyle çıkış yönünde % 0,08 eğimle yükselmektedir (**Şekil 4.2**). Tünel üzerindeki örtü kalınlığı ortalama 90 m'dir. Tünel tasarımı 32 m³/s'lik nihai akım kapasiteli, basınç altında suyu taşıyacak şekilde projelendirilmiştir (DSİ, 2010).



Şekil 4.2 : Ayazağa Tüneli kesiti ve topoğrafya.

4.2 Konum

Çalışma sahası İstanbul Boğazı'nın batı yakasında bulunan Şişli İlçesi'ne bağlı olan Ayazağa bölgesinde bulunmaktadır. Büyükdere Caddesi'nin altından geçmekte olan Ayazağa Tünelinin giriş kısmı yerleşim yeri içerisinde, çıkış kısmı ise ormanlık alan içerisinde bulunmaktadır (**Şekil 4.3**).



Şekil 4.3 : Ayazağa Tüneli'nin konumunun uydu görüntüsü.

4.3 Genel Jeoloji

Çalışma alanı ve dolayındaki jeolojik birimler yaşlıdan gence doğru Devoniyen yaşlı Kartal Formasyonu, Karbonifer yaşlı Trakya Formasyonu, Neojen yaşlı Belgrad Formasyonu, Kuvaterner yaşlı Alüvyon olarak sıralanabilir. Trakya Formasyonu içerisinde andezit ve diyabaz magmatik sokulumları bulunmaktadır. (Emiroğlu, 2010).

Kartal Formasyonu; büyük bölümüyle kil-silt-ince kum boyu kırıntılı kayalardan oluşur. Taze iken kara-koyu külrengi, ayrışmışı boz-açık kahverengi, ince-orta katmanlı, yarılgan, bol mikah şeyiller formasyonun egemen kaya türünü oluşturur. Seyrek olarak, 5-10 cm arasında değişen kalınlıkta ince gereçli kumtaşı ve makrofosil kırıntılı kireçtaşı ara düzeylerini kapsar. Kartal Formasyonu, başta brakyopod olmak üzere krinoid, mercan, trilobit, bryozoa, gastropod vb. çok çeşitli ve zengin makrofosil kapsar; bu özelliği ile, sahada diğer kırıntılı kaya istiflerinden, örneğin Yayalar ve Trakya Formasyonları'ndan, kolayca ayırt edilebilir. Zengin fosil kapsamına dayanılarak, formasyonun Erken Devoniyen (Emsiyen) ve Erken Devoniyen-Orta Devoniyen geçişini temsil ettiği bilinmektedir (Paeckelmann, 1938), (Önalan, 1981), (Babin, 1973), (Carls, 1973), (Gandl, 1972).

Trakya Formasyonu; büyük bölmüyle kumtaşı, silt, şeyil ardalanmasından oluşur. Yer yer çakıltaşı ve alt kesimlerinde, değişen kalınlıkta kireçtaşı arakatkı ve merceklerini kapsar. Trakya Formasyonu'nun büyük bölümünü oluşturan kırıntılı düzeyleri fosil bakımından kısırdır. İstifin en alttaki şeyilleri içinde Erken Karbonifer mikrofauna ve florası saptanmıştır (Yalçınlar, 1951), (Kaya & Mamet, 1971).

Andezit ve Diyabaz daykları; birçok noktada kaya birimlerini kesmektedir. İnceleme alanında karşılaşılan ve kalınlıkları 10 cm ile 2-3 m arasında değişen daykların genellikle parçalanmış zayıf kaya zonlarında yer almaktadır. Yüzeye yakın kesimlerde dayklar çoğunlukla ayrışmış olup sarımsı kahve renkli, orta ayrışmış kesimlerde açık gri yeşilimsi ve beyaz benekli, ayrışmamış kısımlarda ise açık gri-yeşilimsi renklerde gözlenir (İstanbul Metrosu Darüşşafaka-Hacıosman arası Geoteknik Değerlendirme Raporu, 2007).

Belgrad Formasyonu; Trakya Formasyonu'nu uyumsuz olarak örtmüştür. Bu birim en altta gri, grimsi bej, kırmızımsı gri renkli, çok ince taneli, çapraz tabakalanmalı, üste doğru tane boyunda belirgin bir derecelenme görülen kum ve içinde sarımsı

renkli kilce zengin ve gri renkli alüminyumca zengin kil-şeyl ardalanmasına sahiptir. Belgrad Formasyonu'nun çökelme ortamı karasal olarak düşünülmüştür (Yalçınlar, 1954). (Paeckelmann, 1938), (Abdüsselamoğlu, 1963) ve (Önalan, 1981) Neojen yaşlarını vermişlerdir.

Alüvyon; çalışma alanında stratigrafik istifin en genç birimidir. Özellikle dere kenarlarında ve alçak kesimlerde yaygın bulunmakta olup gri-koyu gri arasında bir renge sahiptir. Alüvyonlar genellikle tutturulmamış kil-silt-kum ve ufak çakıllı seviyelerin birbiriyle geçişli ve ardalanımından oluşmakla ve yaklaşık olarak 5 ile 25 m kalınlık göstermektedir (Güler, 2006).

4.4 Tünel Tahkimat Tipleri

Ayazağa Tüneli, Yeni Avusturya Tünel Açma Yöntemi (NATM) ile genellikle delme-patlatma yapılarak açılmıştır. Patlatmanın izin verilmediği ve zemin koşullarının uygun olduğu yerlerde darbeli kırıcı ile mekanize kazı yapılmıştır.

Ayazağa Tüneli'nde kaya sınıflandırması için tünellerde gerekli destek sistemini, sistemin ayakta durma süresini ve bir ayna için maksimum ilerleme miktarını belirlemek amacıyla Barton'un Q sınıflama sisteminden faydalanılmıştır.

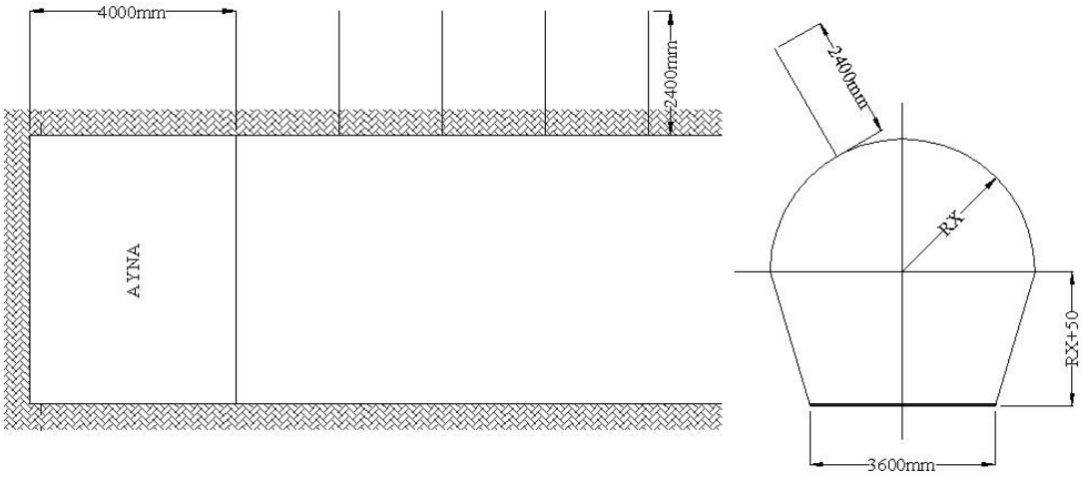
Jeoloji mühendisleri tarafından formlara işlenen kazı aynası jeoloji profilleri sayesinde ortamlara ait Q değerleri hesaplanarak uygulanacak tahkimat tipleri belirlenmiştir. Q değerlerine karşılık DSİ (Devlet Su İşleri) tarafından karar verilen tahkimat tipleri aşağıdaki başlıklarda detaylı verilmiştir. Bunlar Tip I, Tip II, Tip III, Tip IV ve Tip V olmak üzere beş farklı tahkimat sistemidir. **Çizelge 4.2**'de Q değerlerine karşılık gelen tahkimat tipi ve uzunlukları verilmiştir.

Çizelge 4.2 : Q değerleri, kazı tipleri, kazı uzunlukları.

Q	Tahkimat tipi	Kazı uzunluğu (m)
l,0 <	I	4
0,4 - 1,0	II	4
0,1 - 0,4	III	3
0,04 - 0,1	IV	1,5
≤ 0,04	V	1,5

4.4.1 Tahkimat tipi I

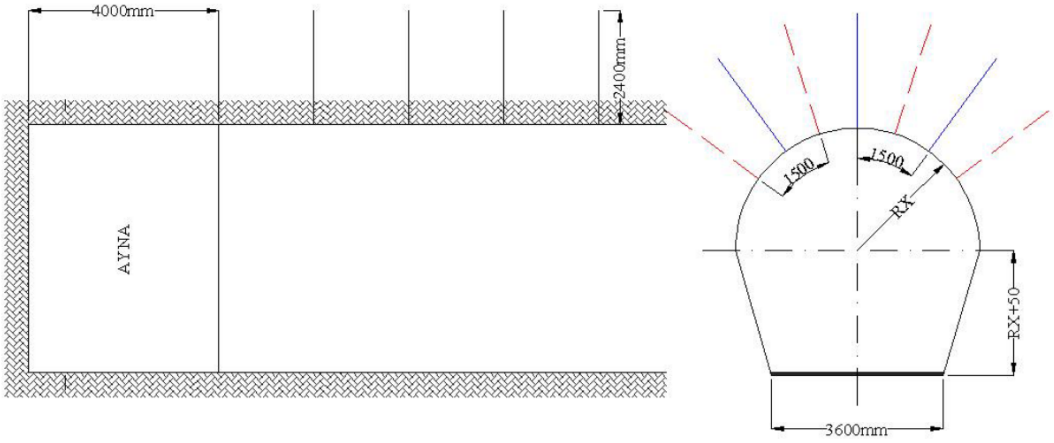
Bu tahkimat tipi için tipik kazı uzunluğu 4000 mm'dir. Gerektiğinde 2400 mm uzunluğundaki kaya bulonu 10 m tünel uzunluğunda en çok 10 adet olacak şekilde yerleştirilir. Taban grobetonu ortalama 50 mm kalınlığında olmalıdır. Tahkimat Tipi I için boy ve en kesiti **Şekil 4.4**'te gösterilmektedir.



Şekil 4.4 : Tahkimat tipi I boy ve en kesiti.

4.4.2 Tahkimat tipi II

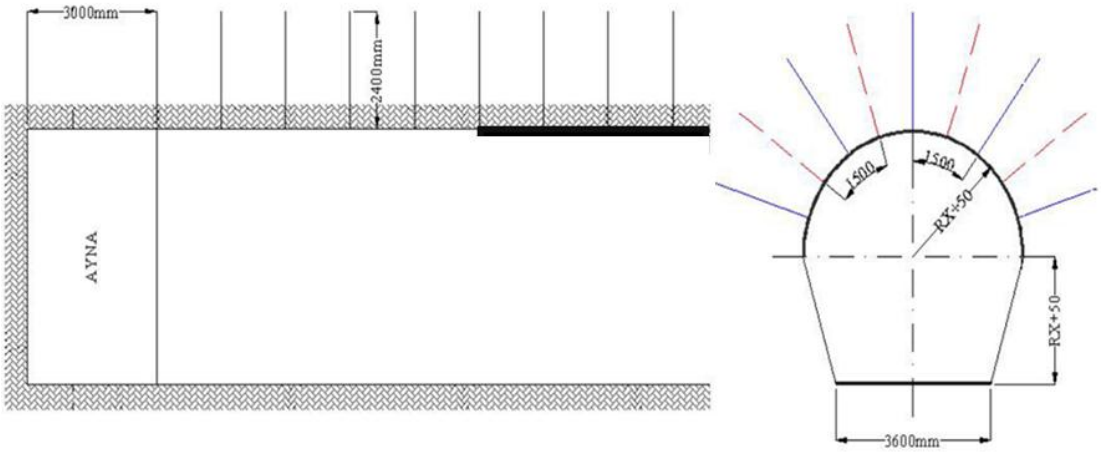
Bu tahkimat tipi için tipik kazı uzunluğu 4000 mm'dir. 3-4 adet 2400 mm uzunluğunda şaşırtmalı kaya bulonu boyuna yönde 1500 mm aralık bırakılarak yerleştirilir. Taban grobetonu ortalama 50 mm kalınlığındadır. Tahkimat Tipi II için boy ve en kesiti **Şekil 4.5**'te gösterilmektedir.



Şekil 4.5 : Tahkimat tipi II boy ve en kesiti.

4.4.3 Tahkimat tipi III

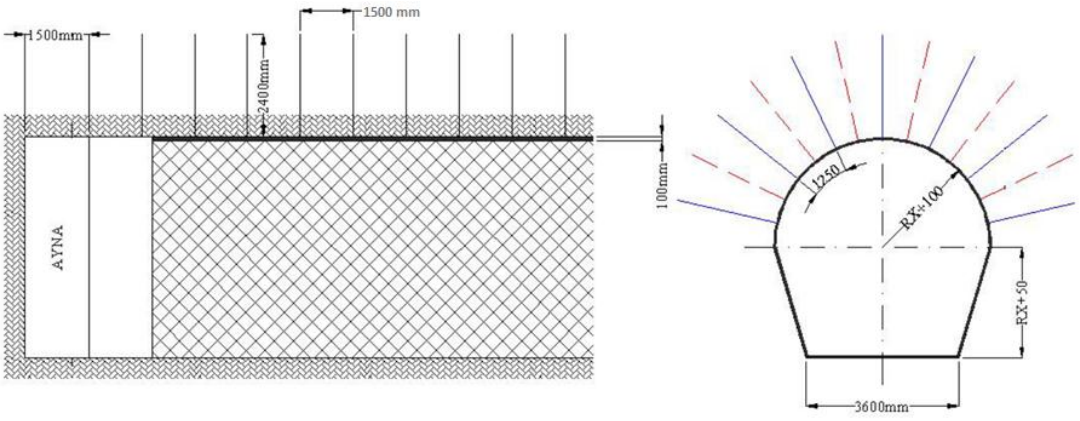
Bu tahkimat tipi için tipik kazı uzunluğu 3000 mm'dir. 4-5 adet 2400 mm uzunluğunda, boyuna yönde 1500 mm aralıklı kaya bulonu yerleştirilir. Kazıdan önce, aynadan tünel çapının 2 katı uzaklığa kadar üst yarıda en az 50 mm kalınlığında püskürtme beton uygulanır. Taban grobetonu ortalama 50 mm olmalıdır. Tahkimat Tipi III için boy ve en kesiti **Şekil 4.6**'da gösterilmektedir.



Şekil 4.6 : Tahkimat tipi III boy ve en kesiti.

4.4.4 Tahkimat tipi IV

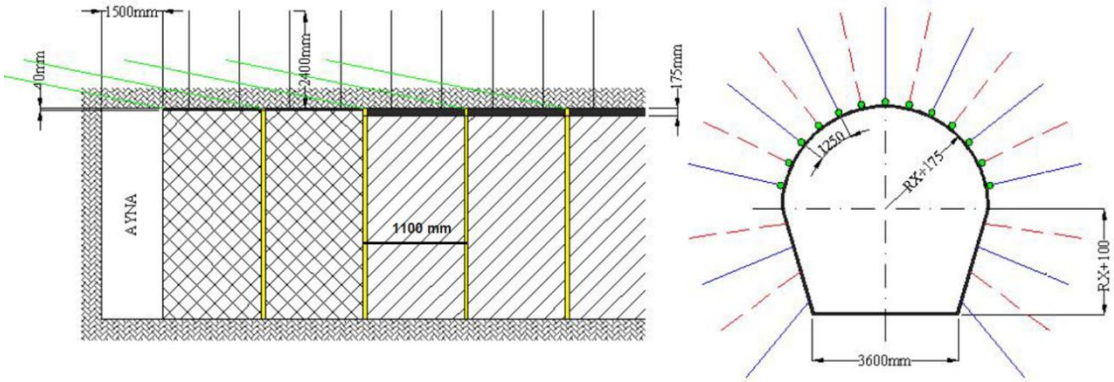
Bu tahkimat tipi için tipik kazı uzunluğu 1500 mm'dir. 6-7 adet 2400 mm uzunluğunda, boyuna yönde 1500 mm aralıklı şaşırtmalı kaya bulonu yerleştirilir. Kazıdan önce aynadan en çok 1000 mm uzaklığa kadar üst yarıda en az 100 mm kalınlığında püskürtme betonu ve R188 hasır çelik uygulanır. Taban grobetonu ortalama 50 mm kalınlığında olmalıdır. Tahkimat Tipi IV için boy ve en kesiti **Şekil 4.7**'de gösterilmektedir.



Şekil 4.7 : Tahkimat tipi IV boy ve en kesiti.

4.4.5 Tahkimat tipi V

Bu tahkimat tipi için tipik kazı uzunluğu 1500 mm'dir. 10-11 adet 2400 mm uzunluğunda, boyuna yönde 1500 mm aralıklı şaşırtmalı kaya bulonu yerleştirilir. Kazıdan önce aynadan tünel çapı kadar uzağa ise 175 mm kalınlığında püskürtme beton ve R188 hasır çelik, tünel aynasına kadar en az 40 mm püskürtme beton ve R188 hasır çelik uygulanır. 6000 mm uzunluğunda, 26 mm çapında kendinden delgili süren 400 mm aralıklı yerleştirilir. NPI - 100 dört parçalı çelik kuşak 1100 mm aralıklarla döşenir. Taban grobetonu ortalama 100 mm kalınlığında olmalıdır. Tahkimat Tipi V için boy ve en kesiti **Şekil 4.8**'de gösterilmektedir.



Şekil 4.8 : Tahkimat tipi V boy ve en kesiti.

4.5 Ayazağa Tüneli Enjeksiyon Çalışması

4.5.1 Enjeksiyon işlemi

Ayazağa Tüneli'nde kazı ve tahkimat işlemlerinden sonra suyu iletecek olan **Şekil 4.9'**da enjeksiyon tapası olarak adlandırılan enjeksiyon delikleriyle birlikte görülen çelik borular raylı sistem vasıtasıyla yerleştirilmiştir. Tünel çapının 5 m olmasına karşılık çelik boru çapının 4 m olmasından dolayı arada kalan boşluk çelik boruların tepesinde bulunan kollektör tapası denilen noktalardan basılan dolgu betonu ile doldurulmuştur (**Şekil 4.10**).



Şekil 4.9 : Ayazağa Tüneli'ne yerleştirilen çelik su boruları.

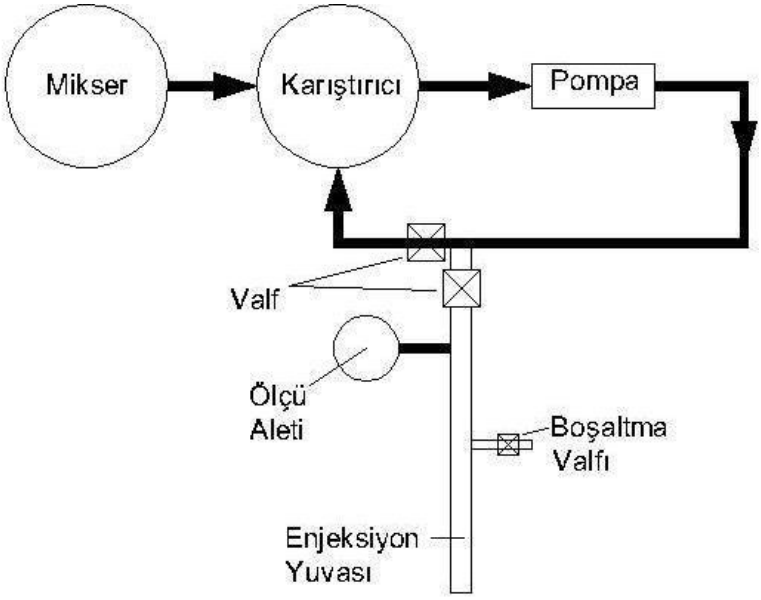


Şekil 4.10 : Çelik boru ile tünel arası dolgu betonu.

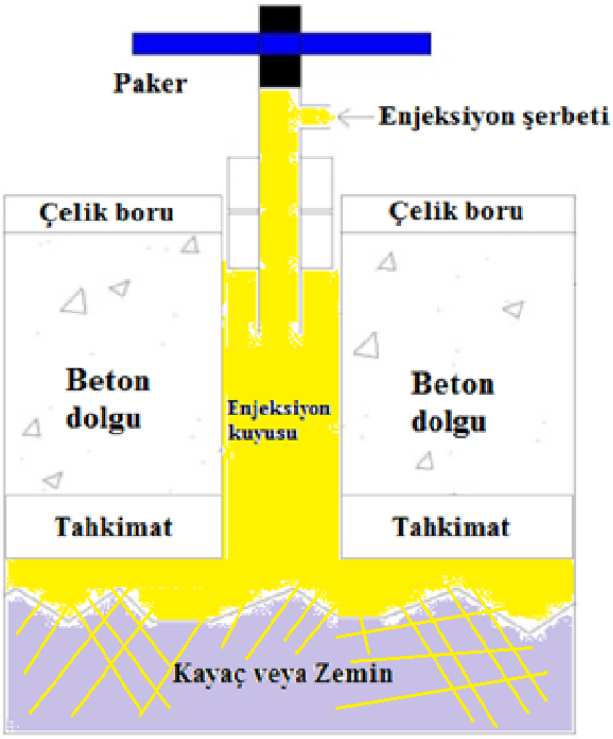
Beton prizlendikten sonra çelik boruların içerisinden belli bir paterne göre tünel tahkimatı ile kayaç arasında kalan boşlukları doldurmak için **Şekil 4.11**'de gösterilen enjeksiyon akım şeması kullanılarak enjeksiyon yapılmıştır. Bu uygulama ile tünelin duraylılığını maksimum düzeye çıkarmak ve sızdırmazlık sağlamak amaçlanmıştır. 56 mm çaplı enjeksiyon delgisi sırasında betonda genelde 70 cm kayaçta ise 15 cm ilerledikten sonra enjeksiyon uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Burada dikkat edilmesi gereken nokta şudur ki, enjeksiyon yöntemi kontakt enjeksiyonu olarak gerçekleşmiştir fakat deliklere basılan enjeksiyon miktarları olması gerekenden çok fazladır. Bu durum da şu şekilde açıklanabilir. Tünel güzergahı boyunca jeolojik ortamın Q kaya sınıflamasına gore aşırı zayıf ve son derece zayıf olarak tanımlanmaktadır. Bu da basılan enjeksiyonun çatlaklı ve gevşek

olan bu formasyonlarda derinlere kadar nufüz edebilmesine neden olmaktadır. Böylece enjeksiyon uygulaması kontak enjeksiyonu olmaktan çıkıp konsolidasyon enjeksiyonu olarak gerçekleşmiştir denilebilir (**Şekil4.12**).



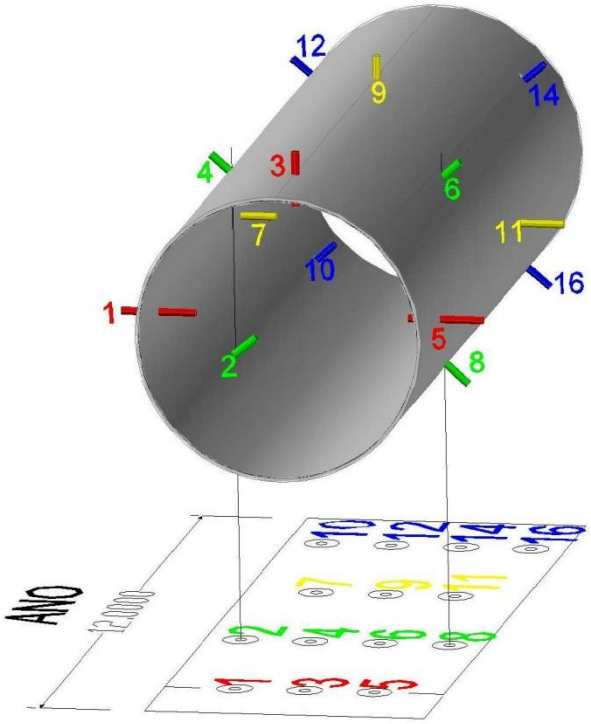
Şekil 4.11 : Enjeksiyon akım şeması (Bahçivan, 2011).



Şekil 4.12 : Ayazağa Tüneli'nde yapılan konsolidasyon enjeksiyonun şematik gösterimi.

Enjeksiyon işleminde çelik borular belli uzunlukta kısımlar halinde değerlendirilir. Bu uzunluktaki bir parçaya 'ano' denir. Bu çalışmada ano boyu 12 m olarak

tasarlanmıştır. Ano da eşit uzunlukta 4 ringe ayrılmıştır. Bu ringlerden ilkinde 3 delik, ikincisinde 4 delik şaşırtmalı olarak bulunmaktadır. Diğer iki ring de aynı şekilde şaşırtmalı olarak 3 ve 4 delik ile takip etmektedir. Her ano bu şekilde toplam 14 adet enjeksiyon deliğine sahiptir. Anodaki delikler enjeksiyon takibini kolaylaştırmak amacıyla numaralandırılır (**Şekil 4.13**).



Şekil 4.13 : Bir anonun 3 boyutlu görünümü ve delik düzeni.

Çelik boruların alt yarısında ağırlıkça 1/3 oranında çimento - su karışımı tünel üst yarısına ağırlıkça 1/1 oranında çimento - su karışımı enjekte edilmiştir. Tünel boyunca 3 metrelik aralıklarla uygulanan kontakt enjeksiyonunda, enjeksiyonlar sırasıyla önce tünel tabanındaki deliklerde (2, 8, 10, 16), sonra alçak seviyedeki deliklerde (1, 5, 7, 11), ardından yüksek seviyedeki deliklerde (4, 6, 12, 14), en son olarak tavandaki deliklerde (3, 9) yapılmıştır.

Enjeksiyon işlemine anonun alt yarıda kalan deliklerinden başlanmıştır. Enjeksiyon sırasında diğer deliklerin pakerleri vanaları açık şekilde takılmıştır. Enjeksiyon şerbetinin geldiği delikler hemen enjeksiyon takip formuna işlenmiş ve vanaları kapatılmıştır. Vanası kapatılan delik, enjeksiyon sırası geldiğinde kuyunun tıkalı olup olmadığı kontrol edilmiş eğer tıkalı ise tekrar delinerek enjeksiyonu yapılmıştır. Enjeksiyon sonrası 24 saat geçmeden deliklerdeki pakerler sökülmemiştir. Pakerler sökülmeden önce vana açılarak şerbetin priz alıp almadığı kontrol edilmiştir. Priz

almamışsa beklenmiştir. Enjeksiyonu tamamlanan deliklerin paker boşluğu çimento harcı ile doldurulmuştur.

Enjeksiyon sırasında karşılaşılan durumlarda aşağıdaki gibi davranılmıştır:

- Basınç düşmüyor ve enjeksiyon şerbeti gidiyorsa basmaya devam edilir, enjeksiyon hiçbir şekilde kesilmez,
- Basınç yükselmiyorsa 1/1 karışımdan 400 kg çimento miktarına kadar enjeksiyon devam eder, karışım 3/2'ye geçilir. Bu durumda;

a) Eğer basınç yoksa 3/2 karışımdan 400 kg çimento basılır. Basınç yine yükselmezse, 3/2 +%25 kumlu karışıma geçilir. Bu karışımdan 1000 kg çimento olacak şekilde basılır. Basınç yükselmezse 3/2+%50, 3/2+%100 karışım aynı şekilde 1000 kg'lık miktarlarla basılır. Yine basınç yükselmezse sisteme su verilerek enjeksiyona ara verilir. Çevre kuyular refü edildikten sonra o bölgedeki kuyu tekrar delinerek aynı işlemler baştan başlanır.

b) Eğer basınç tutuyor ise karışım gitmeyinceye kadar işlem devam eder. Basınç tutuyor ve karışım gitmiyorsa 1/1 karışım ile refü koşulları sağlanır.

Refü Koşulu: Hangi karışım olursa olsun mutlaka 1/1 karışım ile refü sağlanacaktır. 20 dakika süre içerisinde basınç sabit ve kuyu 0.7 lt/m/dak veya daha az karışım gidiyorsa kuyu refü kabul edilecektir.

Ayazağa tünelinde yapılan konsolidasyon enjeksiyon işleminde TSE'nin UDK 669.94 TS-19 şartnamesindeki PÇ-325 Portland Çimentosu kullanılmıştır.

Enjeksiyon çalışmaları boyunca işlenen günlük enjeksiyon raporu örneği **Çizelge 4.3**'te verilmiştir.

ALKE-ATAÇ MÜŞTEREK TEŞEBBÜS ORTAKLIĞI
BÜYÜK İSTANBUL II. MERHALE MELEN SİSTEMİ SÖZLEŞME NO:6 DELGİ VE ENJEKSİYON KAYIT FORMU

ÇALIŞMA YERİ: Ayazağa Tüneli Giriş (İleri) Çelik Kaplama Boşluk Enjeksiyonu

Makina Cinsi	SMS	Tarih:	30.09.2010
Delgi Tipi/DelikÇapı(mm):	Rotari/56	Vardiye:	Gece
Sondör:	Ali KURT	Manometre Kuyu Arası Uzaklık ve	
Enj. Pompası:	Clivio	Yükseklik (m)	10m / 2,5m
Paker Tipi/Çapı(mm)/Boyu(cm):	Mekanik/54/52		

ANO/RİNG-KUYU	Kilometresi	DELGİ		Enjeksiyon Kademesi (Tek Kademe)	Enjeksiyona		Refü Basınç Kg/cm²	Ç/Kum %	Ç/Katkı %	Ç/Su %	Mikser Sayısı	Mikser Hacmi (lt)	Şerbet Hacmi (lt)	Su Hacmi (lt)	ENJEKTE EDİLEN KATI MADDELER			Sonuç Düşünceler	Kuyu Konumu
		Betonda Delgi	Kayada Delgi		Başlama Saati	Bitiş Saati									Çimento Kg	Kum Kg	Çimento Zaiyatı Kg		
		m	m	m'ye															
37/1-1	18+704,95	0,75	0,15	0,90	19:20	20:00	4		2%	1/1	3	300	900	450	450		yok	Refü	
37/2-4	18+708,30	0,70	0,15	0,85	20:00	20:30			2%	1/1	4	300	1200	600	600		yok	Devam	
					20:30	21:10	3,5		2%	3/2	10	250	2500	1000	1500		yok	Refü	
37/3-7	18+711,80	0,75	0,15	0,90	21:10	21:40	4		2%	1/1	2	300	600	300	300		yok	Refü	
36/4-14	18+701,95	0,80	0,15	0,95	21:40	22:20	4		2%	1/1	4	300	1200	600	600		yok	Refü	
37/1-5	18+704,95	0,75	0,15	0,90	22:20	22:55	4		2%	1/1	3	300	900	450	450		yok	Refü	
37/3-11	18+711,80	0,70	0,15	0,85	22:55	23:30	4		2%	1/1	2	300	600	300	300		yok	Refü	
38/1-1	18+718,60	0,75	0,15	0,90	01:20	02:00	4		2%	1/1	2	300	600	300	300		yok	Refü	
37/1-3	18+704,95	0,75	0,15	0,90	02:00	02:20			2%	1/1	4	300	1200	600	600		yok	Devam	
					02:20	02:45	3,5		2%	3/2	2	250	500	200	300		yok	Refü	
37/2-6	18+708,30	0,80	0,15	0,95	02:45	03:15	4		2%	1/1	3	300	900	450	450		yok	Refü	
37/4-12	18+714,86	0,80	0,15	0,95	03:15	03:40			2%	1/1	4	300	1200	600	600		yok	Devam	
					03:40	04:00	4		2%	3/2	2	250	500	200	300		yok	Refü	
37/3-9	18+711,80	0,70	0,15	0,85	04:00	04:30			2%	1/1	4	300	1200	600	600		yok	Devam	
					04:30	04:50	4		2%	3/2	2	250	500	200	300		yok	Refü	
38/1-5	18+718,60	0,75	0,15	0,90	04:50	05:25	4		2%	1/1	1	300	300	150	150		yok	Refü	
37/4-14	18+714,80	0,80	0,15	0,95	05:25	06:25	4		2%	1/1	3	300	900	450	450		yok	Refü	
TOPLAM:		**9,80**	**1,95**	***11,75***							**TOPLAM:**		**15700**		**8250**				

YÜKLENİCİ — **Devlet Su İşleri**

ALKE-ATAÇ M.T.O
Özgür AYCİL
Jeoloji Mühendisi

Serkan DAĞLIOĞLU
Jeoloji Y.Mühendisi

Çizelge 4.3 : Günlük enjeksiyon raporu örneği.

4.5.2 Kullanılan ekipmanlar

Delgi ekipmanı olarak soğutucu ve kesilen malzemeleri dışarı çıkartmak için su sirkülasyonuna sahip 56 mm çapında delik delebilen SMS marka rotary tip delgi makinesi kullanılmıştır (**Şekil 4.14**).



Şekil 4.14 : SMS marka rotary sondaj makinesi.

Enjeksiyon pompası olarak iki yönde hareketli hidrolik tahrikli elektrik enerjisiyle 100 lt/dakika kapasitede, maksimum 100 bar basınç üretebilen Clivio marka enjeksiyon pompa kullanılmıştır. **Şekil 4.15**'te enjeksiyon malzemesini karıştırma amaçlı 300 lt hacimli karıştıcı ve enjeksiyon pompası görülmektedir.



Şekil 4.15 : Karıştırıcı ve Clivio marka enjeksiyon pompası.

Manometreler, 1 bar hassasiyetle okuma kapasitesine sahip olan tiptedir. Enjeksiyon pompasına ve kuyu ağzına monte edilmiştir (**Şekil 4.16**).



Şekil 4.16 : Kuyu manometresi.

Paker, deliklerinden içeri enjeksiyon basılmasını ve priz süresi boyunca deliği tıkamayı sağlar (**Şekil 4.17**).



Şekil 4.17 : Mekanik paker.

Enjeksiyon hortumları yüksek enjeksiyon basınçlarına emniyetli şekilde dayanabilecek sağlamlıktadır. İç çapı 2,54 cm (1 inç)'dir.

Su sayaçları enjeksiyon karışımlarında kullanılacak suyun debisini 1 litre hassasiyetle gösterebilecek büyük kadranlı tip kullanılmıştır.

Enjeksiyon nakil hattı boruları, enjeksiyon karışımının hazırlandığı yerden kuyu başı manometresine en fazla 100 m uzağına kadar şerbetin gidişi ve dönüşünü sağlamaktadır. Bunun için en az 1 inç'lik galvanizli borular kullanılmıştır.

5. JEOİSTATİSTİK

5.1 Giriş

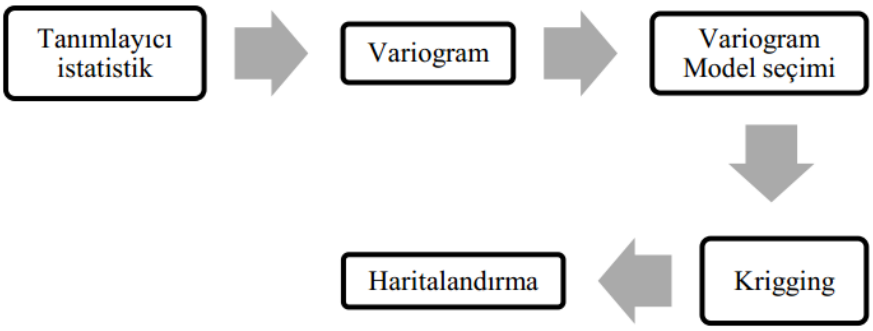
Jeoistatistik, bir sahadaki bilinen noktalardaki değerleri kullanarak bilinmeyen noktalardaki değerleri hesaplamak ve sahanın ele alınan parametre için dağılım haritasının çıkarılması işlemidir (Tunçdemir H. , 2010).

Jeoistatistik, Matheron (1971) tarafından önerilen bölgeselleştirilmiş değişkenler teorisini baz olarak aldığından jeoistatistiksel hesaplamalar için küresel ölçekte 3 eksenli veriye ihtiyaç vardır; örneğin bir sondaj işleminin yapıldığı noktanın küresel koordinat sistemdeki x ve y koordinat değerleri hesaplama için gerekli olan x ve y değerlerini verir. Bu değerler noktanın bölgesel bir değişken olduğunu gösterir. Z değerleri ise -küresel koordinat sistemdeki z koordinat değerleri değil- yukarıda bahsedilen ve sahaya ait değişkenlik derecesinin hesaplanması istenen rezerv parametrelerinden birisi olabilir (Tercan & Saraç, 1988).

Bu çalışma kapsamında enjeksiyon deliklerinin konumu ve basılan enjeksiyon değerleri kullanılmıştır. Her delik için varolan enjeksiyon değerleri kullanılarak jeoistatistiksel analizi ile değerlerdeki aykırılıklar optimize edilmiş ve tünel boyunca veri sayısı arttırılmıştır. Jeoistatistiksel analiz '*GS+*' lisanslı yazılım kullanılarak yapılmıştır.

5.2 Kullanılan Yöntem

Kullanılan yöntem sırasıyla tanımlayıcı istatistiğin çıkarılması, variogram belirlenmesi, variogram model seçimi, krigging ile veri çoğaltma ve elde edilen verilerin haritalandırılması şeklindedir (**Şekil 5.1**).

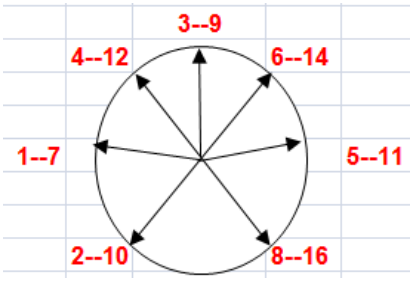


Şekil 5.1 : Kullanılan yöntem akım şeması (Tunçdemir H. , 2010).

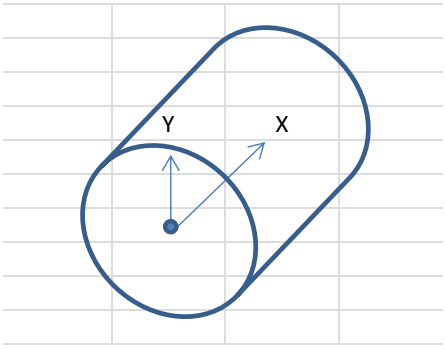
Bu işlemler, örnek olması açısından bu çalışmada kullanılan veri üzerinden uygulamalı olarak takip eden bölümlerde gösterilecektir.

5.2.1 Tanımlayıcı istatistik

Tanımlayıcı istatistik işlemler belirlenirken verinin saha içerisinde dağılımı bir x-y koordinat sisteminde gösterilir (Tunçdemir H. , 2010). Bunu Ayazağa Tüneli'ndeki enjeksiyon deliklerine göre uyarlayabilmek için 5 m çaplı tünelin tam orta noktası başlangıç noktası olarak kabul edilmiştir. X ekseni olarak tünel uzunluğunu, Y ekseni olarak tünel çapı alınmıştır. Buna göre; X koordinatı enjeksiyon deliğinin bulunduğu km'yi, Y koordinatı ise enjeksiyon deliğinin X eksenine dik uzaklığını vermektedir. Enjeksiyon şablonu dairesel olduğundan dolayı Y değeri her delik için sabit alınabilir. **Şekil 5.2**'de Tünel en kesiti üzerinde enjeksiyon deliklerinin numaraları ve konumları verilmiştir. **Şekil 5.3**'te tünel üzerinde teorik X ve Y ekseni gösterilmektedir.



Şekil 5.2 : Tünel en kesiti üzerinde enjeksiyon deliklerinin numara ve konumları.

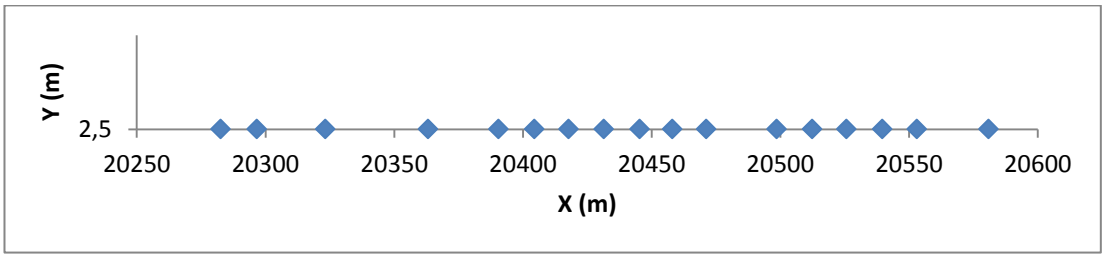


Şekil 5.3 : Tüneldeki teorik X ve Y eksenleri.

Örnek olması amacıyla 20+581 – 20+296,7 km'ler arasında 3 no'lu deliğe 17 ayrı enjeksiyon işlemi uygulanmış ve **Çizelge 5.1**'deki verilerin jeoistatistiksel analizi yapılırken öncelikle mevcut verilerin noktasal dağılımı çıkartılmıştır (**Şekil 5.4**).

Çizelge 5.1 : 3 nolu delik için jeoistatistik verileri.

Nokta no	X (m)	Y (m)	Enjeksiyon (lt)
1	20581	2,5	600
2	20553,1	2,5	1000
3	20539,6	2,5	900
4	20525,7	2,5	1700
5	20512,4	2,5	1450
6	20498,6	2,5	1200
7	20471,2	2,5	1700
8	20458,1	2,5	1450
9	20445,4	2,5	1700
10	20431,4	2,5	1450
11	20417,8	2,5	900
12	20404,5	2,5	800
13	20390,5	2,5	900
14	20363,2	2,5	300
15	20323,2	2,5	600
16	20296,7	2,5	2700
17	20282,6	2,5	2700

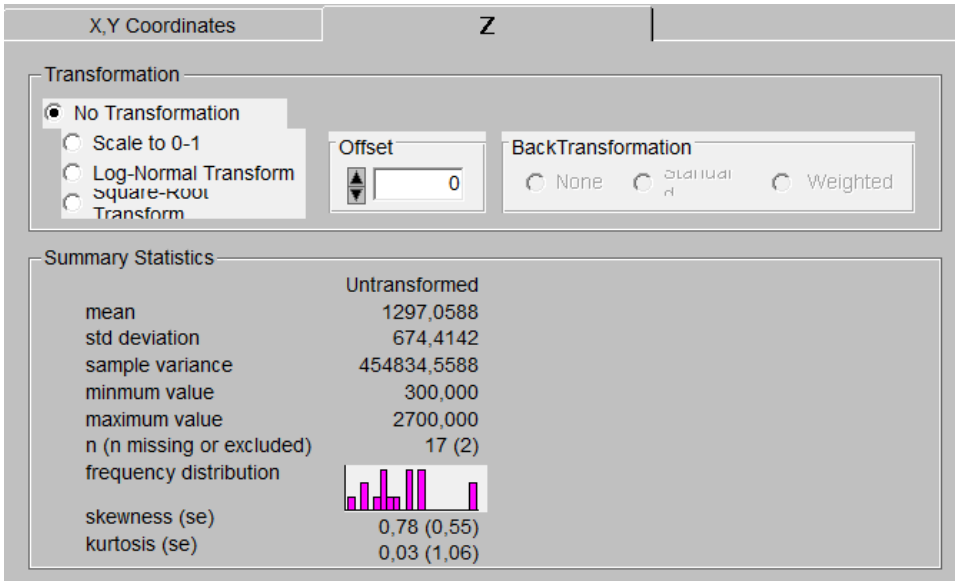


Şekil 5.4 : 3 nolu delik için verilerin noktasal dağılımı.

Delik konumları olması gerektiği gibi tek bir hat üzerinde bulunmaktadır. Çeşitli noktalarda veri alınamadığı görülmektedir. Z değeri olarak alınan enjeksiyon

miktarları için ileriki hesaplamalarda kullanılacak tanımlayıcı istatistik parametrelerinin belirlenmesi gerekir.

Bunlar enjeksiyon değerlerinin aritmetik ortalaması (mean), standart sapması (std deviation), varyansı (sample variance), en büyük ve en küçük değerleri (minimum value/maximum value), veri sayısı, frekans dağılım grafiği (frequency distribution), çarpıklık (skewness), basıklık (kurtosis)'dir. Bu değerler Gs+ yazılımından alınan görüntü ile **Şekil 5.5**'te verilmiştir.



Şekil 5.5 : 3 nolu delik verilerinin tanımlayıcı istatistik analizi.

5.2.2 Variogram

Variogram, kısaca uzaklığa bağlı ilişki fonksiyonu olarak tanımlanır. Başka bir ifadeyle bölgesel değişkenlerin arasındaki fark, bu değerler arasındaki uzaklığın bir fonksiyonudur. Variogram iki örnek arasındaki mesafe ve yön ile değişmektedir. Normal olarak uzaklık azaldıkça değerlerin birbirine benzemesi (yaklaşması), arttıkça benzerliğin azalması beklenir.

Variogram analizi de veri dağılımının mesafe ve yöne göre değişiminin (uzaysal durumunun) belirlenmesidir. Variogram fonksiyonu; belli bir uzaysal alan ve yönde bulunan bir noktadan h kadar uzaklıktaki başka bir noktanın değerleri arasındaki farkın karelerinin toplamının, ele alınan çift sayısının iki katına bölünmesi ile elde edilir (Tunçdemir H. , 2010). Bu fonksiyon **(5.1)** eşitliği ile gösterilir.

$$\boldsymbol{\gamma(h) = \frac{1}{2N}\sum_{i=1}^{N}[Z(x+h) - Z(x)]^2} \qquad (\mathbf{5.1})$$

Burada

γ(h) : h mesafeli değişkene bağlı variogram fonksiyonunu (semivariance değeri),

N : hesaplamada ele alınan çift sayısını,

Z(x+h) : x noktasından h kadar uzaklıkta bulunan noktanın (x+h noktasının) Z değerini,

Z(x) : x noktasındaki Z değerini verir.

Sahada veri alınmayan noktaların değerlerini bulabilmek için öncelikle sahanın variogram fonksiyonun (semivariance değeri) hesaplanması gerekir.

Örnek ile açıklamak gerekirse; 3 nolu delik verileri incelendiğinde çiftler arasındaki en kısa mesafe 12,6 m'dir ve bu sadece 8 ve 9 noktaları arasında bulunmaktadır (**Çizelge 5.2**).

Çizelge 5.2 : 3 nolu delik için 8 ve 9 nolu noktalar arası uzaklık.

Nokta no	X (m)	Y (m)	Enjeksiyon (lt)
8	20458,1	2,5	1450
9	20445,4	2,5	1700
Uzaklık	12,7		

(5.1) eşitliğinde gösterildiğinde;

$$\gamma(12{,}7) = \frac{1}{2 \times 1}\sum_{i=1}^{1}[1700 - 1450]^2$$

$$\gamma(12{,}7) = 31250$$

12,7 m'lik uzaklık için semivarince değeri 31250 olarak bulunmaktadır. Bu şekilde tüm veriler hesaplanır. Bu aşamada *active lag distance* ve *lag class distance interval* değerleri belirlenmelidir.

Burada "active lag distance", "etkilenme mesafesi" olarak çevrilebilir. Bu değer ile maksimum uzaklık sınırlandırılmış olur. Etkilenme mesafesi bu veri seti için 160 alınmıştır. Bu da çiftler arasındaki en uzak mesafeyi 160 m ile sınırlandırma anlamına gelmektedir.

“Lag class distance interval” ise “ eş uzaklık grubu aralığı” olarak çevrilebilir. Bu değer ile uzaklıklar gruplandırılır ve kendi içlerinde ortalama değerler alır. “eş uzaklık grubu aralığı” ise 40 alınmıştır. Bu da çiftler arasındaki mesafelerin 40 m aralıklarla gruplara ayırılması ve her grubun kendi içerisinde ortalamalarının alınarak hesaplama yapılması anlamına gelmektedir.

Bu değerlerin alınmasının sebebi; variogram hesabında % 99 doğruluk oranına bu değerler ile ulaşılmasıdır.

Sonuç olarak, uzaklık aralığı 0-40 m (noktalar arası mesafe 0-40m arasında olan noktalar hesaplamaya dahil edilmiştir), 40-80 m, 80-120 m, 120-160 m olan 4 adet eş uzaklık grubu aralığı ortaya çıkmaktadır **(Çizelge 5.3, Çizelge 5.4, Çizelge 5.5, Çizelge 5.6).**

Çizelge 5.3 : 3 nolu delik için lag class 1 listesi.

Eş uzaklık grubu 1 (0-40 m)				
Çift no	**Yarı değişkenlik değeri**	**uzaklık (m)**	**1. nokta no**	**2. nokta no**
1	80000	27,9	1	2
2	5000	13,5	2	3
3	245000	27,4	2	4
4	320000	13,9	3	4
5	151250	27,2	3	5
6	31250	13,3	4	5
7	125000	27,1	4	6
8	31250	13,8	5	6
9	125000	27,4	6	7
10	31250	13,1	7	8
11	0	25,8	7	9
12	31250	39,8	7	10
13	31250	12,7	8	9
14	0	26,7	8	10
15	31250	14	9	10
16	320000	27,6	9	11
17	151250	13,6	10	11
18	211250	26,9	10	12
19	5000	13,3	11	12
20	0	27,3	11	13
21	5000	14	12	13
22	180000	27,3	13	14
23	2205000	26,5	15	16
24	0	14,1	16	17
ortalama	179843,75	21,425		

Çizelge 5.4 : 3 nolu delik için lag class 2 listesi.

Eş uzaklık grubu 2 (40-80 m)				
Çift no	**Yarı değişkenlik değeri**	**uzaklık (m)**	**1. nokta no**	**2. nokta no**
1	45000	41,4	1	3
2	605000	55,3	1	4
3	361250	68,6	1	5
4	101250	40,7	2	5
5	20000	54,5	2	6
6	45000	41	3	6
7	320000	68,4	3	7
8	0	54,5	4	7
9	31250	67,6	4	8
10	31250	41,2	5	7
11	0	54,3	5	8
12	31250	67	5	9
13	31250	40,5	6	8
14	125000	53,2	6	9
15	31250	67,2	6	10
16	320000	53,4	7	11
17	405000	66,7	7	12
18	151250	40,3	8	11
19	211250	53,6	8	12
20	151250	67,6	8	13
21	405000	40,9	9	12
22	320000	54,9	9	13
23	151250	40,9	10	13
24	661250	68,2	10	14
25	180000	54,6	11	14
26	125000	41,3	12	14
27	45000	67,3	13	15
28	45000	40	14	15
29	2880000	66,5	14	16
30	2205000	40,6	15	17
ortalama	334500	53,74		

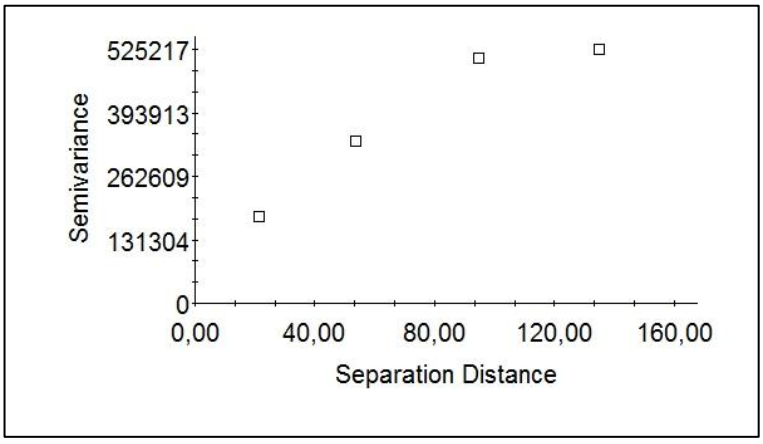
Çizelge 5.5 : 3 nolu delik için lag class 3 listesi.

Eş uzaklık grubu 3 (80-120 m)				
Çift no	**Yarı değişkenlik değeri**	**uzaklık (m)**	**1. nokta no**	**2. nokta no**
1	180000	82,4	1	6
2	605000	109,8	1	7
3	245000	81,9	2	7
4	101250	95	2	8
5	245000	107,7	2	9
6	151250	81,5	3	8
7	320000	94,2	3	9
8	151250	108,2	3	10
9	0	80,3	4	9
10	31250	94,3	4	10
11	320000	107,9	4	11
12	0	81	5	10
13	151250	94,6	5	11
14	211250	107,9	5	12
15	45000	80,8	6	11
16	80000	94,1	6	12
17	45000	108,1	6	13
18	320000	80,7	7	13
19	980000	108	7	14
20	661250	94,9	8	14
21	980000	82,2	9	14
22	361250	108,2	10	15
23	45000	94,6	11	15
24	20000	81,3	12	15
25	1805000	107,8	12	16
26	1620000	93,8	13	16
27	1620000	107,9	13	17
28	2880000	80,6	14	17
ortalama	506250	94,63214286		

Çizelge 5.6 : 3 nolu delik için lag class 4 listesi.

Eş uzaklık grubu 4 (120-160 m)				
Çift no	**Yarı değişkenlik değeri**	**uzaklık (m)**	**1. nokta no**	**2. nokta no**
1	361250	122,9	1	8
2	605000	135,6	1	9
3	361250	149,6	1	10
4	101250	121,7	2	10
5	5000	135,3	2	11
6	20000	148,6	2	12
7	0	121,8	3	11
8	5000	135,1	3	12
9	0	149,1	3	13
10	405000	121,2	4	12
11	320000	135,2	4	13
12	151250	121,9	5	13
13	661250	149,2	5	14
14	405000	135,4	6	14
15	605000	148	7	15
16	361250	134,9	8	15
17	605000	122,2	9	15
18	500000	148,7	9	16
19	781250	134,7	10	16
20	781250	148,8	10	17
21	1620000	121,1	11	16
22	1620000	135,2	11	17
23	1805000	121,9	12	17
ortalama	525217,3913	134,7		

Eş uzaklık grubu ortalalama değerleri kullanılarak elde edilen eş değişkenlik (variogram) dağılımı grafiği **Şekil 5.6**'da verilmektedir.



Şekil 5.6 : 3 nolu delik için variogram dağılımı grafiği.

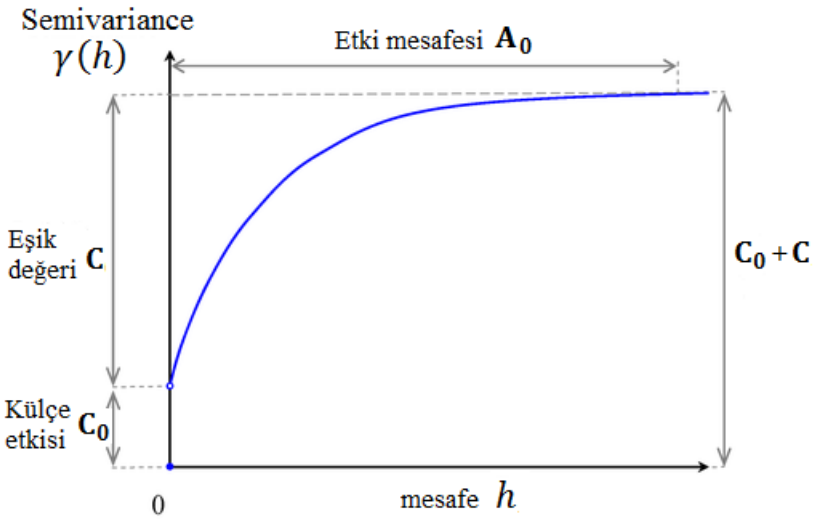
5.2.3 Variogram model seçimi

Variogram Model seçimi, variogram fonksiyonunu tanımlayacak bir modelin oluşturulması olup, elde edilen değerleri en yüksek korelâsyonla yansıtan bir eğri uyarlama işlemidir.

Yukarıda verilmiş olan deneysel variogram (semivariance) değerleri belli uzaklılar için hesaplanmıştır. Bölgesel değişkenin özelliklerinin belirlenmesinde ve özellikle örneklenmemiş noktalardaki değerlerinin kestiriminde, variogramı bütün uzaklıklarda bilmek gerekir. Bu ise variogram modellemeyi yani deneysel variogram değerlerine bir fonksiyon uyarlamayı gerektirir.

Değerler arasındaki farkın yüksek olduğu verilerin analizinde en doğru sonuç veren *Küresel model*'dir ve en yaygın kullanılan variogram modelidir (Tunçdemir H. , 2010). Bu çalışmada da verilerin durumundan dolayı küresel model kullanılmıştır.

Küresel modelde variogram; artan mesafe (h) ile artar, etki mesafesine (A_0) ulaşıldığında artışını durdurur. Bu uzaklıkta variogramın değeri külçe etkisi (C_0) ve eşik değeri (C) toplamına eşittir. Külçe etkisi değeri (C_0), 0'a ne kadar yakınsa veriler o kadar düzgün dağılıma sahiptir denilebilir. Küresel model variogram grafiği **Şekil 5.7'**de gösterilmiştir.



Şekil 5.7 : Küresel model variogram grafiği.

Küresel model variogram grafiği, **(5.2)** nolu formül kullanılarak oluşturulur.

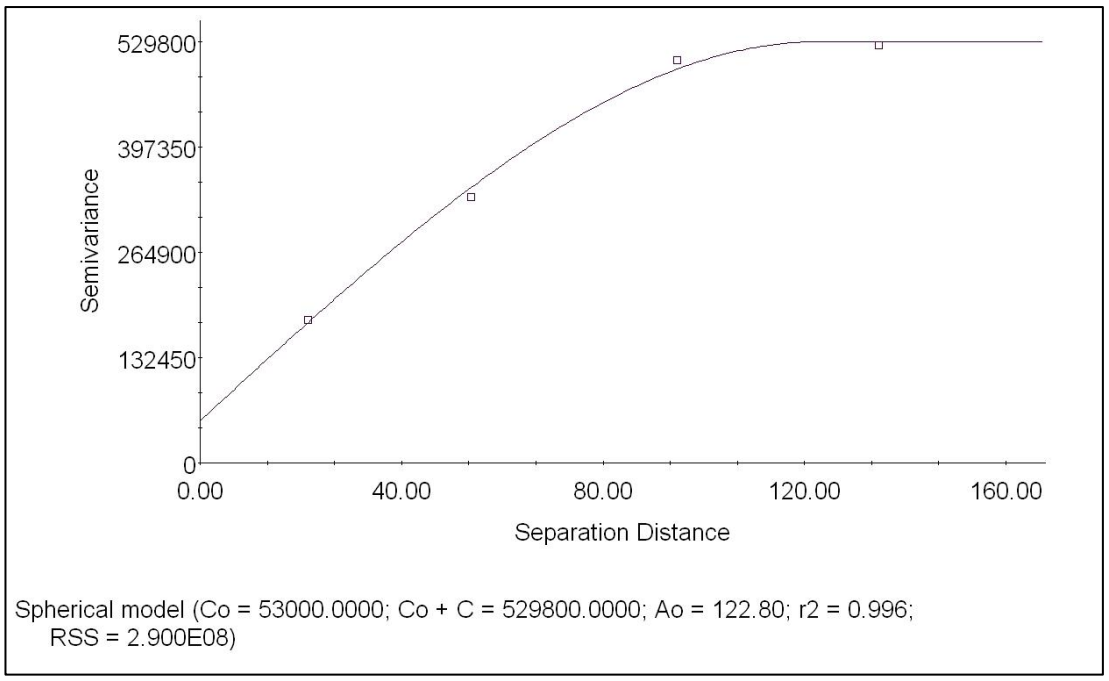
$$\gamma(h) = 0 \quad , \quad h = 0 \qquad ise$$

$$\gamma(h) = C_0 + C\left[\frac{3}{2}\frac{h}{A_0} - \frac{1}{2}\frac{h^3}{{A_0}^3}\right] \quad , \quad h \leq A_0 \quad ise \qquad (\mathbf{5.2})$$

$$\gamma(h) = C_0 + C \quad , \quad h > A_0 \quad ise$$

3 nolu delik için semivariance değerleri önceden bilindiği için **(5.2)** nolu formül kullanılarak C_O, C_O+C ve A_O parametrelerine ulaşılır ki bu değerler kriging için gereklidir.

Bu işlemler sonucunda **Şekil 5.8**'de gösterilen 3 nolu delik için küresel model variogram grafiği ortaya çıkmaktadır.



Şekil 5.8 : 3 nolu delik için variogram grafiği ve parametreleri.

Bu grafikte elde edilen verilerden görüleceği gibi C_0 değeri sıfıra oldukça uzaktır. Bu şekilde verilerin düzgün olmayan bir dağılıma sahip olduğu anlaşılmaktadır. Ayrıca bu durum **Şekil 5.5'**te verilen tanımlayıcı istatistik değerleriyle de teyit edilebilir. Göüldüğü gibi standart sapma ve varyans değerleri büyüktür. Tüm delikler için oluşturulan variogram grafikleri ve parametreleri **EK A** içerisinde **Şekil A.1**'de verilmektedir.

5.2.4 Kriging

Kriging işlemi; bir noktanın değerini (enjeksiyon miktarı, tenor, kalınlık, kalorifik değer gibi), noktanın yakınındaki örnek değerlerinin doğrusal kombinasyonu olarak hesaplayan jeoistatistiğin temel unsurudur (Ersoy & Yünsel, 2008). Bu sayede veri çoğaltma gerçekleştirilir.

Variogram fonksiyonu bölgesel değişkenin çeşitli özelliklerinin sayısal olarak belirlenmesi yanında örneklenmemiş noktalardaki bilinmeyen değerlerin kestirimi amacıyla da kullanılabilir.

Genel olarak kestirim işlemi bilinen değerlerin ağırlıklı ortalaması olarak alınır. Matematiksel olarak bu işlem **(5.3)** nolu formül ile ifade edilir (Tercan & Saraç, 1988).

$$z(x_0) = \sum_{i=1}^{n} [\lambda_i * z(x_i)] \qquad (\mathbf{5.3})$$

Burada;

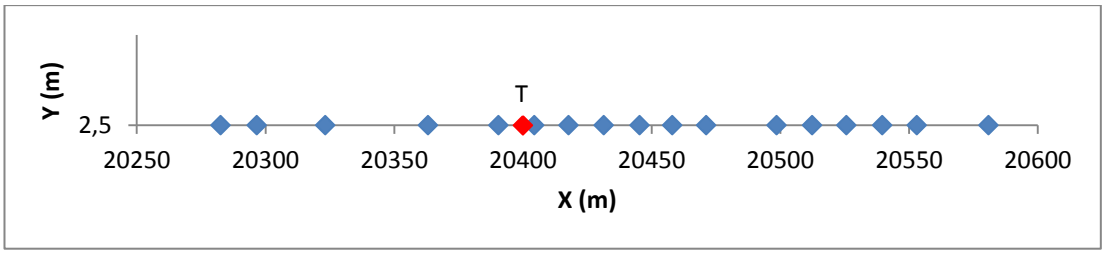
$z(x_0)$: x_0 noktasındaki bilinmeyen ancak kestirilen değeri,

$z(x_i)$: x_0 noktasının kestiriminde kullanılacak verileri,

λ_i : bu verilere atanacak ağırlıkları ifade etmektedir. Bu ağırlıkların toplamı 1 olmalıdır.

Bu aşamada, x_i noktalarındaki değişkenlerin değerleri bellidir. Ancak bunlara verilecek ağırlıkları hesaplamak gerekir. Jeoistatistikte bu ağırlıklar kestirim hatalarının ortalaması sıfır ve varyansı en küçük olacak şekilde belirlenir. Ağırlıkların bu koşullar altında belirlenmesi işlemine *kriging* denir (Tercan ve Saraç, 1998).

3 nolu delik için enjeksiyon değeri bilinen noktalar **Şekil 5.9**'da konumları ile birlikte mavi ile gösterilmektedir. Kırmızı ile gösterilen X koordinatı 20+400, Y koordinatı 2,5 olan T noktası için enjeksiyon miktarının ($z(x_0)$ değeri) tahmini kriging işlemi ile yapılırsa aşağıdaki gibi bir sırayı izlemek uygun olacaktır.



Şekil 5.9 : Kriging işleminde ele alınan noktalar ve hesaplanacak nokta.

Burada görüleceği üzere ortada kalan T noktasının $\underline{z(x_0)}$ değeri; diğer 17 noktanın $z(x_1)$, $z(x_2)$, …… , $z(x_{17})$ değerleri ve bu değerlere bağlı olan λ_1, λ_2, …, λ_{17} değerlerini kullanarak hesaplanacaktır. λ_i değerleri, **Şekil 5.7**'de grafiği ve parametreleri gösterilen ve bu saha için oluşturulan küresel variogram modeli değerlerinden bulunacaktır ve bu 17 ağırlık değerinin toplamının 1 olması gerektiği unutulmamalıdır.

(5.3) nolu eşitlik bu örnek için tekrar yazılacak olursa;

$$z(x_0) = \lambda_1 * 600 + \lambda_2 * 1000 + \cdots \ldots \ldots \ldots + \lambda_{17} * 2700$$

elde edilir. Bu aşamada λ_i değerlerinin bulunması gerekmektedir. Bunun için de **Çizelge 5.7'**deki eşitliklerin oluşturulması gerekir.

Bu eşitlikler şu manaya gelmektedir: Enjeksiyon miktarı bilinmeyen nokta (T= $z(x_0)$) ile enjeksiyon değeri bilinen 1. nokta (x_1) arasındaki mesafe değerinden elde edilen ve **Şekil 5.7**'de parametreleri gösterilen küresel variogram fonksiyonu değeri, her bir nokta ile diğer noktalar arasında kalan mesafe değerlerinin oluşturduğu variogram fonksiyonu değerlerinin ağırlıkları ile çarpılarak hepsinin toplanması ve buna yapılan tahmin hatasının (ε) eklenmesi ile bulunur.

Çizelge 5.7 : Bilinen noktalar ile bilinmeyen nokta arasındaki variogram fonksiyonu denklemleri.

$$\lambda_1 * \gamma(x_1, x_1) + \lambda_2 * \gamma(x_1, x_2) + \cdots \ldots \ldots + \lambda_{17} * \gamma(x_1, x_{17}) + \varepsilon = \gamma(x_1, x_0)$$

$$\lambda_1 * \gamma(x_2, x_1) + \lambda_2 * \gamma(x_2, x_2) + \cdots \ldots \ldots + \lambda_{17} * \gamma(x_2, x_{17}) + \varepsilon = \gamma(x_2, x_0)$$

……..…..

$$\lambda_1 * \gamma(x_{17}, x_1) + \lambda_2 * \gamma(x_{17}, x_2) + \cdots \ldots \ldots + \lambda_{17} * \gamma(x_{17}, x_{17}) + \varepsilon = \gamma(x_{17}, x_0)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots \ldots \ldots + \lambda_{17} = 1$$

3 nolu delik için 17 ayrı denklem oluşturulur. Buna ek olarak ağırlıkların toplamının 1 yaptığı bilgisi de 8. denklemi oluşturur. 17 bilinmeyen ağırlık değeri (λ_1, λ_2, …, λ_{17}) ve hata değeri (ε) vardır. Bu denklemler sistemi ile bilinmeyen değerler (λ_1, λ_2, …, λ_{17} ve ε) hesaplanabilir.

Öncelikle her bir noktanın birbirine olan uzaklığını gösteren mesafe matrisi oluşturulur (**Çizelge 5.8**). Bulunan mesafeler ve C_0, C ve A parametreleri kullanılarak küresel variogram formülü **(5.2)** ile değerler matrisi oluşturulur (**Çizelge 5.9**).

Çizelge 5.8 : Mesafe matrisi.

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_0
x_1	0	27,9	41,4	55,3	68,6	82,4	109,8	122,9	135,6	149,6	163,2	176,5	190,5	217,8	257,8	284,3	298,4	181
x_2	27,9	0	13,5	27,4	40,7	54,5	81,9	95	107,7	121,7	135,3	148,6	162,6	189,9	229,9	256,4	270,5	153
x_3	41,4	13,5	0	13,9	27,2	41	68,4	81,5	94,2	108,2	121,8	135,1	149,1	176,4	216,4	242,9	257	140
x_4	55,3	27,4	13,9	0	13,3	27,1	54,5	67,6	80,3	94,3	107,9	121,2	135,2	162,5	202,5	229	243,1	126
x_5	68,6	40,7	27,2	13,3	0	13,8	41,2	54,3	67	81	94,6	107,9	121,9	149,2	189,2	215,7	229,8	112
x_6	82,4	54,5	41	27,1	13,8	0	27,4	40,5	53,2	67,2	80,8	94,1	108,1	135,4	175,4	201,9	216	98,6
x_7	110	81,9	68,4	54,5	41,2	27,4	0	13,1	25,8	39,8	53,4	66,7	80,7	108	148	174,5	188,6	71,2
x_8	123	95	81,5	67,6	54,3	40,5	13,1	0	12,7	26,7	40,3	53,6	67,6	94,9	134,9	161,4	175,5	58,1
x_9	136	107,7	94,2	80,3	67	53,2	25,8	12,7	0	14	27,6	40,9	54,9	82,2	122,2	148,7	162,8	45,4
x_{10}	150	121,7	108,2	94,3	81	67,2	39,8	26,7	14	0	13,6	26,9	40,9	68,2	108,2	134,7	148,8	31,4
x_{11}	163	135,3	121,8	107,9	94,6	80,8	53,4	40,3	27,6	13,6	0	13,3	27,3	54,6	94,6	121,1	135,2	17,8
x_{12}	177	148,6	135,1	121,2	107,9	94,1	66,7	53,6	40,9	26,9	13,3	0	14	41,3	81,3	107,8	121,9	4,5
x_{13}	191	162,6	149,1	135,2	121,9	108,1	80,7	67,6	54,9	40,9	27,3	14	0	27,3	67,3	93,8	107,9	9,5
x_{14}	218	189,9	176,4	162,5	149,2	135,4	108	94,9	82,2	68,2	54,6	41,3	27,3	0	40	66,5	80,6	36,8
x_{15}	258	229,9	216,4	202,5	189,2	175,4	148	134,9	122,2	108,2	94,6	81,3	67,3	40	0	26,5	40,6	76,8
x_{16}	284	256,4	242,9	229	215,7	201,9	174,5	161,4	148,7	134,7	121,1	107,8	93,8	66,5	26,5	0	14,1	103
x_{17}	298	270,5	257	243,1	229,8	216	188,6	175,5	162,8	148,8	135,2	121,9	107,9	80,6	40,6	14,1	0	117

Çizelge 5.9 : Değerler matrisi.

$\gamma(x_i, x_i)$	$\mathbf{x_1}$	$\mathbf{x_2}$	$\mathbf{x_3}$	$\mathbf{x_4}$	$\mathbf{x_5}$	$\mathbf{x_6}$	$\mathbf{x_7}$	$\mathbf{x_8}$	$\mathbf{x_9}$	$\mathbf{x_{10}}$	$\mathbf{x_{11}}$	$\mathbf{x_{12}}$	$\mathbf{x_{13}}$	$\mathbf{x_{14}}$	$\mathbf{x_{15}}$	$\mathbf{x_{16}}$	$\mathbf{x_{17}}$	$\mathbf{x_0}$
$\mathbf{x_1}$	0	212697	284983	353302	410973	460880	522068	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800
$\mathbf{x_2}$	212697	0	131309	209932	281362	349574	459271	495912	519429	529743	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800
$\mathbf{x_3}$	284983	131309	0	133609	208825	282915	410170	457972	494018	520091	529753	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800
$\mathbf{x_4}$	353302	209932	133609	0	130158	208271	349574	406940	454017	494257	519696	529679	529800	529800	529800	529800	529800	529800
$\mathbf{x_5}$	410973	281362	208825	130158	0	133034	283950	348637	404495	456335	494971	519696	529762	529800	529800	529800	529800	524815
$\mathbf{x_6}$	460880	349574	282915	208271	133034	0	209932	280324	343458	405312	455676	493778	519960	529800	529800	529800	529800	503849
$\mathbf{x_7}$	522068	459271	410170	349574	283950	209932	0	129006	201051	276683	344404	403266	455345	519829	529800	529800	529800	421209
$\mathbf{x_8}$	529800	495912	457972	406940	348637	280324	129006	0	126702	206053	279285	345347	406940	495678	529800	529800	529800	366132
$\mathbf{x_9}$	529800	519429	494018	454017	404495	343458	201051	126702	0	134184	211039	282398	351441	460238	529783	529800	529800	305367
$\mathbf{x_{10}}$	529800	529743	520091	494257	456335	405312	276683	206053	134184	0	131884	207162	282398	409366	520091	529800	529800	231891
$\mathbf{x_{11}}$	529800	529800	529753	519696	494971	455676	344404	279285	211039	131884	0	130158	209379	350041	494971	529664	529800	155943
$\mathbf{x_{12}}$	529800	529800	529800	529679	519696	493778	403266	345347	282398	207162	130158	0	134184	284466	457319	519563	529762	79197
$\mathbf{x_{13}}$	529800	529800	529800	529800	529762	519960	455345	406940	351441	282398	209379	134184	0	209379	405720	493053	519696	108219
$\mathbf{x_{14}}$	529800	529800	529800	529800	529800	529800	519829	495678	460238	409366	350041	284466	209379	0	277725	402443	455014	260911
$\mathbf{x_{15}}$	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529783	520091	494971	457319	405720	277725	0	204943	280843	441974
$\mathbf{x_{16}}$	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529664	519563	493053	402443	204943	0	134759	512720
$\mathbf{x_{17}}$	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529762	519696	455014	280843	134759	0	528437

Çizelge 5.9'da hesaplanan değerlerden yararlanarak **Çizelge 5.7** yeniden düzenlenirse **Çizelge 5.10** elde edilir.

Çizelge 5.10 : Hesaplanmış küresel variogram değerlerinin denklemlerde gösterimi.

$$\lambda_1 * 0 + \lambda_2 * 212697 + \cdots \ldots \ldots + \lambda_{17} * 529800 + \varepsilon = 529800$$

$$\lambda_1 * 212697 + \lambda_2 * 0 + \cdots \ldots \ldots + \lambda_{17} * 529800 + \varepsilon = 529800$$

……..…..

$$\lambda_1 * 529800 + \lambda_2 * 529800 + \cdots \ldots \ldots + \lambda_{17} * 0 + \varepsilon = 528437$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots \ldots \ldots + \lambda_{17} = 1$$

Sayısal analiz yöntemlerini kullanarak **Çizelge 5.10'**da verilen değerlerin katsayılar matrisini (A) ve sonuç matrisini (C) oluşturarak, bilinmeyen (B) ağırlık matrisi hesaplanabilir **(Çizelge 5.11)**. Burada yapılması gereken A matrisinin tersini alıp C matrisi ile çarpmaktır. Sonuçta elde edilen bilinmeyen ağırlık matrisinin (B) değerleridir. Bu işlemler matematiksel olarak

A * B = C ise,

B = A' * C

şeklinde ifade edilir.

A matrisinin tersi ile C matrisinin çarpımından oluşan B matrisi aşağıda verilmiştir.

B =

λ_1	0,002529
λ_2	0,002911
λ_3	0,007424
λ_4	0,006355
λ_5	-0,01132
λ_6	-0,00639
λ_7	-0,00067
λ_8	0,001062
λ_9	0,004796
λ_{10}	0,02256
λ_{11}	0,105759
λ_{12}	0,494821
λ_{13}	0,32981
λ_{14}	0,043761
λ_{15}	0,00278
λ_{16}	-0,00548
λ_{17}	-0,00071
ε	3411,219

Çizelge 5.11 : Katsayılar (A), sonuç (C) ve bilinmeyen ağırlık (B) matrisleri.

A																		C	B
0	212697	284983	353302	410973	460880	522068	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	1	529800	λ_1
212697	0	131309	209932	281362	349574	459271	495912	519429	529743	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	1	529800	λ_2
284983	131309	0	133609	208825	282915	410170	457972	494018	520091	529753	529800	529800	529800	529800	529800	529800	1	529800	λ_3
353302	209932	133609	0	130158	208271	349574	406940	454017	494257	519696	529679	529800	529800	529800	529800	529800	1	529800	λ_4
410973	281362	208825	130158	0	133034	283950	348637	404495	456335	494971	519696	529762	529800	529800	529800	529800	1	524815	λ_5
460880	349574	282915	208271	133034	0	209932	280324	343458	405312	455676	493778	519960	529800	529800	529800	529800	1	503849	λ_6
522068	459271	410170	349574	283950	209932	0	129006	201051	276683	344404	403266	455345	519829	529800	529800	529800	1	421209	λ_7
529800	495912	457972	406940	348637	280324	129006	0	126702	206053	279285	345347	406940	495678	529800	529800	529800	1	366132	λ_8
529800	519429	494018	454017	404495	343458	201051	126702	0	134184	211039	282398	351441	460238	529783	529800	529800	1	305367	λ_9
529800	529743	520091	494257	456335	405312	276683	206053	134184	0	131884	207162	282398	409366	520091	529800	529800	1	231891	λ_{10}
529800	529800	529753	519696	494971	455676	344404	279285	211039	131884	0	130158	209379	350041	494971	529664	529800	1	155943	λ_{11}
529800	529800	529800	529679	519696	493778	403266	345347	282398	207162	130158	0	134184	284466	457319	519563	529762	1	79197	λ_{12}
529800	529800	529800	529800	529762	519960	455345	406940	351441	282398	209379	134184	0	209379	405720	493053	519696	1	108219	λ_{13}
529800	529800	529800	529800	529800	529800	519829	495678	460238	409366	350041	284466	209379	0	277725	402443	455014	1	260911	λ_{14}
529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529783	520091	494971	457319	405720	277725	0	204943	280843	1	441974	λ_{15}
529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529664	519563	493053	402443	204943	0	134759	1	512720	λ_{16}
529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529800	529762	519696	455014	280843	134759	0	1	528437	λ_{17}
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	ε

Bulunan ağırlık değerleri (λ_1, λ_2, …, λ_{17}) **(5.3)** nolu eşitlikte yerine konulduğunda;

$$z(x_0) = 0{,}002529 * 600 + 0{,}002911 * 1000 + \cdots \ldots \ldots \ldots + (-0{,}00071) * 2700$$

$z(x_0) = 825{,}0497$ olarak bulunur. Bu değer **Şekil 5.9'**da gösterilen T noktasının enjeksiyon miktarıdır. **Çizelge 5.12**'de görüldüğü gibi T noktası olması gerektiği gibi 12 ve 13 noktalarındaki enjeksiyon değerlerinin arasında bir değer alarak yapılan işlemlerin doğrulunu ispatlar niteliktedir.

Çizelge 5.12 : Kriging ile hesaplanan T noktasındaki enjeksiyon miktarı.

Nokta no	X (m)	Y (m)	Enjeksiyon (lt)
1	20581	2,5	600
2	20553,1	2,5	1000
3	20539,6	2,5	900
4	20525,7	2,5	1700
5	20512,4	2,5	1450
6	20498,6	2,5	1200
7	20471,2	2,5	1700
8	20458,1	2,5	1450
9	20445,4	2,5	1700
10	20431,4	2,5	1450
11	20417,8	2,5	900
12	20404,5	2,5	800
T	**20400**	**2,5**	**825,0497**
13	20390,5	2,5	900
14	20363,2	2,5	300
15	20323,2	2,5	600
16	20296,7	2,5	2700
17	20282,6	2,5	2700

Mesafenin Tersi Yöntemi :

Eğer bu kestirim işlemi mesafenin tersi yöntemi ile yapılsaydı **Çizelge 5.13**'te gösterilen sonuçlar elde edilecekti.

Çizelge 5.13 : Mesafenin tersi yöntemiyle bulunan T noktası için enjeksiyon değeri.

	A	B	C	D	E	F
	Nokta no	**enjeksiyon miktarı**	**mesafe**	**mesafenin tersi (1/C)**	**ağırlık (D18/D)**	**enjeksiyon * ağırlık (B*E)**
1	1	600	181	0,00552	0,00964	5,78113
2	2	1000	153,1	0,00653	0,01139	11,39109
3	3	900	139,6	0,00716	0,01249	11,24339
4	4	1700	125,7	0,00796	0,01387	23,58598
5	5	1450	112,4	0,00890	0,01552	22,49790
6	6	1200	98,6	0,01014	0,01769	21,22485
7	7	1700	71,2	0,01404	0,02449	41,63986
8	8	1450	58,1	0,01721	0,03002	43,52434
9	9	1700	45,4	0,02203	0,03841	65,30304
10	10	1450	31,4	0,03185	0,05554	80,53389
11	11	900	17,8	0,05618	0,09798	88,17852
12	12	800	4,5	0,22222	0,38755	310,04004
13	13	900	9,5	0,10526	0,18358	165,21870
14	14	300	36,8	0,02717	0,04739	14,21719
15	15	600	76,8	0,01302	0,02271	13,62481
16	16	2700	103,3	0,00968	0,01688	45,58309
17	17	2700	117,4	0,00852	0,01485	40,10846
18	**T**			0,57340		1003,6962 lt

Görüldüğü gibi mesafenin tersi yöntemiyle T noktasındaki enjeksiyon miktarı **1003,9662** lt olarak bulunmuştur. Halbuki bu değer, olması gerekenden çok fazladır.

Mesafenin tersi yöntemi için hata varyansı, **(5.4)** ve **(5.5)** nolu eşitlikler ile hesaplanır.

$$\sigma_k^2(x_0) = 2 * \sum_{i=1}^{n} \lambda_{\mathrm{i}} * \gamma(x_{\mathrm{i}}, x_0) - \sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n} \lambda_{\mathrm{i}} * \lambda_{\mathrm{j}} * \gamma(x_{\mathrm{i}}, x_0) \qquad (\mathbf{5.4})$$

$$\lambda_{\mathrm{i}} = \left(\frac{1}{d_i}\right) \Big/ \left(\sum_{i=1}^{n} \frac{1}{d_i}\right) \qquad (\mathbf{5.5})$$

Burada

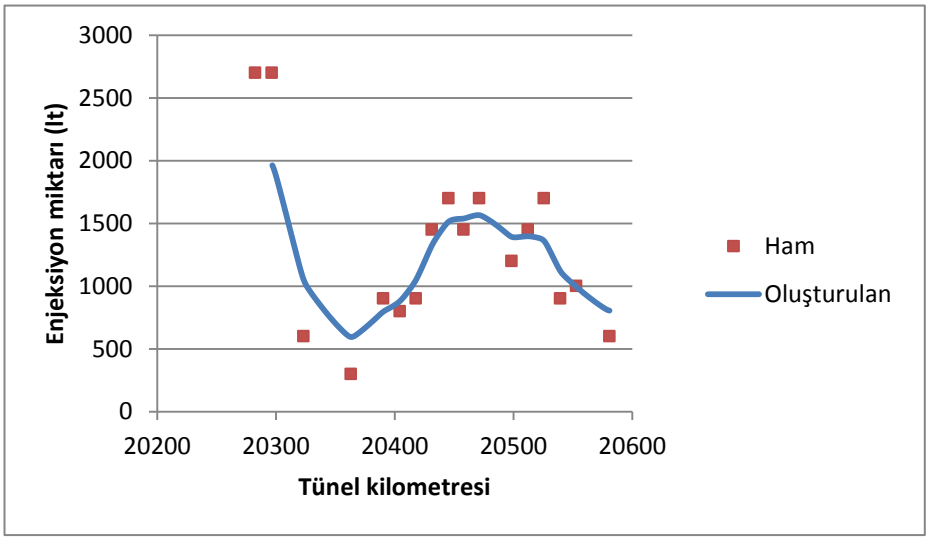
d_i : Hesaplanacak nokta ile x_i noktası arasındaki uzaklıktır.

$\sigma_k^2(x_0)$ = 166715,5 olarak bulunur.

5.2.5 Haritalandırma

3 nolu delik için 20+581 – 20+282 km'leri arasında sadece 17 noktanın enjeksiyon miktar verileri vardır. 1 m arayla olacak şekilde noktalar çoğaltılmak istendiğinde, jeoistatistik yöntem kullanılarak yaklaşık 300 nokta verilendirilmiş olur. Ancak bu işlemlerin elle yapılması Çizelge 1-11 arasında verilen tüm bu işlem aşamalarının 300 defa tekrarlanması anlamına geldiğinden dolayı bu işlemleri yapan paket programlar kullanarak hesaplamak zamandan çok fazla kazanç sağlamaktadır.

Bu yüzden GS+ programı kullanılarak çalışma sahasının 3 nolu delik ve diğer delikler için enjeksiyon grafiği 1er m aralıklarla çıkarılabilir. Ham veriler ve oluşturulan veriler için **Şekil 5.10'**daki tünel kilometresi ile o noktada basılan enjeksiyon miktarı ilişkisi bir arada gösterilmektedir.



Şekil 5.10 : Ham ve oluşturulan verilerin aynı grafik üzerinde görünümü.

Burada görüldüğü gibi kriging işlemi sayesinde ham veriler optimize edilmiş ve veri sayısı 17'den 300 e çoğaltılarak grafik detay kazanmıştır. Bölgesel ve genel eğilimler daha belirgin hale gelmiş, ortalamaya yaklaştırılmıştır. Böylece yorumlama yapmak daha kolaylaşmıştır.

5.3 Sonuç

Kriging işleminde 3 nolu delik için hata varyansı, eşitlik **(5.5)** ile hesaplanır.

$$\sigma_k^2(x_0) = \lambda_1 * \gamma(x_1, x_0) + \lambda_2 * \gamma(x_2, x_0) + \cdots \ldots \ldots + \lambda_{17} * \gamma(x_{17}, x_0) + \varepsilon \qquad (\mathbf{5.5})$$

$$\sigma_k^2(x_0) = 0,002529 * 529800 + 0,002911 * 529800 + \cdots \ldots \ldots + (-0,00071) * 528437 + 3411,219$$

$$\sigma_k^2(x_0) = 112069,8$$

Kriging işlemi için hata varyansı hesaplandığında **112069,8** olarak bulunur. Mesafenin tersi yönteminde hesaplanan hata varyansı **166715,5** olarak bulunmuştu. Bu iki değer kıyaslandığında kriging yönteminin daha küçük hata varyansıyla daha doğru hesaplama yaptığı kanıtlanmış olur.

Jeoistatistiksel yöntemler sayesinde daha yaklaşık sonuçlarla veriler istenilen miktarda çoğaltılarak çalışma sahasının profili detaylandırılabilmektedir.

Bununla birlikte çalışma sahasında bulunan çeşitli jeolojik oluşumların (fay, kırık, çatlak, sokulumlar (dayk, sil) ve süreksizlik zonlarının hesaplamaları etkileyeceği unutulmamalıdır.

3 nolu delik için yukarıda örneği verilen hesaplamalar bu çalışmada tüm enjeksiyon delikleri (1-14 nolu delikler) ve Q değerlerinin çoğaltılması da bu şekilde yapılmış, veri irdelenmiş ve elde edilen sonuçlar Bulgular ve Tartışma bölümünde verilmiştir.

6. BULGULAR VE TARTIŞMA

Bu bölümde, toplanan tüm veriler grafikler üzerinde analiz edilip yorumlanarak ortaya çıkan araştırma bulguları sunulmaktadır.

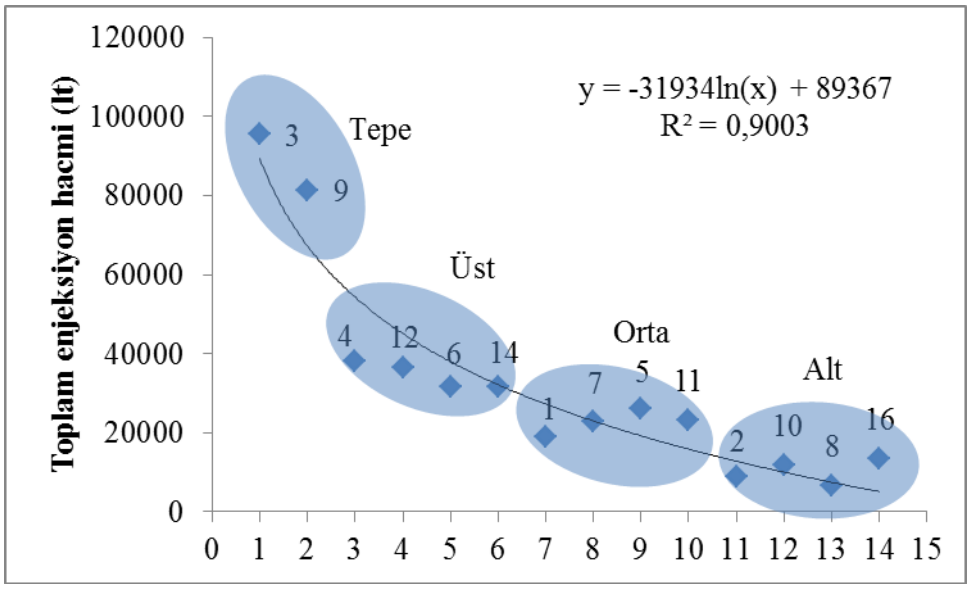
6.1 Enjeksiyon Miktarları İle Enjeksiyon Delik Seviyelerinin İlişkisi

Bu çalışmada incelenen alan içerisinde kalan enjeksiyon deliği sayısı 589'dur. Bu bölge için Q değerleri 0,25 – 0,027 arasında değişmektedir. Bu da formasyonların **Çizelge 2.2**'ye göre çok zayıf ve aşırı zayıf sınıfına girdiğini göstermektedir. Enjeksiyon delik numaralarının listesi bulundukları konum, toplam enjeksiyon deliği sayısı ve toplam enjeksiyon miktarları ile birlikte **Çizelge 6.1**'de verilmiştir.

Çizelge 6.1 : Enjeksiyon deliklerinin listesi.

Seviye	Pozisyon	Delik No	Delik miktarı	Toplam enjeksiyon hacmi (lt)
Tepe	Ön	3	49	95548
	Arka	9	38	81360
Sol Üst	Ön	4	39	38058
	Arka	12	44	36462
Sağ Üst	Ön	6	39	31506
	Arka	14	43	31678
Sol Orta	Ön	1	48	18988
	Arka	7	38	22768
Sağ Orta	Ön	5	48	26232
	Arka	11	38	23310
Sol Alt	Ön	2	38	8850
	Arka	10	45	11790
Sağ Alt	Ön	8	36	6720
	Arka	16	46	13420
Toplam	Ön-Arka	1-16	589	446690

Enjeksiyon delikleri ile deliklere basılan toplam enjeksiyon miktarı arasındaki ilişki Tunçdemir ve Kap'ın (2013) yapmış olduğu çalışmada da verildiği gibi **Şekil 6.1**'deki grafikte gösterilmektedir.



Şekil 6.1 : Enjeksiyon miktarlarının delik seviyesine göre dağılımı (Tunçdemir & Kap , 2013).

Burada görülmektedir ki, en fazla enjeksiyon tepe noktasına basılmıştır. Bununla birlikte en az enjeksiyon alt seviyede basılmıştır. Bu şekilde basılan enjeksiyon miktarı yukarıdan aşağıya doğru azalmaktadır. Bu durumun sebebi, tünel kazısı esnasında tünel taç kısmı kemerlenme etkisiyle tünel boşluğuna doğru hareket eder. Bu da tünelin üst kısmında çok daha çatlaklı ve boşluklu bir yapı oluşmasına neden olur. Bu sebeptendir ki tünelin tepe noktasına basılan enjeksiyon en fazladır. Aynı şekilde tünelin alt bölgesi bu tür deformasyonlara en az maruz kalan bölge olduğu için bu bölgede en az enjeksiyon basıldığı düşünülmektedir.

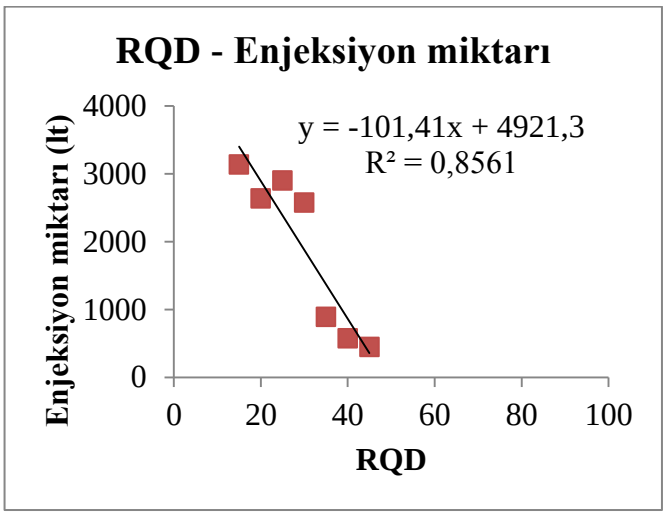
6.2 Enjeksiyon Miktarları İle RQD ve Q İlişkileri

Enjeksiyon miktarları üzerinde etkisi bulunan jeolojik parametrelerin başında RQD (kaya kalite değeri) ve Q gelmektedir. Ayna profili haritalarından elde edilen RQD ve Q değerleri aynı km'lere denk gelen ringteki deliklere basılan toplam enjeksiyon miktarları ile ilişkilendirilmiştir. Bunun için öncelikle aynı RQD değerine sahip olan Q ve enjeksiyon miktarlarının aritmetik ortalamaları alınmıştır. Bu şekilde veriler RQD değerlerine göre gruplandırılmış olur. Elde edilen bu tablo **Çizelge 6.2**'de verilmektedir.

Çizelge 6.2 : RQD – Q – Enjeksiyon miktarı tablosu.

Veri sayısı	RQD	Q	Enjeksiyon miktarı(lt)
15	15	0,0471	3135
74	20	0,0555	2637
52	25	0,0588	2898
60	30	0,0697	2575
2	35	0,1295	889
5	40	0,1258	572
6	45	0,1627	449

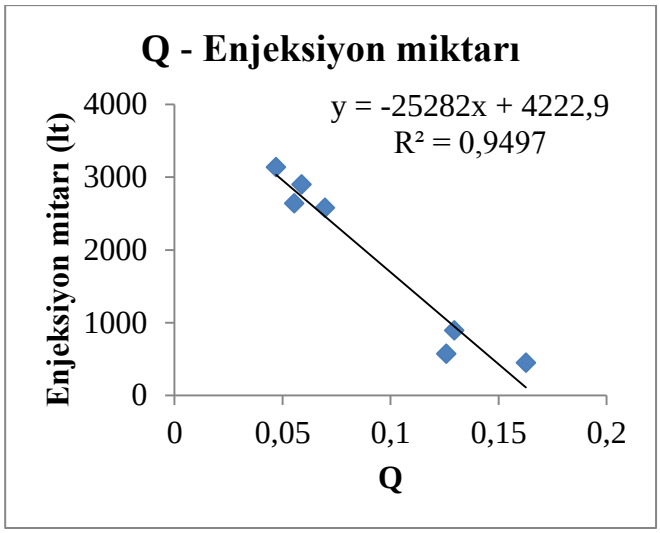
Bu tablodan faydalanılarak, RQD değerleri ile aynı noktalara basılan enjeksiyon miktarlarının ilişkisi **Şekil 6.2**'de verilmektedir.



Şekil 6.2 : RQD ile Enjeksiyon miktarı ilişkisi.

Burada görülmektedir ki, RQD değeri azaldıkça enjeksiyon miktarı artış göstermektedir.

Q değerine göre enjeksiyon miktarında olan değişim ise **Şekil 6.3**'te verilmektedir.



Şekil 6.3 : Q değeri ile enjeksiyon miktarı ilişkisi.

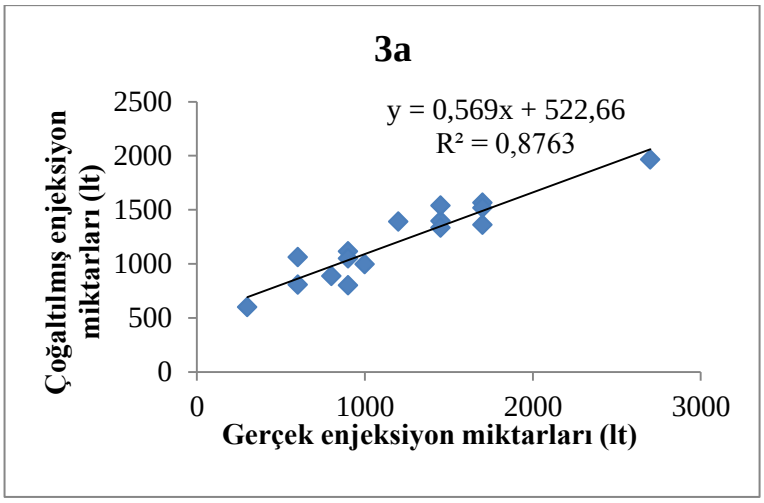
Aynı şekilde burada da Q değerinin azaldıkça enjeksiyon miktarının azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, Q değerini oluşturan Jn, Jr, Ja, Jw, SRF değerleri ile enjeksiyon miktarı arasında yüksek doğruluklu bir ilişki gözlenememiştir.

Hem RQD hem Q değerlerinin enjeksiyon miktarı üzerindeki etkisi aynı yöndedir. Kaya kalitesini gösteren bu parametreler sayesinde söylenebilmektedir ki, kaya kalitesi azaldıkça kaya içerisine basılan enjeksiyon miktarı artabilmektedir.

6.3 Gerçek Veriler İle Çoğaltılmış Verilerin Regresyon Analizi

Regresyon analizi, iki ya da daha çok değişken arasındaki ilişkiyi ölçmek için kullanılan analiz metodudur. Bu metot kullanılarak gerçek veriler ile çoğaltılmış veriler arasındaki benzerlik katsayıları incelenmiştir.

Her enjeksiyon deliği için mevcut olan toplamda yaklaşık 50 veri jeoistatistik yöntemi ile çoğaltılarak 1200 veriye çıkarılmıştır. Çoğaltma işleminin doğruluğunu göstermesi amacıyla gerçek veriler ile çoğaltılmış olan verilerin benzerlik katsayıları (R^2) grafikler üzerinde verilmektedir. Bu verilerin 20+583 - 20+229 km'leri arasında kalanları (a), 19+389 - 18+256 km'leri arasında kalanları ise (b) ile belirtilmektedir. Delik no 3a verileri incelendiğinde aynı km'lere denk gelen enjeksiyon miktarları hem gerçek hem de çoğaltılmış veriler olarak grafiğe döküldüğünde benzerlik katsayısı (R^2) yüzde 88 olarak görülmektedir (**Şekil 6.4**). Bu da çoğaltılmış verilerin doğruluk oranının yüksek olduğunu göstermektedir.

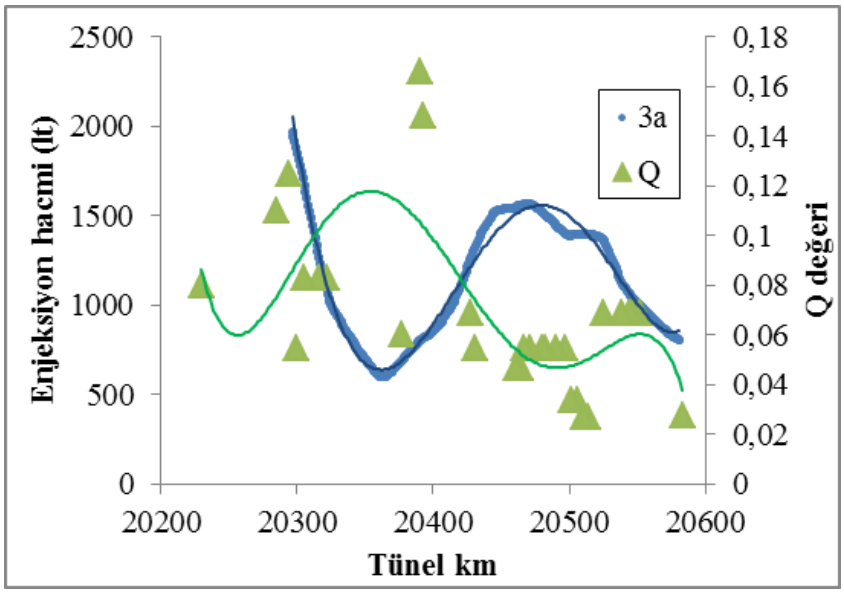


Şekil 6.4 : 3a nolu deliğin enjeksiyon miktarlarının regresyon grafiği.

Aynı şekilde **EK A** içerisinde **Şekil A.2**'deki grafiklerde tüm delikler için benzerlik katsayıları verilerek doğruluk oranları görülmektedir.

6.4 Çoğaltılmış Enjeksiyon Verileri İle Q İlişkisi

Jeoistatistik yöntemiyle çoğaltılmış olan enjeksiyon verileri, aynı km'ye denk gelen Q değerleri ile birlikte grafik üzerinde incelenmiştir. Bu sayede kaya kütle kalitesinin enjeksiyon miktarları üzerindeki etkisi ortaya konulmuştur. **Şekil 6.5**'te 3 nolu delik için a bölgesindeki grafiği verilmektedir.



Şekil 6.5 : 3a nolu delik için enjeksiyon hacminin Q değerine göre değişimi.

Bu şekil incelendiğinde, rahatlıkla görülebilmesi amacıyla eklenen eğilim çizgileri göstermektedir ki, enjeksiyon miktarları ile Q değerleri arasında ters orantılı bir

değişim bulunmaktadır. Özellikle 20+300-20+430 ve 20+430-20+550 km arasındaki bölgelerde bu belirgin bir şekilde görülmektedir. Q değerleri antiklinale benzer bir değişim gösterdiği aralıkta (20+300-20+430 km) enjeksiyon değerleri senklinale benzer bir davranış göstermektedir. Bu 20430 ve 20550 aralığında tam tersi bir davranış sergilemiş ve bu kez Q değerleri senklinal buna karşılık gelen enjeksiyon değerleri de antiklinal davranışı göstermiştir. Bu da göstermektedir ki; Q değeri arttıkça enjeksiyon miktarı azalmış, Q değeri azaldıkça enjeksiyon miktarı artmıştır. Benzer analizlerin tüm delikler için yapıldığı, enjeksiyon miktarlarının Q değerleri ile ilişkisi **EK A** içerisinde **Şekil A.3**'teki grafiklerde verilmektedir. Bu şekil ve grafikler incelendiğinde her delik için de benzer davranışlar olduğunu söylemek yanlış olmayacaktır. Ayrıca çoğaltılmış değerlerle gerçek değerler arasında çizilen ilişki **Şekil A.2**'deki grafikler incelendiğinde 10a, 10b ve 11a noktaları hariç yüksek doğrulukla değerlerin çoğaltıldığı söylenebilir. **Şekil A.3**'teki her nokta için çoğaltılmış Q ve enjeksiyon verileriyle oluşturulan ilişki grafikleri incelendiğinde **Şekil 6.5**'te verilen örneğe tıpa tıp benzememekle beraber aynı sonucun çıkarılabileceği antiklinal ve senklinallere rastlanıldığını söylemek mümkündür.

EK B olarak belirtilen *Tez çalışma dosyaları CD'si* içerisinde Ayazağa Tüneli Verileri, Jeoistatistiksel Hesaplamalar, Bulgular klasörleri bulunmaktadır.

Ayazağa Tüneli Verileri klasörü, çalışma sahası ile ilgili elde edilen verileri içermektedir. Bunlar tünel güzergahı, ayna profili verileri, enjeksiyon verileri, uygulanan tahkimat tipleri dosyalarıdır.

Jeoistatistiksel Hesaplamalar klasörü, jeoistatistik yöntemi kapsamında elde edilen verileri içermektedir. Bunlar veri çoğaltma işlemleri dosyaları ve 3 numaralı delik için jeoistatistik hesabı dosyalarıdır.

Bulgular klasörü, çalışma kapsamında elde edilen verilerin birbirleriyle ilişkilerinin incelendiği dosyaları içerir. Bunlar enjeksiyon miktarları ile enjeksiyon delik seviyelerinin ilişkisi, enjeksiyon miktarları ile RQD ve Q ilişkileri, enjeksiyon verileri ile ayna profili karşılaştırılması, gerçek veriler ile çoğaltılmış verilerin regresyon analizi dosyalarıdır.

7. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ayazağa Tüneli'nde gerçekleştirilmiş olan konsolidasyon enjeksiyonu uygulaması verilerinin kaya kütlesi özellikleri ile ilişkisi detaylı olarak incelenmiştir.

Tünel kazısının delme-patlatma yöntemiyle gerçekleştirilmiş olmasından dolayı her bir ilerlemede kazı aynasındaki sınıflama parametrelerinden faydalanarak Q kaya sınıflama değerleri elde edilmiştir. Kazı esnasında kaydedilen bu değerler kullanılarak uygulanması gereken tünel tahkimat tipi ve elemanları belirlenmiştir. Birincil tahkimat işlemi gerçekleştirildikten sonra su boruları yerlerine yerleştirilmiştir. Borular ile tahkimat arasında kalan boşluğu doldurmak ve yapıyı rijit bir hale getirmek amacıyla dolgu betonu kullanılmıştır. Son olarak da tünel tahkimatı ile jeolojik formasyon arasında kalan boşluğun kapatılarak tüneli kapsayan bu çatlaklı ve boşluklu zayıf jeolojik ortamın duraylılığını sağlamak amacıyla konsolidasyon enjeksiyonu uygulaması gerçekleştirilmiştir.

Bu çalışmada, tünellerde gerçekleştirilen konsolidasyon enjeksiyonunun kaya kütlesi özelliklerine göre ne şekilde etkilendiğini hesaplamak için 2 boyutlu jeoistatistiksel hesaplama yöntemi kullanılmıştır.

Konsolidasyon enjeksiyonunun kaya kütlesi özelliklerine göre değişiminin tespiti için kaya kütle sınıflama değeri olan Q ve kaya kalitesi değeri olan RQD parametreleri ile enjeksiyon miktarı arasındaki ilişki incelenmiştir. Bunun öncesinde enjeksiyon deliklerinin konumlarına göre enjeksiyon miktarındaki değişimi görebilmek için grafiğe döküldüğünde göstermektedir ki, basılan enjeksiyon miktarı en üst konumdaki enjeksiyon deliklerinde en fazla olmak kaydıyla en alt konumdaki deliklerde en az miktardadır. Bu durumun sebebi, kazı sırasında tünelin üstünde kalan bölgenin yerçekiminin etkisiyle tünel boşluğuna doğru akma isteğinden oluşan ikincil boşluklardır. Bu boşluklar tünel tabanının altında minimum seviyede oluşur. Bu da, alt bölgelere kıyasla üst bölgelere daha fazla enjeksiyon basılmasına neden olmuştur.

Enjeksiyon miktarları ile Q ve RQD değerlerini ilişkilendirirken öncelikle aynı RQD değerine sahip olan enjeksiyon miktarlarının ve Q değerlerinin aritmetik ortalaması alınarak gruplandırılmıştır. Bu verilerden faydalanılarak RQD - enjeksiyon miktarı grafiği oluşturulduğunda RQD değeri arttıkça basılan enjeksiyon miktarının azaldığı görülmektedir. Bununla birlikte, aynı şekilde Q – enjeksiyon miktarı grafiği oluşturulduğunda Q değerinin arttıkça basılan enjeksiyon miktarının azaldığı görülmektedir. Bu iki grafik açıkça göstermektedir ki, kaya kalitesi arttıkça bünyesine aldığı enjeksiyon miktarı da ters orantılı olarak azalmaktadır.

Enjeksiyon miktarının kaya kütlesi özelliklerine göre değişimini daha detaylı görebilmek için her enjeksiyon deliği kendi içerisinde incelenmesi doğru bir yönlenme olacaktır. Bunun için enjeksiyon miktarlarının metraja bağlı olarak dağılımından faydalanılmalıdır. Fakat mevcut verilerin mesafeye göre homojen dağılmış olmaması ve aynı metrajlara denk gelmemesi sebebiyle öncelikle jeoistatistik yöntemi kullanılarak mevcut verilerin miktarı yüksek doğruluk oranıyla çoğaltılmış ve aynı metrajlara denk gelen veriler birbirleriyle ilişkilendirilmiştir. Bu sayede örnekleme çerçevesi arttırılarak daha detaylı inceleme gerçekleştirilebilmiştir

Jeoistatistik yöntemiyle çoğaltılmış olan enjeksiyon verileri ile ham enjeksiyon verileri arasında regresyon analizi yapıldığında yüksek dereceli bir ilişki olduğu gözükmektedir. Öyle ki, **EK A.2**'de verilmiş olan regresyon grafikleri incelendiğinde tüm delikler için korelasyon katsayılarının genel olarak %90'ın üstünde olduğu görülür **(Çizelge 7.1)**. Bu, kullanılan jeoistatistik yönteminin doğru veriler ürettiğini ortaya koymaktadır.

Çizelge 7.1 : Gerçek veriler ile çoğaltılmış veriler arasındaki katsayılar tablosu.

Delik No	A	B	R^2
1a	0,932	34,11	0,99
1b	0,584	180,35	0,94
2a	0,585	99,78	0,98
2b	0,957	9,59	0,99
3a	0,569	522,66	0,88
3b	0,623	841,51	0,92
4a	0,697	308,75	0,97
4b	0,639	350,22	0,97
5a	0,444	229,56	0,88
5b	0,578	296,15	0,82
6a	0,461	529,22	0,85
6b	0,377	491,03	0,85
7a	0,643	119,07	0,99
7b	0,794	125,99	0,95
8a	0,506	100,04	0,88
8b	0,667	89,76	0,94
9a	0,564	665,45	0,83
9b	0,556	982,64	0,93
10a	0,595	59,30	0,76
10b	0,296	256,35	0,58
11a	0,447	506,27	0,69
11b	0,672	218,23	0,89
12a	0,587	478,92	0,97
12b	0,607	292,68	0,80
14a	0,874	127,3	0,99
14b	0,492	332,75	0,66
16a	0,768	60,61	0,93
16b	0,637	116,21	0,90
y: Ax + B		x: gerçek değerler y: çoğaltılmış değerler R^2: korelasyon katsayısı	

Çoğaltılmış olan enjeksiyon verileri ile aynı metrajlara denk gelen Q değerleri grafiği **EK A.3'**de verilmiştir. Buradaki eğilim çizgilerinden görülmektedir ki, genel olarak Q değerinin azaldığı bölgelerde enjeksiyon miktarı artmakta, diğer yandan Q değerinin arttığı bölgelerde ise enjeksiyon miktarında azalma meydana gelmektedir. Bu da kaya kalitesi ile enjeksiyon miktarının ters orantılı olduğunu bir kez daha göstermektedir.

Sonuç olarak, elde edilen tüm bu bulgular araştırmanın başlangıcında ortaya atılan hipotezi doğrulamaktadır. Kayaç veya zemin ortamına basılan enjeksiyon miktarı direkt olarak kaya kütlesi özellikleri ile ilişkili olup RQD ve Q değerleri ile ters

orantılıdır. Yeraltı projelerinde enjeksiyon uygulamasında tasarruf edebilmek ve böylece maliyeti düşürmek amacıyla bu konuya dikkat edilmelidir. Bunun yanında fizibilite çalışmaları sırasında belirlenen kaya kütle özelliklerinden faydalanarak RQD ve Q değerleri tespit edilebilir. Bu değerlerin yardımıyla da tünel çevresinin sızdırmazlığı ve sağlamlaştırılması için basılması gereken enjeksiyon miktarı önceden tahmin edilerek maliyet analizi gerçekleştirilebilecektir.

KAYNAKLAR

(2002). *Chemgrout Inc.* Technical Data Sheet, USA.

(2007). *İstanbul Metrosu Darüşşafaka-Hacıosman arası Geoteknik Değerlendirme Raporu.* Grup Artson Araştırma Sondajları Mühendislik, İstanbul.

(2010). (Devlet Su İşleri Genel Müdürlüğü) Kasım 2012 tarihinde DSİ: http://www2.dsi.gov.tr/bolge/dsi14/insa.htm adresinden alındı

(2012). Kasım 13, 2012 tarihinde DSİ: http://www.dsi.gov.tr/haberler/2012/04/10/melendesonageliniyor adresinden alındı

Abdüsselamoğlu, S. (1963). İstanbul Boğazı Doğusunda Mostra Veren Paleozoik Arazide Stratigrafik ve Paleontolojik Yeni Müşahedeler. *M.T.A. Dergisi*, 60.

Babin, C. (1973). Bivalvia of the Kartal Formation of Devonian Age, Istanbul. *Paleozoic of Istanbul.* içinde

Bahçivan, E. (2011). *Ayazağa Tünellerinde Enjeksiyon Çalışmalarının Etüdü.* Bitirme Çalışması, İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Maden Mühendisliği, İstanbul.

Bakım, M. A. (2007). *Enjeksiyon Yöntemleriyle Zemin İyileştirilmesi.* Isparta: Süleyman Demirel Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Balkıs, A. (2009). Enjeksiyon Yöntemleriyle Zemin İyileştirilmesi. *3. Geoteknik Sempozyumu.* Çukurova Üniversitesi, Adana.

Barton, N., Lien, R., & Lunde, J. (1974). Engineering Classification of Rock Masses for the Design of Tunnel Support. *Rock Mechanics, 6*(4), 189-236.

Bell, F. G. (1993). *Engineering Treatment of Soils.* London: E & FN SPON.

Bieniawski, Z. T. (1973). Engineering classification of jointed rock masses. *Transactions of the South African Institution of Civil Engineers, 15*(12), 335-334.

Bieniawski, Z. T. (1988). Rock mass classification as a design aid in tunneling. *Tunnels & Tunneling*.

Bieniawski, Z. T. (1989). *Engineering Rock Mass Classifications: A Complete Manual for Engineers and Geologists in Mining, Civil and Petroleum Engineering.* John Wiley & Sons.

Brook, N., & Dharmaratne, P. G. (1985). Simplified Rock Mass Rating System for Mine Tunnel Support. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*.

Carls, P. (1973). Strophomedis of the Lover Devonian Kartal Formation, Istanbul. *Paleozoic of Istanbul* (s. 89-96). içinde

Craelius. (1990). *Grout Equipment.* Product Catalogue, Part 5, Brussels, Belgium.

Cummings, R. A., Kendorski, F. S., & Bieniawski, Z. T. (1982). *Caving Rock Mass Classification and Support Estimation.* Chicago: Engineers International Inc.

Çevik, A. Ö. (2012, Eylül). *Zemin İyileştirme Yöntemleri.* Kasım 2012 tarihinde ODTÜ: http://www2.ce.metu.edu.tr/~ce468/Documents/CH9_Ground_Improvement_Methods.pdf adresinden alındı

Çinicioğlu, F. Ö. (1997). *Zemin Mekaniğinde Harç Enjeksiyonu.* İstanbul: İstanbul Üniversitesi Basımevi.

Deeru, D. U., & v.d. (tarih yok). Design of Surface and Near Surface Construction in Rock. *Proceedings 8th U.S. Symposium on Rock Mechanics.* New York: AIME.

Demiröz, A., & Karaduman, M. (2009). Zemin İyileştirme Metotları. *Teknik-Online Dergi, 8*(3).

Emiroğlu, A. (2010). *İstanbul (4. Levent-Hacıosman Arası) Metro Tünelindeki Mühendislik Uygulamaları.* Yüksek Lisans Tezi, Çukurova Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Maden Mühendisliği, Adana.

Ersoy, A., & Yünsel, T. Y. (2008). *Maden Rezerv Hesapları: Klasik ve Jeoistatistik Yöntemler.* Adana: Nobel Kitabevi Yayınları.

Essler, R. D., Drooff, E. R., & Falk, E. (2000). *Compensation Grouting: Concept, Theory and Practice.* ASCE.

Franklin, J. A. (tarih yok). Safety and Economy in Tunneling. *Proceedings 10th Canadian Rock mech. Symp.* Queens University, Kingston.

Gandl, J. (1972). Trilobites from the Devonieyen of Istanbul. Ege Üniversitesi Yayını.

Genç, D. (2008). *Zemin Mekaniği ve Temeller.* Ankara: TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.

Ghose, A. K., & Raju, N. M. (1981). Characterization of Rock Mass vis-a-vis Application of Rock Bolting in Indian Coal Measures. *Proceedings 22nd U.S Symposium on Rock Mechanics.*

Grimstad, E., & Barton, N. (1993). Updating of the Q System for NMT. *Proceedings of the International Symposium on Sprayed Concrete - Modern Use of Wet Mix Sprayed Concrete for Underground Support.* Oslo.

Güler, B. (2006). *İstanbul Ayazağa-Cebeci-Çatalca Bölgelerindeki Agrega Kaynaklarının Yüksek Dayanımlı Betonda Kullanılabilirliği.* Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Jeoloji Mühendisliği.

Henn, R. W. (1996). *Practical Guide to Grouting of Underground Structures.* ASCE Press.

ISRM. (1981). *ISRM Suggested Methods: Rock Characterization, Testing And Monitoring.* London: Pergamon Press.

Kavak, A., & Mutman, U. (2005). Düşük Basınçlı Çimento Enjeksiyonu ile Zemin İyileştirilmesi. *2. Kocaeli Deprem Sempozyumu*, (s. 1114-1119).

Kaya, O., & Mamet, B. (1971). Biostratigraphy of the Visean Cebeciköy Limestone near Istanbul, Turkey. *Journal of Foraminiferal Research*, 77-81.

Kendorski, F. S., Cummings, R. A., Bieniawski, Z. T., & Skinner, E. H. (1983). Rock Mass Classification for Block Caving Mine Drift Support. *5th International Congress on Rock Mechanics*, (s. B51-B63). Melbourne.

Keskin, A. (2010). Enjeksiyon Tekniğiyle Zemin İyileştirme. *BÜLTEN*(150), 16.

Kim, T., & Lee, C. (1998). Deformation Behavior Changes of Jointed Rocks by Cement Milk Grouting.

Kirsten, H. A. (1982). A Classification System for Excavation in Natural Materials. *The Civil Engineering in South Africa*, 293-308.

Kirsten, H. A. (1983). The Combined Q/NATM System- The Design and Specification of Primary Tunnel Support. *South Africa Tunneling*, 18-23.

Laubscher, D. H. (1977). Geomechanics classification of jointed rock masses - mining applications. *Transactions of the Institution of Mining and Metallurgy*.

Lauffer, H. (1958). Gebirgsklassificierung für den stullenbau. *Geologie und Bauwesen*(24).

Lenzini, P. A., & Bruss, B. (1975). *Ground Stabilitization: Revies of Grouting and Freezing Techniques for Underground Openings.* Department of Transportation Report.

Lunardi, P. (1977). Ground Improvement by Means of Jet-Grouting. *Ground Improvement, 1*(2), 65-86.

Matheron, G. (1971). *The Theory of Regionalized variables and its Applications.* Paris School of Mines Publications.

Mitchell, J. K. (1981). Soil Improvement-State-of-Art Report Proc. *10th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 3,* s. 509-565. Stockholm.

Mitchell, J. K., & Wade, A. V. (1992). the Role of Soil Modification in Environmental Engineering Applications. *Proceedings of the Conference of Grouting. 1,* s. 144-155. New York: ASCE.

Mollamahmutoğlu, M., & Babuçcu, F. (2006). *Zeminlerde Sıvılaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri.* Ankara: Gazi Kitapevi.

Moreno Tallon, E. (1982). Comparison and Application of the Geomechanics Classification Scheme in Tunnel Construction. *Proceedings Tunneling '82.* London.

Nakao, L., Liboshi, S., & Koyama, S. (1983). Statistical Reconsideratings on the Parameters for Geomechanics Classification. I. S. Mechanics (Dü.), *Proceedings 5th International Congress on Rock Mechanics.* içinde Melbourne.

Newman, D. A., & Bieniawski, Z. T. (1985). A Modified Version of the Geomechanics Classification for Roofspan Design in Underground Coal Mines. *AIME-SME Fall Meeting.* Albuquerque.

Nonveiller, E. (1989). *Grouting Theory and Practice.* Elsevier.

Olivier, H. J. (1979). Applicability of the Geomechanics Classification to the Orange-Fish Tunnel Rock Masses. *Civil Engineer in South Africa, 21*, 179-185.

Önalan, M. (1981). İstanbul Ordovisiyen ve Siluriyen istifinin çökelme ortamları. *Yerbilimleri Dergisi*, 161-177.

Özkan, H. (2006). *Enjeksiyon Yöntemleri ve Uygulamaları.* Ankara.

Özocak, A. (1994). *İnce Daneli Çimento ile Enjeksiyon Model Deneyleri.* İnşaat Mühendisliği. İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Pacher, F. (1964). Deformationsmessungen im Versuchsstollen als Mittel zur Erforschung des Gebirgsverhaltens und zur Bemessung des Ausbaues, Felsmech. und Ing. Geol.

Paeckelmann, W. (1938). *Neue Beitrage zur Kenntnis der Geologie, Paleontologie und Petrographie der Umgegend von Konstantinopel.* Berlin.

Palmstrom, A. (1985). Application of the volumetric joint count as a measure of rock mass jointing. *Proceedings of the International Symposium on Fundamentals of Rock Joints*, (s. 103-110). Bjorkliden, Sweden.

Palmström, A. (1974). *Characterization of degree of jointing and the quality of rock masses (in Norwegian).* Hövik, Norway: Internal report.

Pamuk, R. (2006). *Ermenek Barajındaki Enjeksiyon Uygulamaları ve Geçirimsiz Perde Çalışmaları.* Jeoloji Mühendisliği. Mersin: Mersin Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü.

Robertson, A. M. (1988). Estimating Weak Rock Strength. *AIME Annual General Meeting.* Tucson.

Romana, M. (1985). New Adjustment Ratings for Application of Bieniawski Classification to Slopes. *Proceedings International Symposium on Rock Mechanics in Excavation for Mining and Civil Works.* Mexico City: International Society for Rock Mechanics .

Sandbak. (1985). Road Header Drift Excavation and Geomechanics Rock Classification. *Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference.* New York.

Serafim, J. L., & Pereira, P. (1983). Considertations of the Geomechanical Classification of Bieniawski. *Proceedings International Symposium on Engineering Geologu and Underground Construction.* Rotterdam.

Sheorey, P. R. (1993). Design of Collar Pillar Arrays, Chain Pillars. *Comprehensive rock engineering, 2,* 631-670.

Smith, H. J. (1986). Estimating Rippability by Rock Mass Classification . *Proceedings 27th U.S. Symposium on Rock Mechanics.* New York.

Solak, T. (2009). Yer Altı Yapıları Ve Tünelcilik Konusunda Eğitim. *3. Geoteknik Sempozyumu, 3-4 Aralık* (s. 534). Adana: Çukurova Üniversitesi.

Stille, H., T, G., & A, F. (1982). *FEM analysis of rock mechanics problems with JOBFEM.* BEFO Swedish Rock Eng. Res. Found.

Tercan, A. E., & Saraç, C. (1988). *Maden Yataklarının Değerlendirilmesinde Jeoistatistiksel Yöntemler.* Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.

Terzaghi, K. (1946). *Rock defects and loads on tunnel supports.* Cambrige: Harvard University.

Tunçdemir, F. (2004). Temel Zeminlerinin Enjeksiyon Tekniğiyle İyileştirilmesi. *Türkiye Mühendislik Haberleri*(430).

Tunçdemir, H. (2010). Madencilikte Jeoistatistik Yöntemler. İstanbul Teknik Üniversitesi Maden Fakültesi, Seminer.

Tunçdemir, H., & Kap, Ö. F. (2013). Geostatistical Evaluation of a Water Conduit Tunnel Due to Grout & Rock Mass Properties. *Turkish International Mining Congress and Exhibition.* Antalya, Turkey.

U.S.Army. (1970). *Grouting Methods and Equipment.* Technical Manual, Department of the Army and the Air Force, Washington .

U.S.Army. (1984). *Engineering and Design: Grouting Technology.*

Ulusay, R., & Sönmez, H. (2002). *Kaya Kütlelerinin Mühendislik Özellikleri.* Ankara: TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayınları.

Ünal, E. (1983). *Design Guidelines and Roof Control Standards for Coal Mine Roofs.* Pennsylvania State University.

Ünal, E., & Özkan, İ. (tarih yok). Determination of Classification Parameters for Clay-bearing and Stratified Rock Mass. *Proceedings of the 9th International Conference on Ground Control in Mining.* West Virginia University.

Ünlütepe, A. (2003). Tünel İnşaatları Sırasında Uygulanan Ölçme Yöntemleri ve Bu Yöntemlerin Değişik Tünelcilik Metotları için Karşılaştırılması. *I. Ulusal Mühendislik Ölçmeleri Sempozyumu, 30-31 Ekim.* İstanbul: Yıldız Teknik Üniversitesi.

Vallejo, L. I. (1983). A New Rock Classification System for Underground Assessment Using Surface Data. *Proceedings International Symposium.* Rotterdam.

Venkateswarlu, V. (1986). *Geomechanics Classification of Coal Measure Rocks vis-a-vis Roof Supports.* PhD thesis, Indian School of Mines, Dhanbad.

Wallace, H. B. (1982). *Grouting in Geotechnical Engineering.* New York.

Warner, J., & Brown, D. R. (1982). Compaction Grouting. *Proceedings of Conference on Grouting in Geotechnical Engineering.* New Orleans.

Weaver, J. M. (1975). Geological Factors Significant in the Assessment of Rippability. *Civil Engineer in South Africa, 17*(12).

Welsh, J. P., & Burke, G. K. (tarih yok). Advances in Grouting Technology.

Wickham, G., Tiedemann, H. R., & Skinner, E. H. (1972). Support Determination Based on Geologic Predictions. *Proceedings Rapid Excavation and Tunneling Conference.* New York: AIME.

Williamson, D. A. (1984). Unified rock classification. *Bull Assoc. Eng. Geol.*

Yalçınlar, İ. (1951). İstanbul Civarının Paleozoik Arazisine Yeni Müşahadeler. *Türkiye Jeoloji Kurultayı Bülteni*, 125-130.

Yalçınlar, İ. (1954). Sur la Presence des Schistes Carboniferes et des Plantes Fossiles a l'W. d'İstanbul. *C.R.S. Soc. Geol.* France.

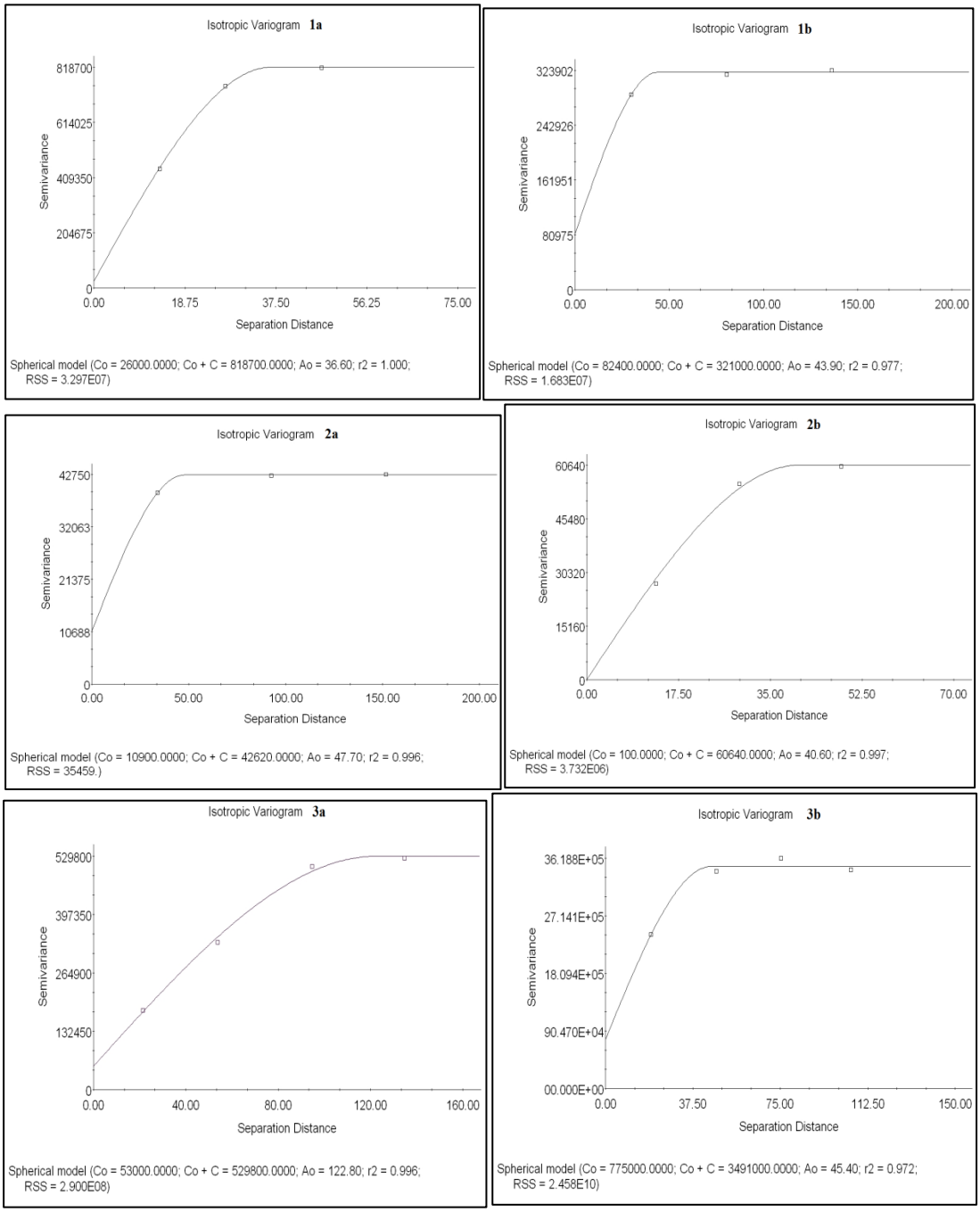
Yılmaz, I. (2007). *Mühendislik Jeolojisi İlkeler ve Temel Kavramlar.* Ankara: Teknik Yayınevi.

EKLER

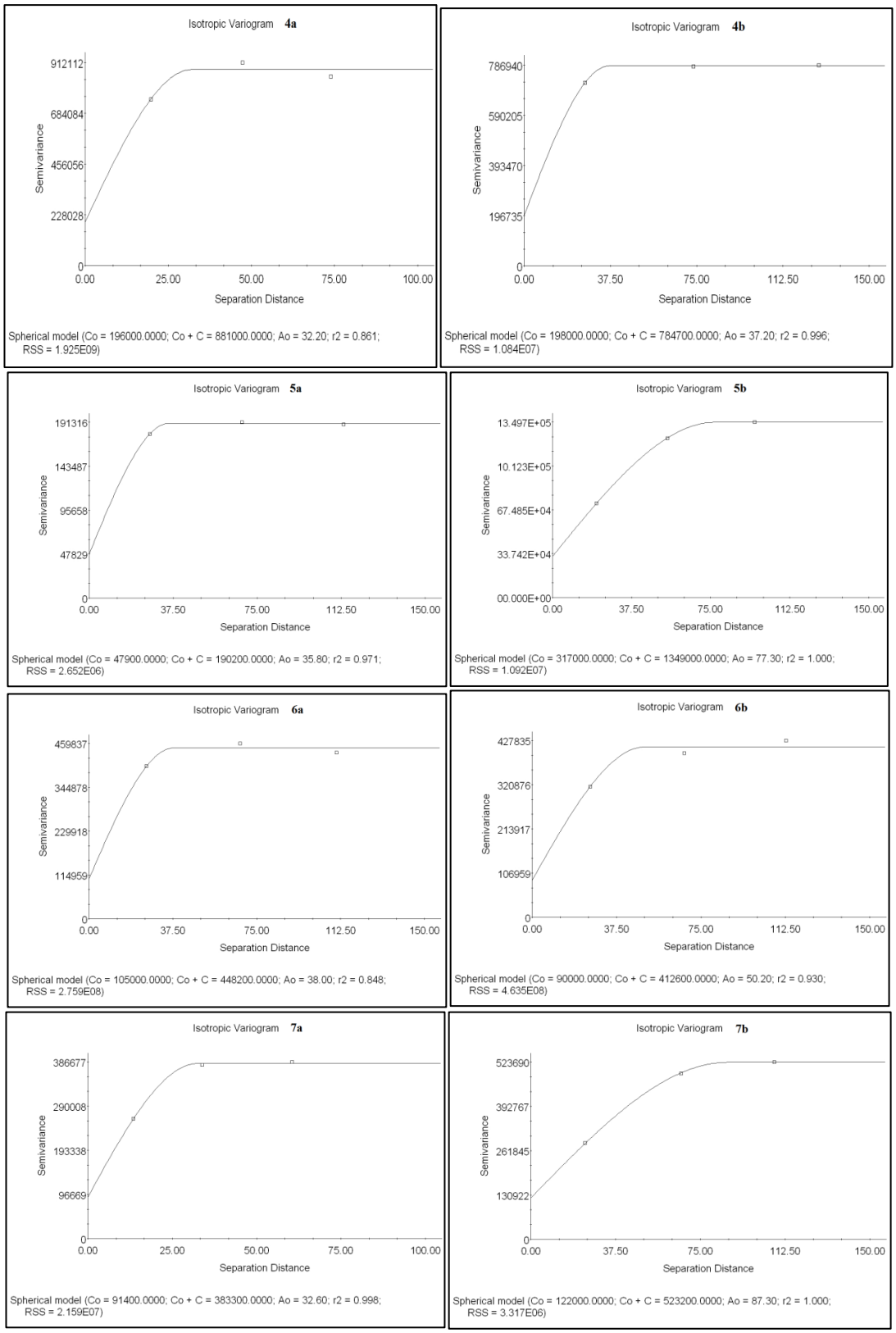
EK A : Grafikler

EK B : Tez çalışma dosyaları CD’si

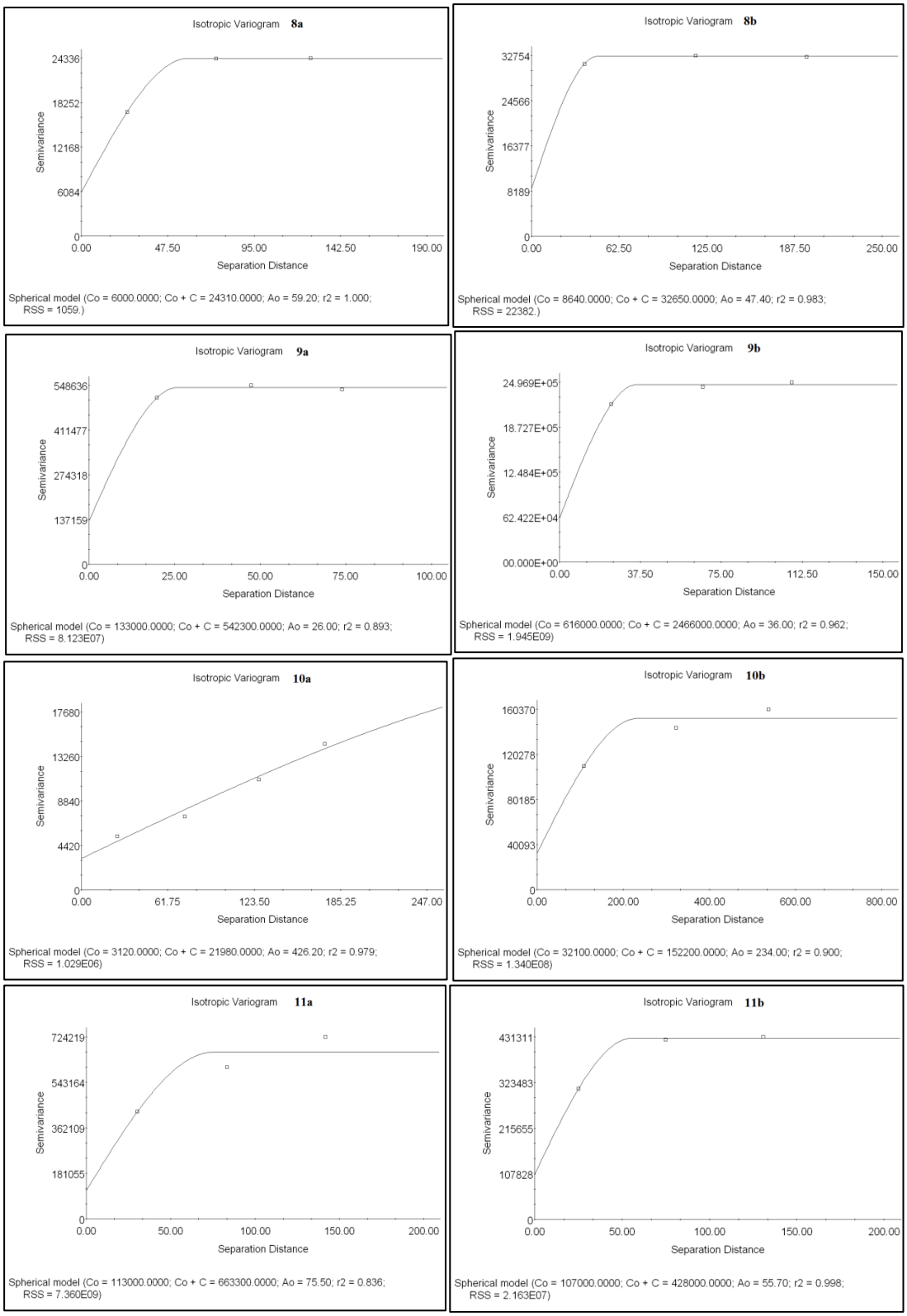
EK A : Grafikler



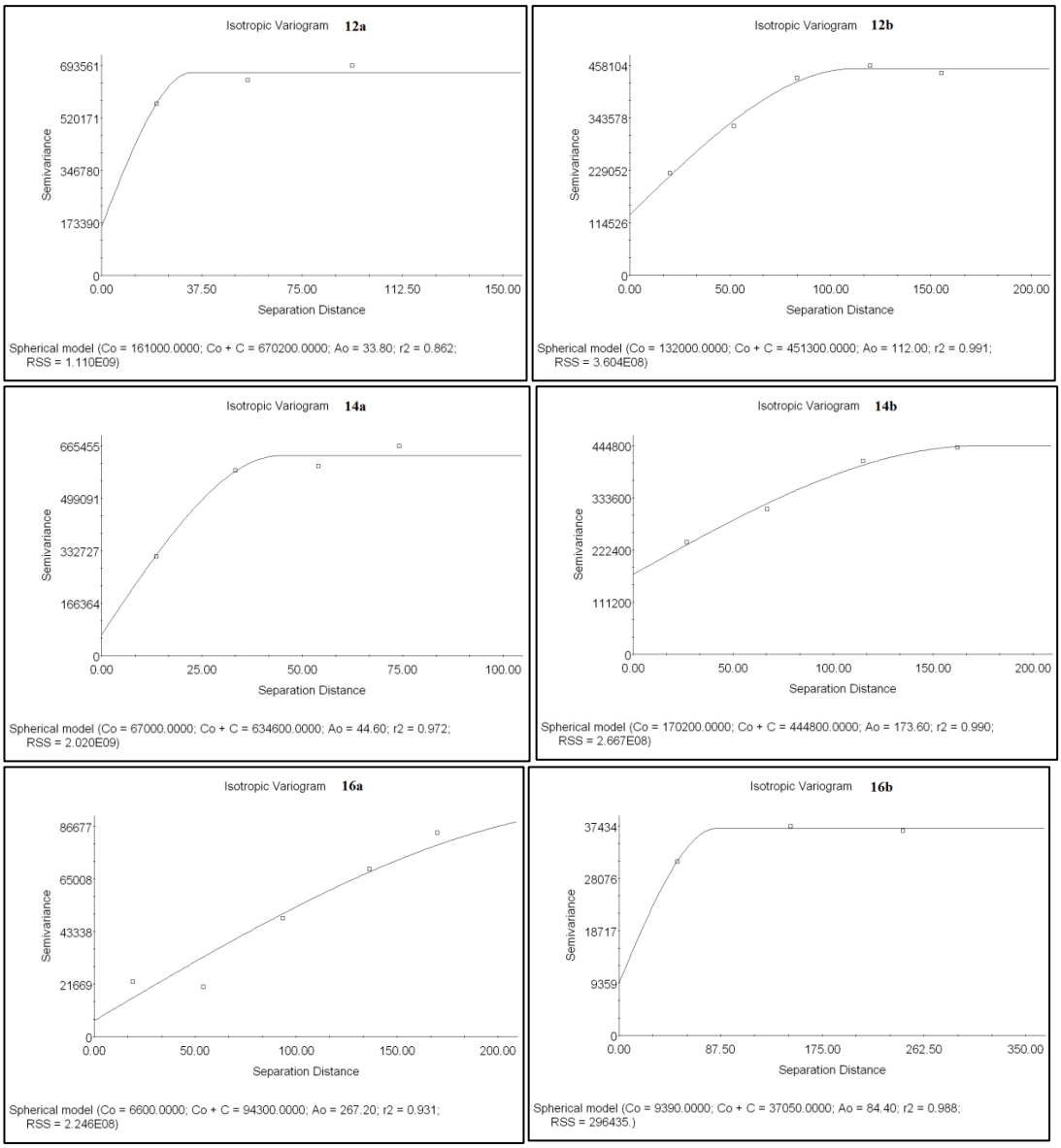
Şekil A.1 : Variogram grafikleri ve parametreleri.



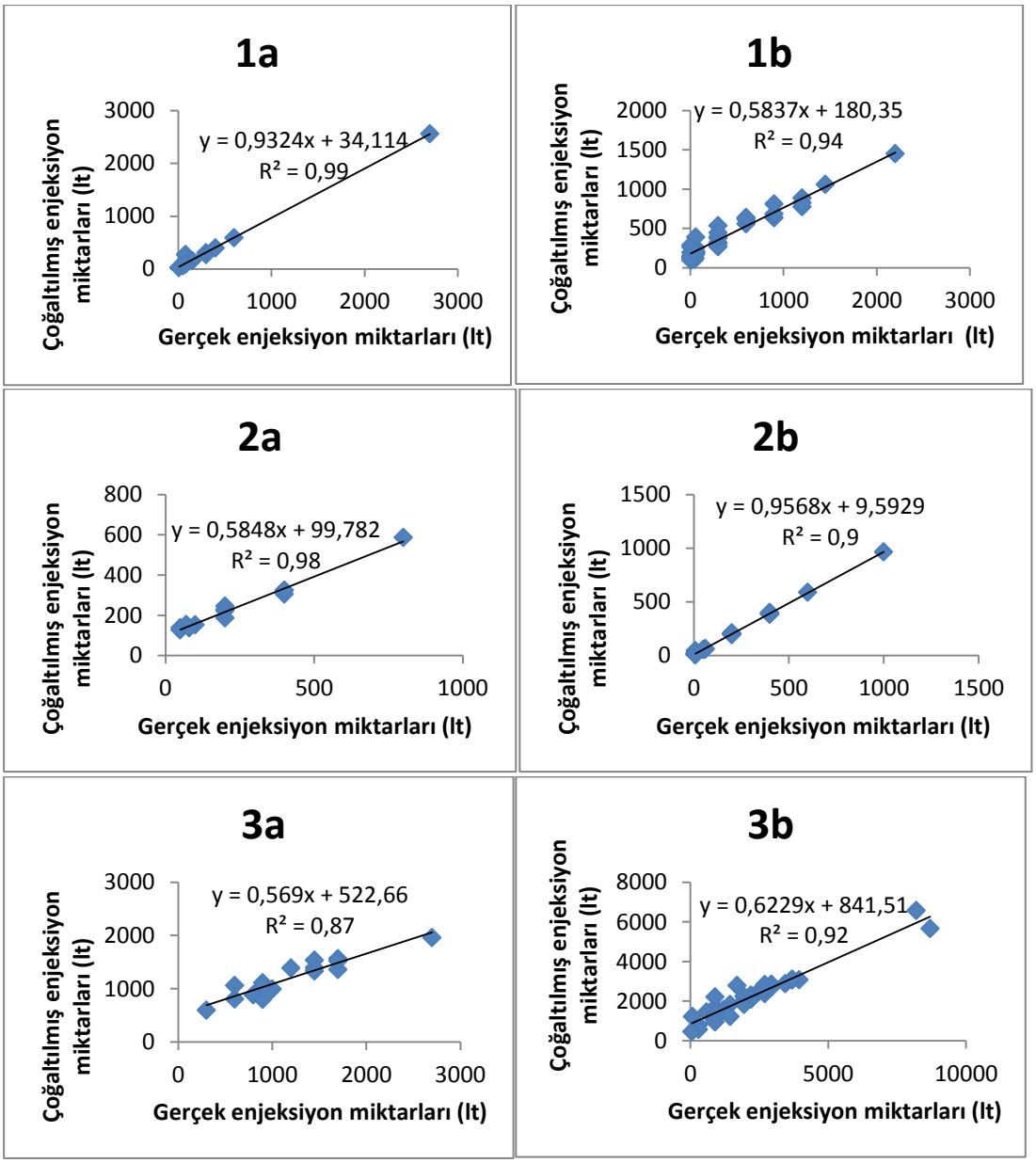
Şekil A.1 (devam) : Variogram grafikleri ve parametreleri.



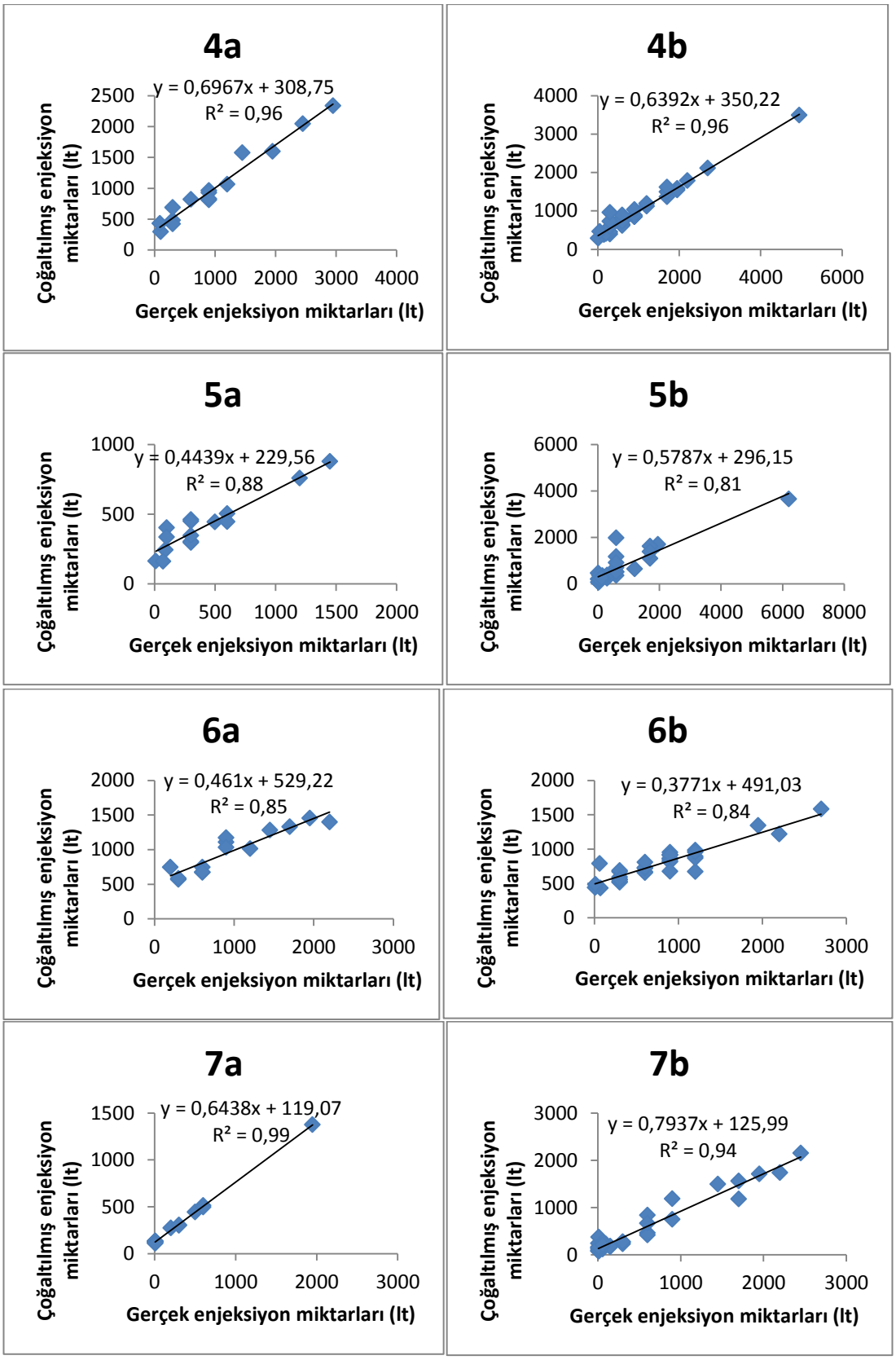
Şekil A.1 (devam) : Variogram grafikleri ve parametreleri.



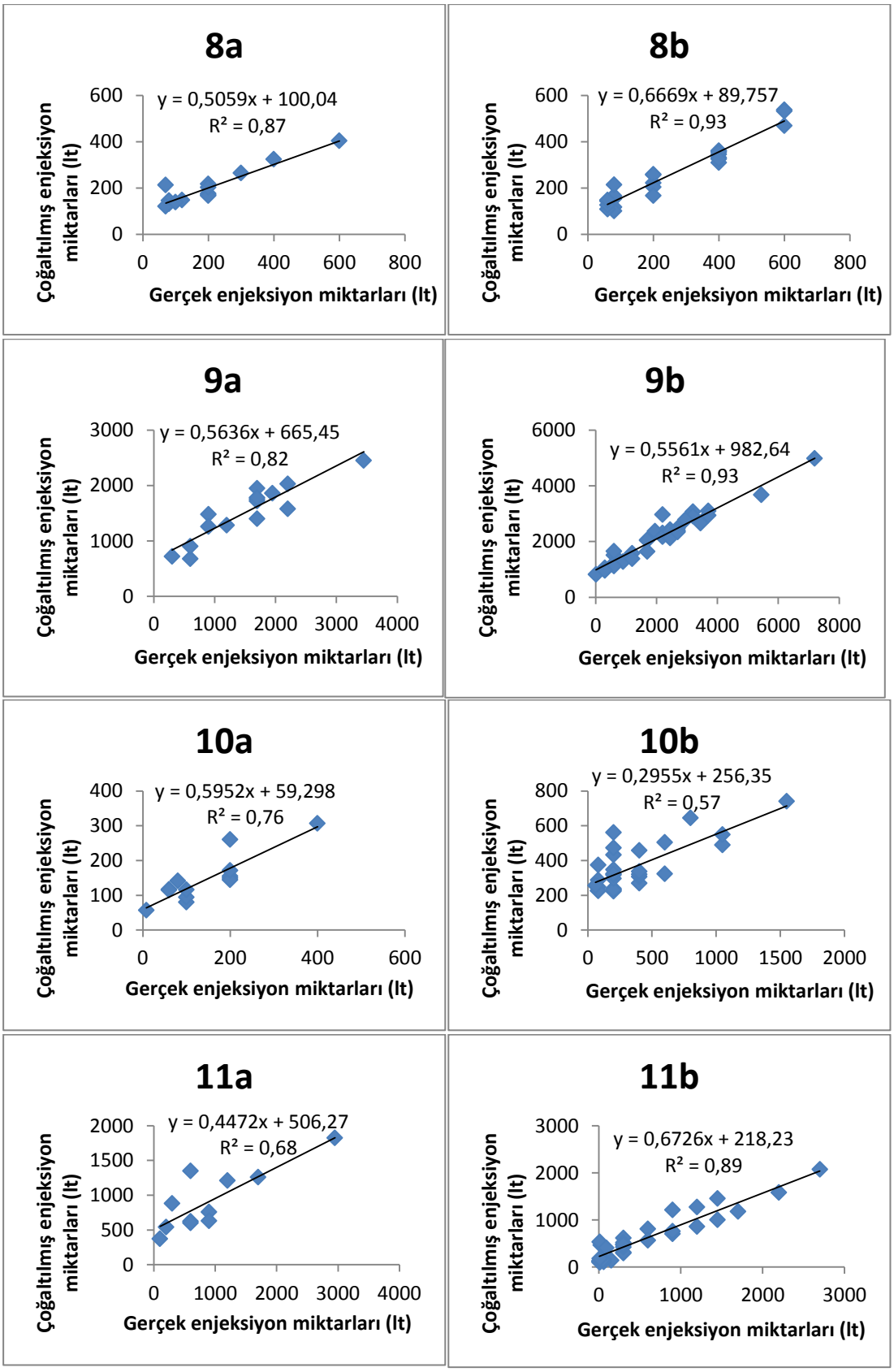
Şekil A.1 (devam) : Variogram grafikleri ve parametreleri.



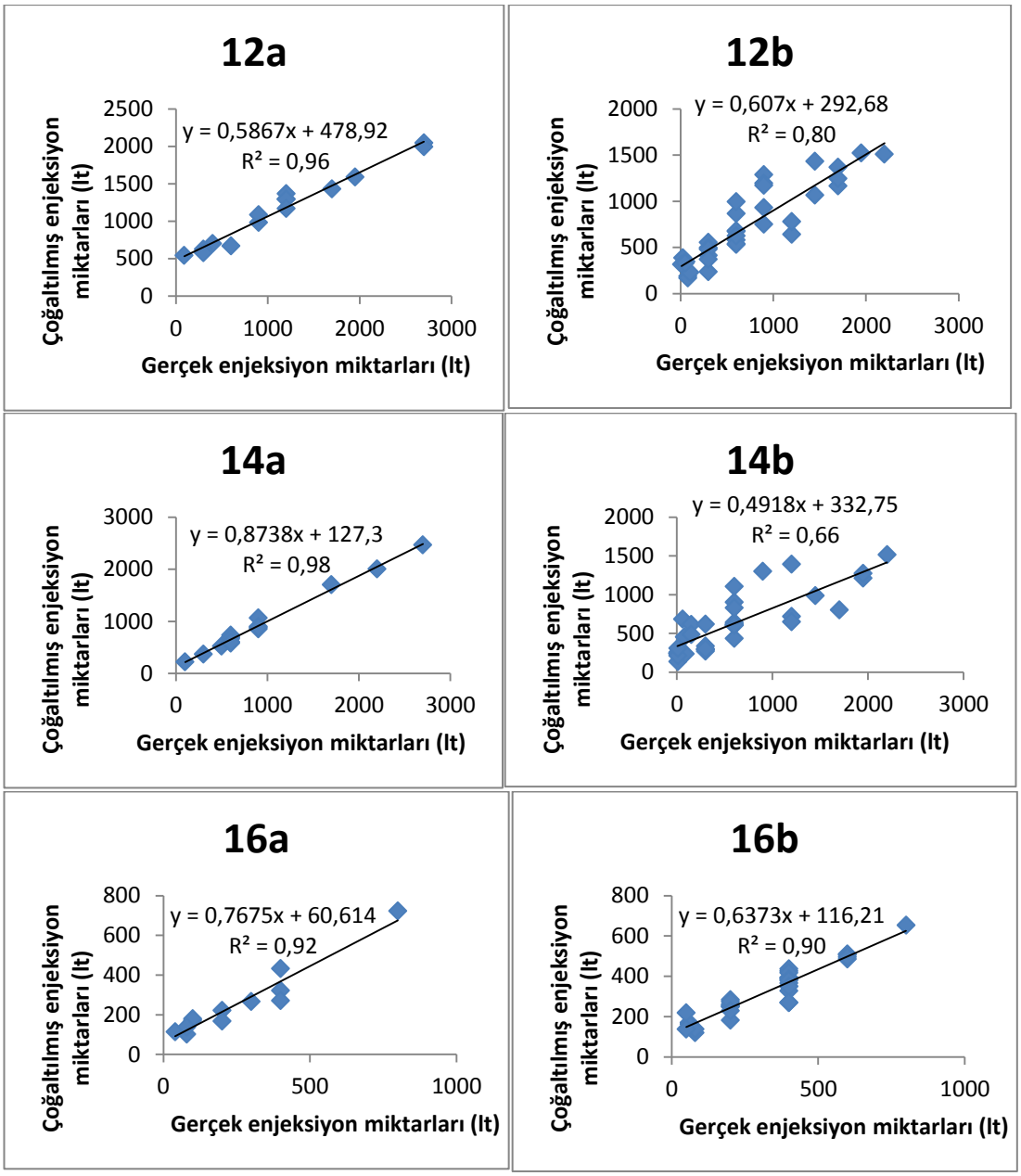
Şekil A.2 : Gerçek veriler ile çoğaltılmış verilerin regresyon grafikleri.



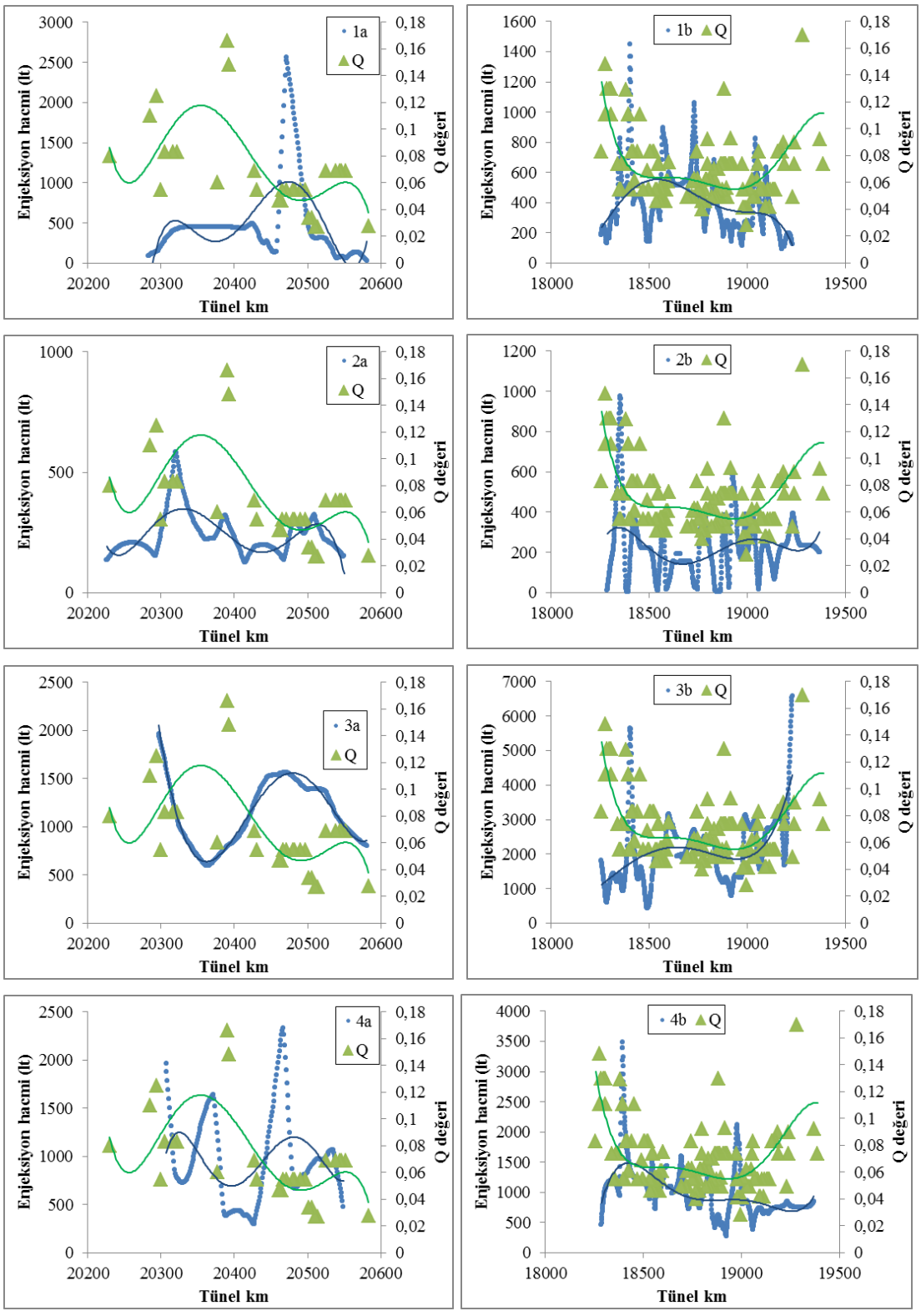
Şekil A.2 (devam): Gerçek veriler ile çoğaltılmış verilerin regresyon grafikleri.



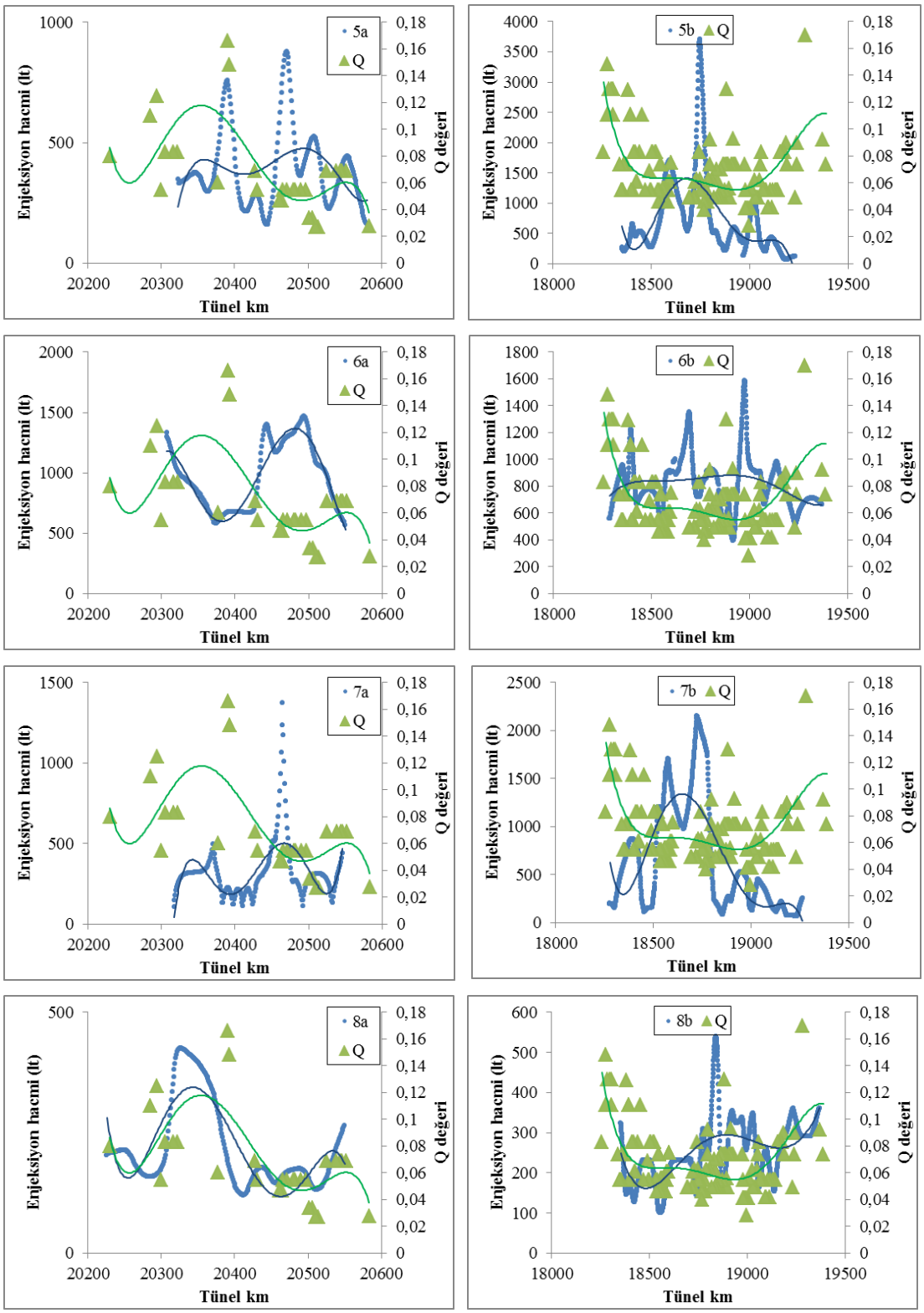
Şekil A.2 (devam): Gerçek veriler ile çoğaltılmış verilerin regresyon grafikleri.



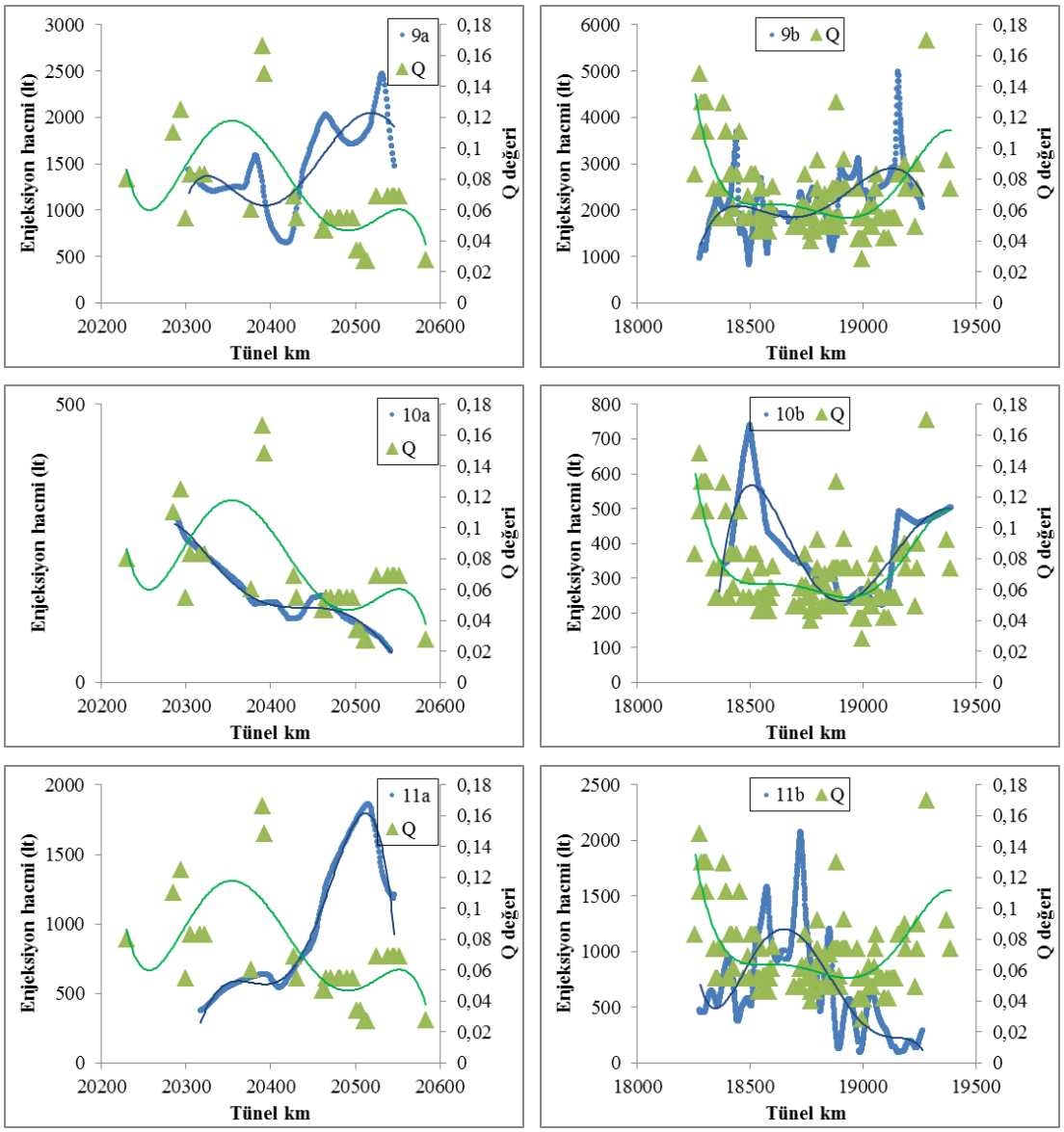
Şekil A.2 (devam): Gerçek veriler ile çoğaltılmış verilerin regresyon grafikleri.



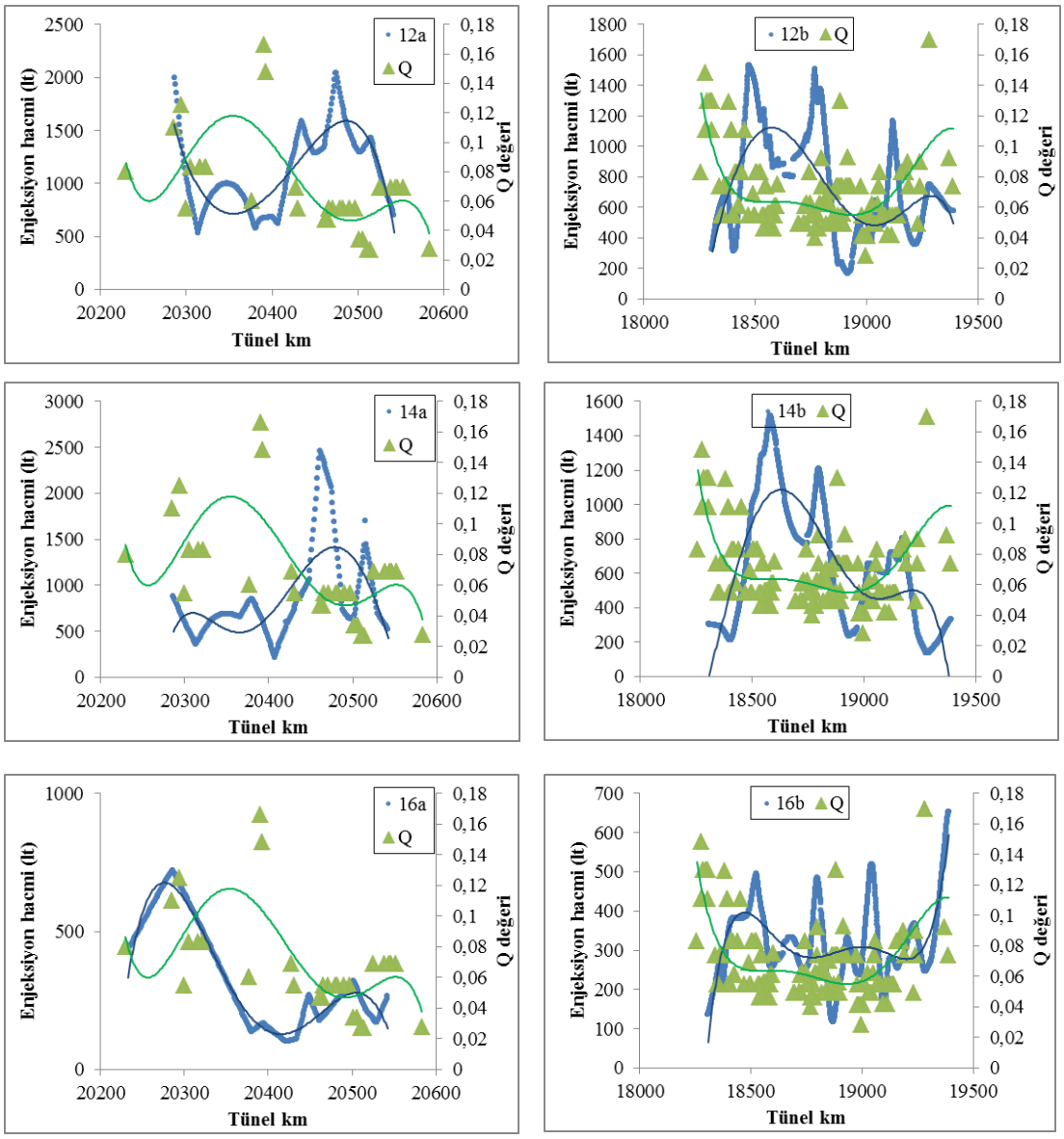
Şekil A.3 : Enjeksiyon ile Q ilişkisi.



Şekil A.3 (devam) : Enjeksiyon ile Q ilişkisi.



Şekil A.3 (devam) : Enjeksiyon ile Q ilişkisi.



Şekil A.3 (devam) : Enjeksiyon ile Q ilişkisi.

ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Ömer Faruk KAP

Doğum Yeri ve Tarihi: Fatih , 09.10.1988

Adres: Kadıköy/İSTANBUL

E-Posta: omerfarukkap@gmail.com

Lisans: Jeoloji Mühendisliği / İstanbul Teknik Üniversitesi

Yayın ve Patent Listesi:

Kap Ö. F., İskender A. K., Tığlı T., Şat S.: Bursa İli Gemlik İlçesi'nin Hidrojeoloji ve Mühendislik Jeolojisi Bakımından İncelenmesi. *İstanbul Teknik Üniversitesi Jeoloji Mühendisliği Bölümü,* Lisans Bitirme Tezi, 2011 İstanbul.

TEZDEN TÜRETİLEN YAYINLAR/SUNUMLAR

▪ Tunçdemir H., **Kap Ö. F.** : Geostatistical Evaluation of a Water Conduit Tunnel Due to Grout & Rock Mass Properties. *Turkish International Mining Congress and Exhibition*, 2013 Antalya, Turkey.