

Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirme ve Deplasman Tahmini: Vaka Analizi

Gizem Mısırlı*

* Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman, Türkiye (ORCID: 0000-0002-2649-0381)

(İlk Geliş Tarihi 13 Ocak 2020 ve Kabul Tarihi 24 Şubat 2020)

(DOI:10.31590/ejosat.688798)

ATIF/REFERENCE: Mısırlı, G. (2020). Jet Grout Yöntemi ile Zemin İyileştirme ve Deplasman Tahmini: Vaka Analizi. *Avrupa Bilim ve Teknoloji Dergisi*, (18), 290-299.

Öz

Konya ili Meram ilçesinde kohezif bir zemin üzerinde inşa edilecek bir yaşam kompleksi için Jet Grout yöntemi ile temel zeminin güçlendirme çalışması yapılmıştır. İlgili sahada taşıma gücü ve oturma problemi nedeni ile 3351 adet 60 cm çapında ve 15 m uzunluğunda 1.6x1.6 m karelaj ile Jet Grout kolonları imal edilmiştir. Sahada süreklilik ve yükleme testleri yapılarak, imalatların kalite kontrolleri gerçekleştirilmiştir. Bu çalışmada, deplasman tahmini için rastgele seçilen 25 jet grout kolonu üzerinde gerçekleştirilen yükleme test sonuçları kullanılmıştır. Sonuç olarak, önerilen güçlendirme projesinin, emniyetli bir şekilde proje yükü altında sorunsuz olarak çalıştığı tespit edilmiştir. Arazi çalışmaları yanında, yükleme-boşaltma çevrimine uygun olarak meydana gelecek deplasmanların öngörülmesi de önem arz etmektedir. Zeminde meydana gelecek oturmaların tahmini ve değerlendirmesi, sınırlı miktardaki uygulanabilir veri nedeniyle inşaat mühendisliği uygulamalarında önemli sorunlardan biri olmaya devam etmektedir. Bu araştırmada, deplasman değerlerini irdelemek için Quasi-Newton eğitim algoritması tabanlı yapay sinir ağı önerilmiştir. YSA modelleri, gradyan bilgileri kullanılarak her bir yinelemede ters Hessianın yaklaşımı ile tasarlanmıştır. Jet grout uzunluğu, çapı ve uygulanan kuvvetler girdi parametresi olarak alınmıştır. Sonuçlar, önerilen algoritmanın özellikle incelenen zemin alanları için yer değiştirmeyi tahmin etmede etkili olduğunu göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Jet Grout Yöntemi, Zemin İyileştirme, Arazi Kazık Yükleme Deneyi, Yapay Sinir Ağları.

Ground Improvement with Jet Grout Method and Displacement Prediction: A Case Study

Abstract

Jet Grout application project has been carried out as a soil improvement technique for a living complex to be built on a cohesive soil in Meram district of Konya. Due to the bearing capacity and settlement problems in the related area, a total number of 3351 pieces of Jet Grout columns were implemented in a 1.6 x 1.6 m configuration with a diameter of 60 cm and a length of 15 m. At the site quality controls of the implementations were carried out by conducting integrity and in-situ loading tests. In this study, in-situ loading test results that has been obtained from 25 randomly selected jet grout columns been used to predict the displacements. According to the test results, it was determined that the proposed improvement project operates safely performance under the project load without any problems. In addition to the field studies, it is also important to predict displacements that will occur in accordance with the loading-unloading cycle. Displacement prediction and evaluation remains as one of the significant problems in the civil engineering applications due to very limited applicable data. In this research, Quasi-Newton training algorithm based artificial neural network was

¹Sorumlu Yazar: Karamanoğlu Mehmetbey Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Karaman, Türkiye, ORCID: 0000-0002-2649-0381, gmisir@kmu.edu.tr

proposed for evaluating the displacement values. ANN models were designed with the approximation of the inverse Hessian at each iteration by using gradient information. Jet grout length, diameter and applied forces were taken as input parameters. The results showed that the proposed algorithm is efficient in predicting the displacement especially for the examined ground areas.

Keywords: Jet Grout Method, Soil Improvement, In-Situ Pile Loading Test, Artificial Neural Networks.

1. Giriş

İnşaat faaliyetlerinin tamamında, üst yapıdan aktarılan yükler, temel sistemleri aracılığı ile taşıyıcı zemin bölgeleri tarafından taşınmaktadır. Bu nedenle, endeks ve mühendislik özellikleri, çevre koşulları, yükleme geçmişi, yeraltı su durumu, yükleme koşulları ve heterojen, anizotrop yapısı nedeni gibi birçok değişkene bağlı bir ortamin yük altındaki mekanik davranışının yeterli doğrulukta tayin edilmesi oldukça önem arz etmektedir. Son yıllarda mevcut kentleşme faaliyetlerinin artması, günümüz koşullarına uygun yaşam komplekslerine geçiş ile konsantré yüklü alanların teşkil edilmesi, yüksek yapı imalatlarının hız kazanması ve bununla birlikte yaşanan arsa sıkıntıları, geoteknik uzmanlık çalışmalarına duyulan ihtiyacı her geçen gün artmaktadır. Bu nedenle mevcut inşaat alanları için taşıma gücü ve oturma yetersizliği başta olmak üzere heyelan, deprem ve sivilaşma riski açısından gerekli değerlendirmelerin yapılması ve güçlendirme tedbirlerinin alınması oldukça önem kazanmıştır.

Üst yapı için yetersiz olan zemin koşullarının söz konusu olduğu sahalar için çözüm yolu olarak birkaç farklı alternatif düşünülebilmektedir. Bunlardan bazıları, elverişsiz koşullara sahip inşaat sahasından vazgeçilebilir, üst yapı, mevcut saha koşullarına uygun şekilde revize edilebilir, temel sistemi değiştirilebilir veya zeminin performansının iyileştirilmesi sağlanabilmektedir. Bu seçeneklerden uygun olanına karar vermek söz konusu yetersizliğin giderilebilmesi için güvenilir, uygulanabilir ve ekonomik bir yaklaşımın bir arada olduğu optimum çözümün tercih edilmesi ile mümkün olmaktadır. Bu nedenle, zemin iyileştirme çalışmaları bu üç koşulun bir arada sağlanabildiği durumlarda sıkılıkla tercih edilmektedir. Son yıllarda teknolojik gelişmelerle birlikte Geoteknik Mühendisliğinde, zemin iyileştirme çalışmalarına sıkılıkla başvurulmaktadır. Problemlı herhangi bir saha için hangi yöntemin seçileceği konusu tecrübe, maliyet ve uygulanabilirlik alt başlıklarını içерse de ayrıca; beklenen iyileşmenin seviyesi ve diğer olası yöntemlere göre elde edilebilecek iyileşmelerin göreceli farkları gözlemlerek değerlendirilmelidir.

Son yıllarda sıkılıkla uygulanan yöntemlerden biri enjeksiyon tekniği ile zemin ıslahıdır. En genel anlamda akişkan malzemenin basınç altında zemin boşluklarına enekte edilmesi ile bu boşlukların azaltılması prensibine dayanmaktadır. Yöntem günümüzde, yüksek basınçlar altında zemine enekte edilen enjeksiyon malzemesinin, zemin içinde göreceli rijitliği yüksek sürekli bir kolon oluşturacak şekilde gelişim göstermesiyle, Jet Grout yöntemi adıyla yaygın olarak kullanılmaktadır. Jet Grout yöntemi, zeminin iyileştirme, kazı yüzeylerinin desteklenmesinde, geçirimsizlik perdelerinin teşkilinde, kazı çukuru taban tipalaması uygulamalarında sıkılıkla tercih edilmektedir (James ve Wen-Chieh 2014, Wang ve ark. 2013, Düzce ve Gökalp 2003, Durgunoğlu ve ark. 2004, Wong ve ark. 2020, Bayesteh ve Sabermahani 2020, Vu ve Le 2020). İmalat prensibi olarak; kolon alt ucu seviyesine indirilen prob ile oluşturulacak çapa uygun olarak seçilen Jet sistemine bağlı olarak zemin içinde rijit kolonlar oluşturulması esasına dayanmaktadır. İmalatın performansını belirleyen temel parametreler ise seçilen jet sistemi, nozul sayısı ve çapı, enjeksiyon basıncı, tijin dönme ve çekilme hızı, enjeksiyonun su/cimento oranıdır. Yöntemin avantajları arasında, hemen hemen tüm zemin türlerinde uygulanabilmesi, hızlı ve ekonomik olması, istenilen derinlikte başlanıp bitirilebilmesi ve saha süreksizlikleri/değişikliklerine kolay adapte edilebilmesi sayılabilir. Zemin içinde oluşturulan kolon geometrinin belirlenesindeki zorluk, kolon sürekliğının sağlanmasının kontrolü ve imalat süresince gözlem ve tecrübe ihtiyaç duyulması da yöntemin dezavantajları olarak sayılmaktadır (Croce, ve ark. 2014).

Çalışma, Konya ili Meram ilçesinde bulunan arsanın temel zemin özelliklerinin, Jet-Grout yöntemiyle iyileştirilmesine yönelikir. İnşaat sahası için, 2017 yılında Geoteknik Değerlendirme Raporu hazırlanmıştır. Söz konusu raporlarda belirtilen sonuçlara göre, temel sistemleri altında gerilme yetersizliklerinin olduğu belirlenmiş olup, bu yetersizliklerin giderilmesi için, temel sistemi altında zemin ıslahı yapılması veya derin temel sistemine geçirilmesi önerilmiştir. Zemin ıslah metodunun seçiminde önemli etkenler; metodun uygulama kolaylığı, tanımlanan problemin çözümüne etkinliği, maliyeti ve çevresel etkilere duyarlılığı olarak sıralanabilir. Bu anlamda saha özeline de etkili ve uygun yöntemin, cimento ve diğer bağlayıcıların zemin içine yüksek veya düşük basınçlar altında enekte edilmesine yönelik Jet-Grouting uygulaması olduğuna karar verilmiştir. Özellikle yüksek taşıma gücünün gereği, saha jeolojisi sebebiyle değişken zemin tiplerinde çalışma ihtiyacı duyulduğu ve inşaat süresinin kısıtlı olduğu durumlarda diğer yöntemlere göre daha avantajlı olduğundan, Jet-Grout teknği sıkılıkla tercih edilen zemin iyileştirme yöntemlerinden biridir. Proje sahasında da bu durumun benzer özelliklerde olması nedeniyle zemin ıslahında jet grouting yöntemi tercih edilmiş ve zemin iyileştirme çalışmaları sonrası beklenen emniyetli zemin taşıma gücü değerleri ve kalite kontrol testleri ile servis yükü altında sistem performansı değerlendirilmiştir. Kalite kontrol testleri için 25 farklı jet imalatı üzerinde yükleme testleri yapılmış ve yükleme-boşaltma çevrimleri ile servis yükünün %130'una kadar çıkmıştır. Çalışmanın devamında ise ilgili saha profili ile sınırlı olmak üzere, yükleme test sonuçları kullanılarak, yapay sinir ağları yöntemi ile deplasman tahminleri yapılmıştır. Yapay ağlar, yapışal, mühendislik problemleri de dahil olmak üzere çeşitli alanlarda kullanılmaktadır (Altun ve ark. 2008). Bu ağlar insan beyini modellemeyi ve bazı eylemlerini gerçekleştirmeyi amaçlamaktadır. Yapay sinir ağları (YSA) başlangıçta matematiksel nörobiyolojiden gelmekle birlikte, alternatif olarak regresyon modellerinin ve diğer istatistiksel tekniklerin kullanılabileceği tahmin ve sınıflandırma problemlerinde de faydalıdır. YSA istatistiksel açıdan incelendiğinde esnek ve doğrusal olmayan regresyon yöntemi olarak sınıflandırılmıştır (Paliwal ve Kumar, 2009). YSA uygun şekilde yapılandırıldığında ve eğitildiğinde, geçmiş verilerdeki yönelimleri tanyabilir (Lenard ve ark. 1995). Çoklu regresyon, ayırcı analiz ve lojistik regresyon, tahmin ve sınıflandırma problemlerinde yaygın olarak kullanılan geleneksel tekniklerdir. YSA son yıllarda önem kazanmış, dolayısıyla tahmin ve sınıflandırma problemlerinde geleneksel yöntemlere alternatif çözüm haline gelmiştir (Ripley, 1994). Yapay sinir ağları, rastgele bir durumdan nihai bir modele yinelemeli olarak eğitim yoluyla geçiş yapan tamamen veri odaklı bir model olarak düşünülebilir (Smith ve Mason, 1997).

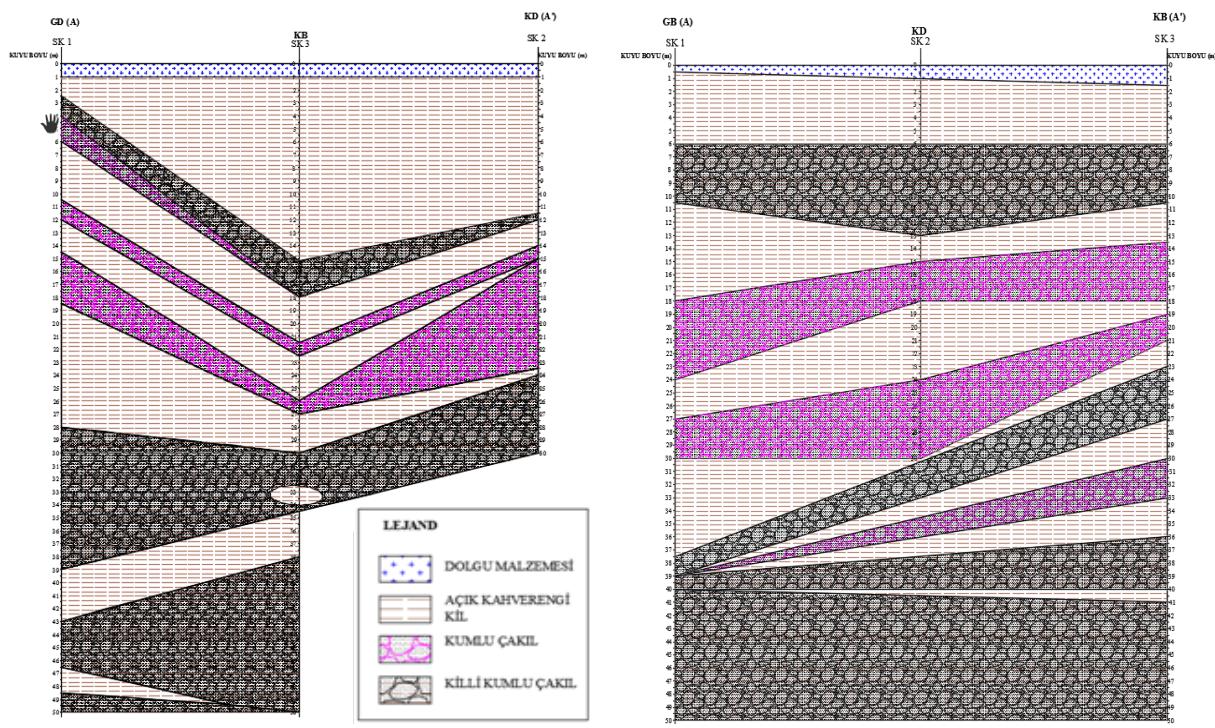
2. Materyal ve Metot

2.1. Proje Sahasına ait Bilgiler

İnceleme alanında inşa edilecek yaşam kompleksi için genel yerleşim planı Şekil 1'de verilmiştir. Toplam inşat alanı 2 farklı parselden oluşmakta olup, saha genelinde 30 ila 50 m derinliklerde değişen 20 adet sondaj çalışması planlanmıştır. Bu sondaj çalışmaları için her iki parselden seçilen 3'er sondaj logundan elde edilen zemin profiline ait temsili jeolojik kesitler Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 1. Genel Yerleşim Planı



Şekil 2. Genel Yerleşim Planı

Sahaya ait zemin profili incelendiğinde temel taban kotu altında (-3.90 m) ağırlıklı olarak siltli kum, kıl, kumlu çakıl ve killi kumlu çakıl birimleri yer almaktadır. İki farklı parselde geleneksel zemin mekaniği deneyleri yapılarak, zeminin endeks ve mühendislik özellikleri yanında oturma potansiyelinin tayini için konsolidasyon deneyleri yapılmıştır. Yapılan değerlendirmelere göre zemin emniyet gerilmesi değerleri birinci ve ikinci parseller için sırası ile 210 ve 200 kPa değerlerinde elde edilmiştir. Sahada inşa edilecek yapılardan aktarılan maksimum taban gerilmesi değeri, statik analizlerden 383 kPa olarak belirlenmiştir. Yapı yüklerinden dolayı zemine aktarılacak uniform basınç değerleri, zemin emniyet gerilmesi değerini aşmakta, oturma analizi sonuçlarına göre ise her iki parselde de 30 cm'nin üzerinde konsolidasyon oturması olması beklenmektedir. Ortaya çıkan bu elverişsiz koşullar nedeni ile

ilgili proje sahasında zemin iyileştirme çalışmasının yapılması gerekliliği doğmuştur. Bu amaçla, temel zemininin mühendislik özelliklerinin iyileştirilmesi amacıyla uygulama kolaylığı, ekonomikliği ve imalatların hızlılığı vb. avantajları nedeni ile Jet Grout ile iyileştirme yapılması tercih edilmiştir.

2.1.1. Jet Grout Yöntemi ile İyileştirme

Sahaya ait zemin profilinin değişkenlik arz etmesi, zemin parametreleri ve tabaka kalınlıklarının değişkenliği, taşıma gücü ve oturma davranışını değerlendirmede ve Jet Grout kolon boyutlarının belirlenmesini karmaşıklaştıracığı gerekçesi ile sahada zemin idealizasyonuna gidilmiştir. Bu amaçla her iki parsel için de laboratuar çalışmaları ile elde edilen zemin parametreleri değerlendirilmiştir ve taşıma gücü ve oturma hesapları için Tablo 1'deki parametrelerin kullanılmasına karar verilmiştir.

Tablo 1. Idealize Zemin Profili için Parametreler

ZEMİN TABAKALARI	PARAMETRELER	1.PARSEL	2.PARSEL
1.TABAKA (Kil Zemin)	Tabaka Kalınlığı <i>Birim Hacim Ağırlık</i> <i>Kohezyon</i> <i>İçsel Sürtünme Açısı</i>	3.90-12.00 m 17.3 kN/m ³ 122 kN/m ² -	3.90-6.00 m 17.2 kN/m ³ 113 kN/m ² -
2.TABAKA (Killi Çakılı Kum Zemin)	Tabaka Kalınlığı <i>Birim Hacim Ağırlık</i> <i>Kohezyon</i> <i>İçsel Sürtünme Açısı</i>	12.00-16.00 m 18.0 kN/m ³ -	6.00-12.00 m 18.0 kN/m ³ 29°
3.TABAKA (Kil Zemin)	Tabaka Kalınlığı <i>Birim Hacim Ağırlık</i> <i>Kohezyon</i> <i>İçsel Sürtünme Açısı</i>	16.00-18.90 m 17.2 kN/m ³ 122 kN/m ² -	12.00-15.00 m 17.2 kN/m ³ 105 kN/m ² -
4.TABAKA (Killi Çakılı Kum Zemin)	Tabaka Kalınlığı <i>Birim Hacim Ağırlık</i> <i>Kohezyon</i> <i>İçsel Sürtünme Açısı</i>	18.90-24.00 m 18.0 kN/m ³ -	15.00-18.90 m 18.0 kN/m ³ -
5.TABAKA (Kil Zemin)	Tabaka Kalınlığı <i>Birim Hacim Ağırlık</i> <i>Kohezyon</i> <i>İçsel Sürtünme Açısı</i>	-	18.90-24.00 m 18.9 kN/m ³ 112.5 kN/m ² -

Yapıdan zemine aktarılacak gerilme ve oturma problemlerinin önüne geçebilmek için Ø60cm çapında ve 15m boyunda jet-grout kolonları planlanarak, hesaplamalar yapılmıştır. Jet Grout kolonunun taşıma gücü, kolonun entegre olduğu zemine göre çevre ve uç sürtünmesi dikkate alınarak -3.9 m ile 18.9 m arasındaki derinlik için hesaplanmıştır. Güvenlik sayısının 3.5 alındığı çalışmada, birinci parselde Jet Grout kolonunun 67.17 ton, ikinci parsel için ise 56.5 ton servis yükü sağlayabileceği hesaplanmıştır. Her iki parseldeki zemin profili göz önüne alındığında, temel zemininde önemli bir değişiklik olmaması nedeniyle ve güvenli tarafta kalmak için, düşük taşıma kapasitesi (56.5 t) tüm saha için kabul edilmiş ve ıslah sonrası müsaade edilebilir taşıma gücü değerinin hesabında kullanılmıştır.

Jet Grout yöntemi ile iyileştirme çalışmaları için saha profili ve zemin parametreleri göz önüne alındığında Ø60 cm çapında (-3.90 ile -18.90 m arasında) 15 m derinliğinde toplam 3351 adet kolon imalatının yapılmasına karar verilmiştir. Saha genelinde jet grout kolonları 1.60x1.60 m karelaj ile uygulanmıştır. Uygulanan kolonlar Jet-1 yöntemi ile imal edilmiş olup, 1/1 Su-Çimento oranında ve 400-450 bar aralığında basınç uygulanarak oluşturulmuştur.

Zemin iyileştirme çalışması sonrası her iki parsel için ıslah sonrası öngörülen emniyetli gerilme değerleri;

Birinci parsel için Islah sonrası zemin emniyet gerilmesi hesabı

$$\sigma_{em} = 21.0 \text{ ton/m}^2 \text{ (Islah öncesi zemin emniyet gerilmesi)}$$

Jet kolon aralıkları 1.60x1.60 m karelaj seçim yapılarak hesap yapılırsa,

$$\text{Jet-kolon etki alanı } (1.60 \times 1.60 \text{ m})(A_{kare}) = 2.56 \text{ m}^2$$

$$\text{Jet-kolon kesit alanı, } A_p = \pi D^2 / 4 = 3.14 \times 0.60^2 / 4 \cong 0.283 \text{ m}^2$$

$$\text{Net etki alanı } (A_{pnet}) = 2.56 - 0.283 = 2.277 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{em,islah} = (21 * 2.277 + 56.5) / 2.56 \cong \mathbf{40.75} \text{ t/m}^2 \text{ hesaplanmıştır.}$$

İkinci parsel için Islah sonrası zemin emniyet gerilmesi hesabı

$$\sigma_{em} = 20.0 \text{ ton/m}^2 \text{ (Islah öncesi zemin emniyet gerilmesi)}$$

Jet kolon aralıkları 1.60x1.60m karelaj seçim yapılarak hesap yapılırsa,

$$\text{Jet-kolon etki alanı } (1.60 \times 1.60 \text{ m})(A_{kare}) = 2.56 \text{ m}^2$$

$$\text{Jet-kolon kesit alanı, } A_p = \pi D^2 / 4 = 3.14 \times 0.60^2 / 4 \cong 0.283 \text{ m}^2$$

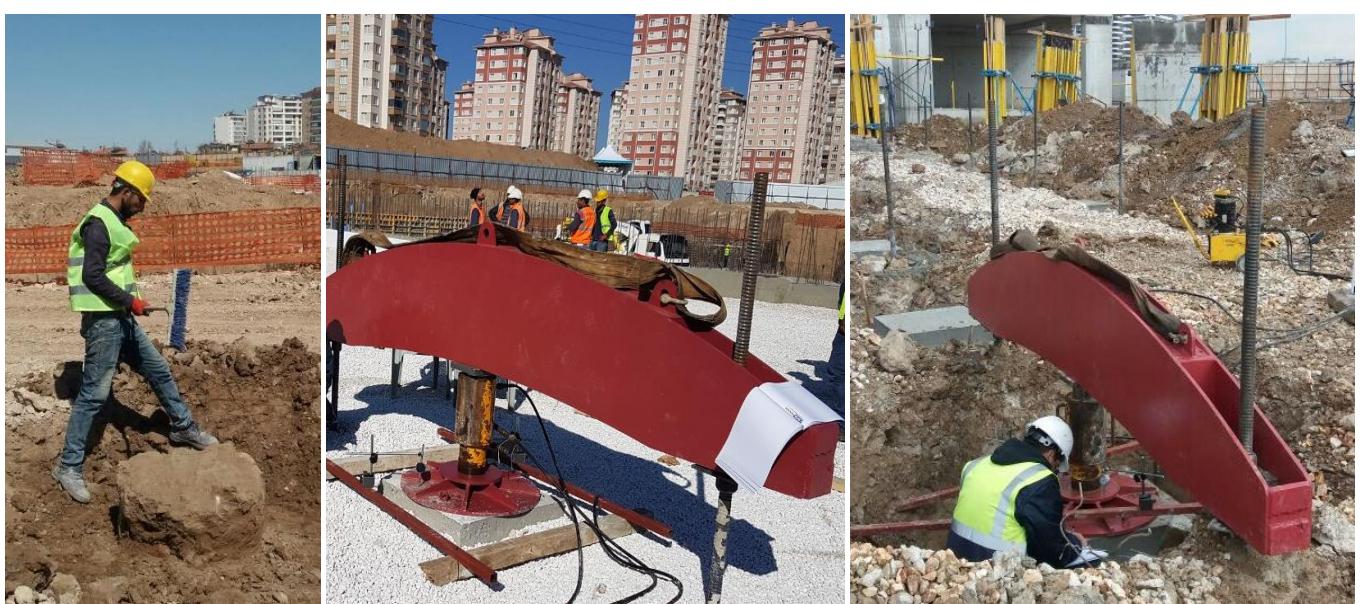
$$\text{Net etki alanı } (A_{pnet}) = 2.56 - 0.283 = 2.277 \text{ m}^2$$

$$\sigma_{em,islah} = (20 * 2.277 + 56.5) / 2.56 \cong \mathbf{40.0} \text{ t/m}^2 \text{ hesaplanmıştır.}$$

olarak elde edilmiştir. Her iki parsel için hesaplamalar göz önüne alındığında ıslah sonrası zeminin öngörülen emniyetli gerilme değeri 40.0 ton/m² olarak belirlenmiştir.

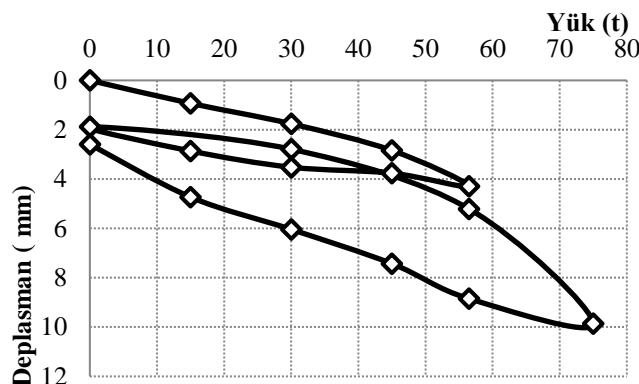
2.1.2. Arazi Yükleme Testleri

İmal edilen toplam 3351 adet jet grout kolonu için her 150 kolonda birinde yükleme testi yapılması öngörlülmüş ve sahada toplamda 25 farklı kolon için yükleme testleri yapılmıştır. Hazırlık aşamalarında yükleme süreci boyunca sahada gerçekleştirilen süreçlere ait görseller Şekil 3'te verilmiştir. 4 m boyundaki yükleme kırığı, test edilecek jet grout kolonunun merkezi üzerine yere paralel şekilde yerleştirilmiş ve içerisinde 51 mm'lik dwydag ankray çubukları yerleştirilerek, jet grout kolonları ile aynı eksene getirilmiş, dwydag çubukları uygun şekilde kırıç bağlanmıştır. Deney kırığı ile test kolonu arasında yeterli yükseklikte kriko yerleştirilerek kırış ile başlık arasında tam temas sağlanmıştır. Yükleme esnasında başlık kırışının iki farklı noktasında oluşan deplasmanların belirlenmesi amacıyla 50 mm kapasiteli 0.01mm hassasiyetli iki deplasman saatı kullanılmış olup, hesaplar deney sırasında elde edilen deplasmanların ortalaması alınarak yapılmıştır. Eksenel yükü uygulayabilmek için 100 t kapasiteli hidrolik pompa kullanılmıştır. Yükleme testleri, ASTM D 3689 – 90 nolu standarda uygun olarak gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3. a) Kolon Başlarının Açılması, b) Jet-Grout Yükleme Düzeneği, c) Jet-Grout Kolonu Yüklenmesi Ve Veri Alınması

Deney ekipmanları kontrol edildikten sonra ASTM standartlarına uygun şekilde hazırllanmış deney süreleri belirlenmiş ve yükleme işlemine başlanmıştır. Deneylerde, ilk çevrimde proje yükü olan 56.5 t ve ikinci çevrimde ise proje yükünün %130'u olan 75 tona kadar yükleme yapılmıştır. Yükleme, proje yükünün kademeleri şeklinde uygulanmış olup, maksimum yüke dört kademede ulaşılmıştır. Yükleme esnasında her yük kademesinde oturma hızının 0.25 mm/saat'in altına düşmesi beklenmiştir, aksi durumda maksimum bekleme süresi 2 saat olarak belirlenmiştir. Tipik bir yükleme/bosaltma çevrimine ait Jet Grout kolon yükleme test sonucu Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 4. Tipik bir Jet Grout Kolon için Yükleme Deney Sonucu

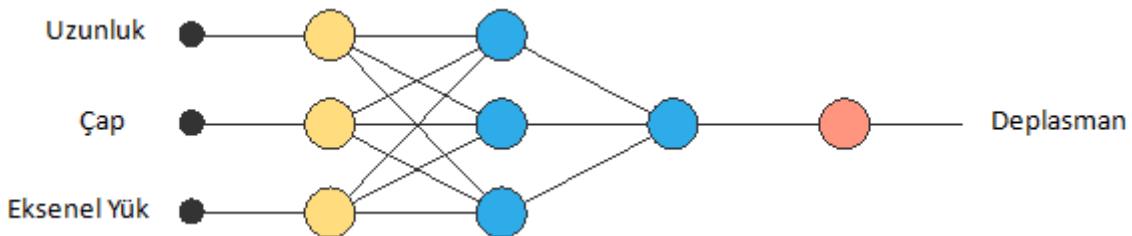
2.2. Yapay Sinir Ağı Metodolojisi

Yerinde gerçekleştirilen yükleme testlerine göre elde edilen sonuçlar üzerinde, ilgili test sahası parametreleri ve kazık geometrisi için deplasman tahminleri yapılmıştır. Literatürde Jet Grout yöntemi için kolon çapının, reolojik özelliklerinin, serbest basınç dayanımının, imalat sırasında oluşacak yanal deplasmanları vb. parametrelerin önceden öngörülmesini sağlayacak gerek istatistiksel gerekse yapay sinir ağları tabanlı çalışmalarla sıkılıkla karşılaşılmaktadır (Long Shen ve ark. 2013, Güllü H. 2017, Akan ve ark. 2015, Shen ve ark. 2017 vb.). Bu amaçla, çalışma kapsamında Quasi-Newton algoritması kullanılmıştır. Bu algoritma ikincil türevlerin hesaplanması gerektirmemesi nedeniyle yaygın bir şekilde tercih edilmektedir. Eğitme algoritması Tablo 2'de sunulmuştur. Yapay sinir ağı değerlendirmesi ters Hesian yaklaşık yöntemini ile analiz edilmiştir.

Tablo 2. Yapay Sinir Ağı Algoritması

	TANIM	DEĞER
Ters Hessian yaklaşık yöntemi	Uygun öğrenme oranını elde etmek için kullanılır.	Broyden–Fletcher–Goldfarb–Shanno algoritması
Öğrenme oranı yöntemi	Yarı Newton öğrenme yönü adımını hesaplamak için kullanılan metod.	Bren Metodu
Kayıp toleransı	Öğrenim oranı için en büyük iç uzunluk.	0.001
Artış normu için en küçük parametre	Artış vektörünün duracağı adım için normal parametre	1e-09
Kayıp amaç	Kayıp için amaç değeri	1e-12
Degrad norm hedefi	Nesnenin işlevi normuna göre hareket edin gradyan.	0.001
En büyük hata artma seçimi	Seçim hatasının arttığı maksimum dönem sayısı	100
Maksimum iterasyon sayısı	Eğitimi gerçekleştirmek için maksimum iterasyon sayısı	1000
Maksimum zaman	En fazla öğrenme zamanı	3600
Parametrelerim normal geçmişinin yedeklenmesi	Her bir iterasyonun normal parametreleriyle grafik çizilmesi	Yanlış
Hata geçmişinin yedeklenmesi	Her bir iterasyonun kaybı için grafik çizilmesi	Doğru
Hata seçim geçmişinin yedeklenmesi	Her bir iterasyonun seçim hatası için grafik çizilmesi	Doğru
Gradyan normal geçmişinin yedeklenmesi	Her bir iterasyonun normal gradyanı için grafik çizilmesi	Yanlış

Deplasman değerlerinin değerlendirilmesinde jet grout kolonların çapları, uzunlukları ve yükleme değerleri girdi verileri olarak kullanılmıştır. Yapay Sinir Ağ modeli Şekil 5'te gösterildiği gibidir. Kök, kare yöntemi hata metodu olarak kullanılır. Sinir ağından elde edilen çıktılar ile veri kümesindeki hedefler arasındaki ortalama kare hatasının karekökünü alır. Nöral parametre normu, normalleştirme yöntemi olarak, parametrelerin değerini azaltarak sınır ağıının karmaşıklığını kontrol etmek için uygulanmıştır. Nöral parametreler norm ağırlığı 0.001 olarak alınmıştır.



Şekil 5. Yapay Sinir Ağ Modeli

Parametrelerin normu, öngörücü modelin karmaşıklığı hakkında bir ipucu vermektedir. Parametreler normu küçüldükçe, model pürüzsz olmaktadır. Öte yandan, parametre normunun artması, modeli kararsız hale getirebilmektedir. Ayrıca, normun parametre sayısına bağlı olduğu da not edilebilir. Parametre normu uygulanan sistemde 6.56'dır.

3. Araştırma Sonuçları ve Tartışma

3.1. Saha Çalışması Sonuçları

Proje sahası kapsamında imal edilmiş ve kontrolör firma tarafından rastgele seçilen 25 farklı Jet-Grout kolonu üzerinde yükleme testleri gerçekleştirilmiştir. Deney kolonları Ø60 cm çapında ve L=15m boyunda imal edilmiştir. Proje yükleri tüm kolonlar için 56.5ton olarak projelendirilmiş olup yükleme deneylerinde proje yükünün üzerine çıkılarak 75ton yükleme yapılmıştır. Deneylerde elde edilen maksimum oturma değerleri ile kalıcı oturma değerleri iki farklı parsel için sırasıyla Tablo 3 ve 4'te sunulmuştur.

Tablo 3. 1. Parsel Bölgesi Jet-Grout Yükleme Deney Sonuçları

Sıra No	Yükleme Kademesi	Toplam oturma (mm)	Kalıcı oturma (mm)
1	56.5 ton (Proje yükü)	3.98	1.59
	75ton (proje yükü %130)	7.95	2.80
2	56.5 ton (Proje yükü)	2.18	0.81
	75ton (proje yükü %130)	3.19	1.81
3	56.5 ton (Proje yükü)	3.49	1.37
	75ton (proje yükü %130)	5.30	2.03
4	56.5 ton (Proje yükü)	3.31	1.11
	75ton (proje yükü %130)	4.49	1.87
5	56.5 ton (Proje yükü)	2.57	0.89
	75ton (proje yükü %130)	3.86	1.34
6	56.5 ton (Proje yükü)	2.41	0.73
	75ton (proje yükü %130)	3.96	1.13
7	56.5 ton (Proje yükü)	2.76	1.17
	75ton (proje yükü %130)	4.96	1.89
8	56.5 ton (Proje yükü)	2.98	1.17
	75ton (proje yükü %130)	5.17	2.11
9	56.5 ton (Proje yükü)	2.49	1.17
	75ton (proje yükü %130)	4.36	1.86
10	56.5 ton (Proje yükü)	2.35	0.93
	75ton (proje yükü %130)	3.94	1.74
11	56.5 ton (Proje yükü)	4.29	1.88
	75ton (proje yükü %130)	9.86	2.59
12	56.5 ton (Proje yükü)	3.17	1.11
	75ton (proje yükü %130)	6.01	2.01

Tablo4. 2.Parsel Bölgesi Jet-grout yükleme deney sonuçları

Sıra No	Yükleme Kademesi	Toplam oturma (mm)	Kalıcı oturma (mm)
1	56.5 ton (Proje yükü)	2.91	1.35
	75ton (proje yükü %130)	3.70	1.90
2	56.5 ton (Proje yükü)	2.76	1.50
	75ton (proje yükü %130)	3.42	2.10
3	56.5 ton (Proje yükü)	2.96	1.34
	75ton (proje yükü %130)	3.55	1.83
4	56.5 ton (Proje yükü)	2.90	1.17
	75ton (proje yükü %130)	3.81	1.90
5	56.5 ton (Proje yükü)	2.85	1.34
	75ton (proje yükü %130)	3.71	1.90
6	56.5 ton (Proje yükü)	1.43	0.61
	75ton (proje yükü %130)	1.67	1.11
7	56.5 ton (Proje yükü)	2.94	1.40
	75ton (proje yükü %130)	3.87	1.93
8	56.5 ton (Proje yükü)	3.91	2.02
	75ton (proje yükü %130)	6.78	2.73
9	56.5 ton (Proje yükü)	2.65	1.12
	75ton (proje yükü %130)	3.25	1.89
10	56.5 ton (Proje yükü)	2.51	1.09
	75ton (proje yükü %130)	3.35	1.51
11	56.5 ton (Proje yükü)	2.73	1.34
	75ton (proje yükü %130)	3.89	1.87
12	56.5 ton (Proje yükü)	2.85	0.89
	75ton (proje yükü %130)	3.49	1.49
13	56.5 ton (Proje yükü)	3.17	1.14
	75ton (proje yükü %130)	3.86	1.86

Tablo 3 ve 4'e göre, proje yükü altında elde edilen kalıcı oturma değerleri, izin verilebilir deplasman sınırı olan 2.5 cm limit değerinin altında olduğu görülmektedir. Bu durum, Jet Grout ile iyileştirme çalışmasının hem zemin taşıma gücünü hem de oturma potansiyelini kontrol altına almadır tasarım kriterlerini sağladığı göstermektedir.

3.2. Yapay Sinir Ağı Sonuçları

Quasi-Newton yöntemiyle eğitim sonuçları Tablo 5'te verilmiştir. Tabloda verilen değerler sınır koşullarını sağlamaktadır.

Tablo 5. Quasi-Newton Eğitim Sonuçları

	Değer
Parametrelerin son normal değeri	6.56
Sonuç öğrenme hatası	1
Öğrenme hatası sonucu	1
Gradyan normal sonucu	0.001
Devir sayısı	1000
Durma kriteri	Gradyan normal amaç

Sinir ağı tarafından temsil edilen matematiksel ifade aşağıda verilmiştir. Çıkış sapmasını üretmek için girişler, kazık uzunluğu, kazık çapı ve uygulanan eksenel yük olarak alınmıştır. Fonksiyon regresyon problemleri için, bilgi ölçeklendirme katmanı, algılayıcı katmanlar ve ölçeklendirme katmanı vasıtasyyla ileri beslemeli bir şekilde yayılmaktadır.

```

scaled_length = (length-15)/0;
scaled_diameter = (diameter-60)/0;
scaled_load = (load-32.0294)/21.8698;
y_1_1 = tanh (0.207886+ (scaled_length*-1.42895)+  

(scaled_diameter*0.757933)+ (scaled_load*0.911499));
11
y_1_2 = tanh (1.7915+ (scaled_length*1.11084)+  

(scaled_diameter*-1.87573)+ (scaled_load*1.47461));
y_1_3 = tanh (-1.76489+ (scaled_length*0.578001)+  

(scaled_diameter*0.826171)+ (scaled_load*-1.6582));
y_2_1 = tanh (-1.16781+ (y_1_1*-0.691618)+ (y_1_2*-1.62784)+  

(y_1_3*2.13553));
y_2_2 = tanh (-1.07893+ (y_1_1*0.438773)+ (y_1_2*-0.789969)+  

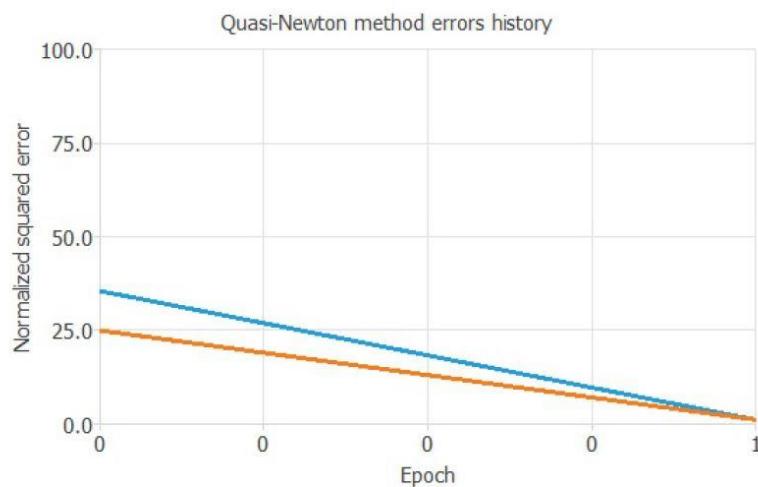
(y_1_3*1.64873));
y_2_3 = tanh (0.105568+ (y_1_1*-0.510033)+ (y_1_2*0.758201)+  

(y_1_3*-1.10561));
scaled_deflection = (0.110745+ (y_2_1*1.88048)+ (y_2_2*-1.  

24374)+ (y_2_3*1.2728));
deflection = (0.5*(scaled_deflection+1.0)*(986-0)+0);
12

```

Şekil 6'da verilen grafik, her bir yinelemedeki eğitim ve seçim hatalarını göstermektedir. Mavi çizgi egzersiz hatasını ve turuncu çizgi seçim hatasını temsil eder. Eğitim hatasının başlangıç değeri 35.4621 ve 1 dönemden sonraki son değer 1'dir. Seçim hatasının başlangıç değeri 24.9017 ve 1 dönemden sonraki son değer 1.00239'dur. Eğitim ve testler sonucu tüm hata oranları %1'e indirgenmiştir.



Şekil 6. Quasi-Newton Hata Geçmişi

4. Sonuç

Bu çalışmada, Jet Grout yöntemi ile zemin iyileştirme çalışması bir vaka analizi olarak sunulmuş ve geliştirilen yapay sinir sistemi yardımıyla, çalışılan bölge özelinde deplasman tahmini yapılmıştır. Gerçekleştirilen analiz ve sistem değerlendirilmeleri yapıldığında aşağıda sıralanan sonuçlar çıkarılabilir:

- Saha temel zeminin taşıma gücü ve oturma açısından yetersiz olması nedeni ile zemin iyileştirme çalışması olarak Jet-Grout yöntemi ile güçlendirme çalışması yapılmasına karar verilmiş ve sahada 3351 adet 60 cm çapında 15 m boyunda Jet kolon imalatı yapılmıştır.
- Kalite kontrol testleri kapsamında rastgele seçilen 25 farklı test kolonu üzerinde, yükleme testleri gerçekleştirilmiş ve imalatların servis yükü altında efektif bir şekilde çalıştığı görülmüştür.
- Yapay sinir ağı sistemi, uygulanan arazi özelinde, jet grout kolon çapı, uzunluğu ve uygulanan yük ile güçlü bir korelasyon göstermektedir.
- Oluşturulan yapay sinir sistemi, yer yer çakıl bantları içermekle birlikte kohezyonlu zemin yoğunluğunun fazla olduğu çalışmaya konu olan saha özelinde uygun ve verimli bir matematiksel denklem vermektedir. Çalışma çıktıları diğer algoritmalar ile de incelenip, girdi parametrelerinin bu tip zeminlerdeki deplasman üzerindeki etkilerinin incelenmesinin yolunu açmaktadır.
- Uygulaması yapılan sistemin diğer zeminler üzerindeki çıktıları, gelecek çalışmalar kapsamında değerlendirilecektir.

Kaynakça

- Akan R., Keskin S. N., & Uzundurukan S. (2015). Multiple Regression model for the prediction of unconfined compressive strength of jet grout columns. *Procedia Earth and Planetary Science*, Volume 15, Pages 299-303.
- Altun F., Kişi Ö., & Aydin K. (2008). Predicting the compressive strength of steel fiber added lightweight concrete using neural network. *Comput Mater Sci*. 42(2):259–65.
- Bayesteh, H., & Sabermahani, M. (2020). Field study on performance of jet grouting in low water content clay. *Engineering Geology*, 105314 Volume 264.
- Croce, P. Flora, A. & Modoni, G., 2014. Jet Grouting Technology, Design and Control. CRC Press Taylor & Francis Group, ISBN: 13: 978-1-4822-4718-3.
- Durgunoğlu H. T., Chinchelli M., Emrem C., & Hurley T. (2004). Soil improvement with jet-grout columns: a case study from the 1999 Kocaeli Earthquake. *Fifth International Conference on Case Histories In Geotechnical Engineering*.
- Düzceer, R., & Gökalp, A. (2003). Construction and quality control of jet grouting applications in Turkey. *Third International Conference on Grouting and Ground Treatment*.
- Güllü H. (2017). A novel approach to prediction of rheological characteristics of jet grout cement mixtures via genetic expression programming. *Neural Computing and Applications*, Volume 28, 407–420.
- James C. Ni, & Wen-Chieh C. (2014). Quality control of double fluid jet grouting below groundwater table: Case history. *Soils and Foundations* Volume 54, Issue 6, December 2014, Pages 1039-1053.
- Lenard M. J., Alam P., & Madey G. R. (1995). The Application of Neural Networks and a qualitative response model to the auditor's going concern uncertainty decision. *Decis Sci*. 26(2):209–27.
- Long S. S., Feng W. Z., Yang J. & Eu Ho C. (2013). Generalized approach for prediction of jet grout column diameter. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 139, Issue 12.
- Paliwal M., & Kumar U. A. (2009). Neural networks and statistical techniques: A review of applications. *Expert Syst Appl [Internet]*. 36(1):2–17.
- Ripley B. D. (1994). Neural Networks and related methods for classification. *R Stat Soc*. 56(3):409–56.
- Shen, S L, Wang, Z F, & Cheng, W C (2017). Estimation of lateral displacement induced by jet grouting in clayey soils. *Géotechnique*, 67(7), 621–630.
- Smith A., Mason A. K. (1997). Cost estimation predictive modeling: Regression versus neural network. *Eng Econ*. 42(2):137–61.
- Wang, Z. F., Shen, S. L., Ho, C. E., & Kim, Y. H. (2013). Investigation of field-installation effects of horizontal twin-jet grouting in Shanghai soft soil deposits. *Canadian Geotechnical Journal*, 50(3), 288–297.
- Wong R. K. .N., Weng Y. F., Leong G. K. & Cheng S. H. (2020). A case study of effectiveness of large diameter jet grout for soil improvement works in soft marine clay. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 62. Springer, Singapore.
- Vu M. N. & Le Q. H. (2020). Large soil-cement column applications in Vietnam. *Geotechnics for Sustainable Infrastructure Development. Lecture Notes in Civil Engineering*, vol 62. Springer, Singapore