Zemin Mekaniği ve Geoteknik Mühendisliği
20. Ulusal Konferansı

15-16 Ekim 2026
Sakarya Üniversitesi

HAVAİ ENERJİ İLETİM HATLARININ GEOTEKNİK SAHA KARAKTERİZASYONU – BİR VAKA ANALİZİ

GEOTECHNICAL SITE CHARACTERIZATION OF OVERHEAD ENERGY TRANSMISSION LINES (OHTL) – A CASE STUDY

Tahir YILDIZ[1], Dilge VARLI[2], Ersin DAĞ[3]

ABSTRACT

Geoteknik saha karakterizasyonu, proje çalışma alanının kapsamına göre parsel veya koridor bazlı yürütülmektedir. Parsel bazlı etütlerde kısıtlı alan sayesinde sorunların tespiti ve önlemlerin belirlenmesi daha net bir çerçevede ilerlerken; demiryolu, karayolu ve tünel gibi koridor tipi projelerde değişken litolojik, hidrolojik, topografik ve sismik koşullar idealize zemin profili oluşturmayı zorlaştırmaktadır. Bu tür projelerde güzergâh, jeolojik yapı ve sanat yapılarının konumuna göre "Lot"lara bölünerek incelenir. Ancak elektrik iletim hatlarında (EİH), kulelerin 350-500 metre aralıklarla yüzlerce kilometre boyunca uzanması, geleneksel koridor bazlı idealleştirmelerin yerel riskleri ihmal etmesine yol açabilmektedir. Geleneksel yöntemlerle yapılan idealizasyon, bölgesel farklılıkların ve geoteknik risklerin gözden kaçmasına sebep olabilmektedir. Bu çalışma kapsamında, bir elektrik iletim hattı projesine ait saha ve laboratuvar verileri ışığında güzergâhın mühendislik davranışı ve bölgesel riskler analiz edilmiştir. Çalışmada, geoteknik ve jeofizik hesaplamalara Güvenilirlik Tabanlı Tasarım (Reliability-Based Design) yaklaşımlarının entegrasyonu açıklanmış; elde edilen veriler Coğrafi Bilgi Sistemi (CBS) tabanlı araçlarla görselleştirilmiştir. Böylece, EİH projeleri için daha hassas, yapı ve bölge odaklı bir tasarım modelinin adaptasyonuna dair somut bir örnek sunulmuştur.
Keywords: *geoteknik,tasarım,enerji iletim,cbs*

ÖZET

Geotechnical site characterization is conducted on either a polygon or corridor basis, depending on the project scope. In polygon-based surveys, the limited area allows for relatively accurate identification of problems and mitigation strategies. However, in corridor-type projects such as railways, highways, and tunnels, variable lithological, hydrological, topographical, and seismic conditions create challenges for determing idealized soil profiles. Such projects are typically analyzed by dividing the route into "Lots" based on geological settling and the locations of engineering structures. Nevertheless, in overhead electricity transmission lines (OHTL), where towers are spaced every 350-500 meters across hundreds of kilometers, traditional corridor-based approach may lead to the missing of risky regions per geohazard potential. Within the scope of this study, the engineering behavior and regional anomalies of a route were analyzed in manner of field and laboratory data from a OHTL project. The study explains the integration of Reliability-Based Design (RBD) approaches into geotechnical and geophysical interpretations, while outputs are visualized using Geographic Information System (GIS) based tools. Consequently, a remerkable example of adapting a more precise, structure- and region-oriented design principle for OTL projects is presented
Keywords: *geotechnical,design,energy transmission, gis*

[1] Kıdemli Geoteknik Mühendisi, TP-OTC, tahir.yildiz88@gmail.com (Sorumlu Yazar)
[2] Dr., Jeoloji Mühendisi, Assystem Türkiye , dvarli@assystem.com
[3] Kıdemli Yük. Jeofizik Mühendisi, Assystem Türkiye , edag@assystem.com

1. GİRİŞ

Geoteknik saha karakterizasyonu çalışmaları, poligon bazlı veya güzergâh bazlı yürütülür. Parsel bazlı incelemelerde, potansiyel risklerin sınıflandırılması nispeten kolay bir şekilde yürütülür ve buna bağlı olarak, sahaya özgü iyileştirme tedbirleri tanımlanabilir.

Güzergâh bazlı karakterizasyon; genellikle karayolları, demiryolları ve enerji nakil hatları (OHTL) gibi ulaşım ve altyapı projelerinde uygulanır. Güzergâh bazlı incelemelerde, saha koşullarının değişkenliği, idealize edilmiş bir zemin senaryosu oluşturmayı zorlaştıran önemli bir faktördür. Poligon bazlı karakterizasyonlar sınırlı sayıda idealize zemin profili kullanılarak gerçekleştirilebilirken; güzergâh karakterizasyonları litolojik değişkenlikler, sismisite ve yeraltı suyu varlığı gibi çok sayıda durumun dikkate alınmasını gerektirir. Bu nedenle, güzergâh bazlı incelemeler, jeolojik koşulları temel çerçeve olarak önceliklendiren bir ilkeye dayanarak farklı bölümlere (lotlara) ayrılır (Heim vd., 2011). Jeolojik arka plana ek olarak, koridor boyunca yer alan yapıların konumları da alt bölgelerin belirlenmesinde göz önünde bulundurulur. Menfez, viyadük ve tünel gibi yapıların konumlarına göre saha araştırmaları planlanır.

Elektrik iletim hatlarının saha karakterizasyonunda, bahsedilen bu durumlar doğası gereği çok daha karmaşıktır. Poligon bazlı altyapı projelerinden farklı olarak, saha araştırmalarını planlamak veya raporlama çalışmalarını yalnızca güzergâh boyunca yer alan münferit yapıların konumlarına odaklamak mümkün değildir. Bu durum temel olarak, koridor boyunca inşa edilen her bir direğin altındaki araştırma noktasında geoteknik ve jeofizik değerlendirmelerin yapılmasının zorunlu olmasından kaynaklanmaktadır. İletim direklerinin hat kapasitesine bağlı olarak genellikle yaklaşık 350–500 metre aralıklarla yerleştirildiği ve iletim koridorlarının yüzlerce kilometre boyunca uzanabildiği dikkate alındığında; bu süreç binlerce metre sondaj ve on binlerce laboratuvar testi sonucuyla tamamlanır. Geleneksel araştırma yaklaşımları kullanılarak türetilen idealize zemin profilleri, basitleştirilmiş litolojik kabuller ve genelleştirilmiş mühendislik yorumlarıyla birleştiğinde, lokal anomalilerin tespiti zorlaşabilir. Dolayısıyla, araştırma koridoru boyunca kritik bölgeler değerlendirme dışında kalabilir. Bu açıdan, güvenilirlik bazlı tasarım yaklaşımları karakterizasyon çalışmaları için doğru ve zaman kazandıran çözümler sağlayabilir (Poon vd., 2000).

Bu çalışma kapsamında, Özbekistan'da yapılacak bir enerji nakil hattı için yürütülen saha karakterizasyon faaliyetleri, birbiriyle entegre geoteknik ve jeofizik araştırmalara odaklanılarak sunulmaktadır. Yeraltı koşullarının geoteknik ve jeofizik değerlendirmesi için benimsenen prosedürler, ilgili yorumlama metodolojileri ve mühendislik değerlendirmesini desteklemek amacıyla bir veri tabanının geliştirilmesi ayrıntılı olarak açıklanmaktadır. Yaklaşıma özel çerçeve tarif edildikten sonra; taşıma kapasitesi ve oturma problemine dayalı sahaya özgü geoteknik çözümler aktarılmaktadır. Ayrıca, saha karakterizasyon sonuçlarının görselleştirilmesi ve sunulması için mekânsal (geospatial) trend analizinin kullanımı tartışılmaktadır.

2. PROJE ÖZELLİKLERİ

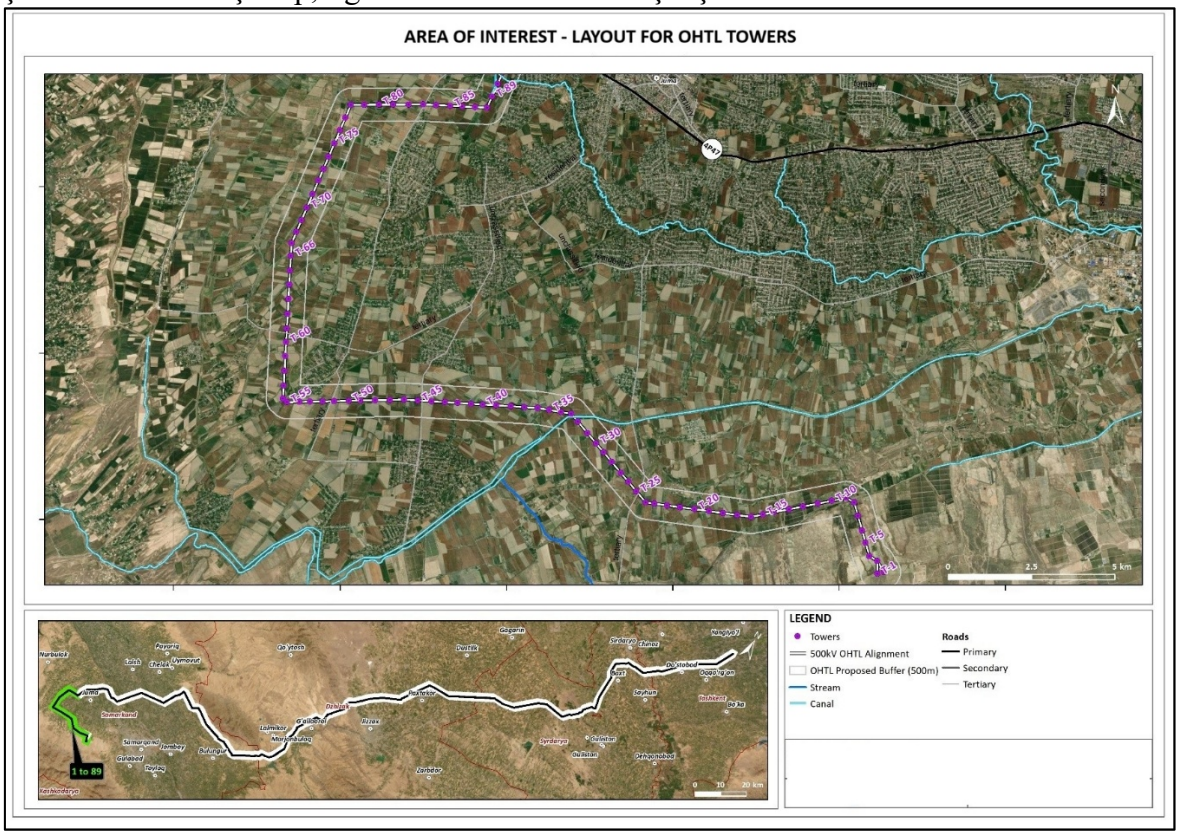
Proje kapsamı, yaklaşık 343 km uzunluğundaki 500 kV kapasiteli bir enerji nakil hattının (OHTL) geoteknik ve jeofizik karakterizasyonunu içermektedir. Saha incelemesi kapsamı; her bir direk için önerilen yaklaşık 900 adet sondaj kuyusu ve 8700 m sondaj derinliği ile 870 adet Düşey Elektrik Rezistivite (VES) çalışmasını barındırmaktadır. Ek olarak, zemin

tabakalarının mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini kapsayan laboratuvar testleri için numune toplanmıştır. Her bir sondaj kuyusu için uygulanan derinlik 10,0 m'dir. Güzergâhın uzunluğu dikkate alındığında, saha koşullarına bağlı değişken kriterler göz önünde bulundurulmalıdır. Farklı jeolojik birimler, nehir geçişleri, engebeli araziler, tarım arazileri, kalın alüvyon çökelleri, yüksek yeraltı suyu seviyesi, doymuş gevşek ve yumuşak zemin tabakalarının varlığı ile yüksek depremsellik temel risk unsurlarıdır. Bu nedenle; yetersiz taşıma kapasitesi, sıvılaşma, şev stabilitesi, susuzlaştırma (dewatering) ve iksa ihtiyacı, çökebilirlik (collapsibility), mostra varlığı ve kimyasal olarak agresif tabakalar koridor içindeki farklı bölgeleri etkileyen ana engeller olarak sınıflandırılabilir (Johnson, 2009).

Doğru bir yorumlama gerçekleştirebilmek amacıyla, enerji nakil hattı güzergâhı aşağıdaki hususlar dikkate alınarak münferit lotlara bölünmüştür;

- Jeolojik yapı,
- Jeorisk (Geohazard) potansiyeli,
- Jeomorfolojik yapı

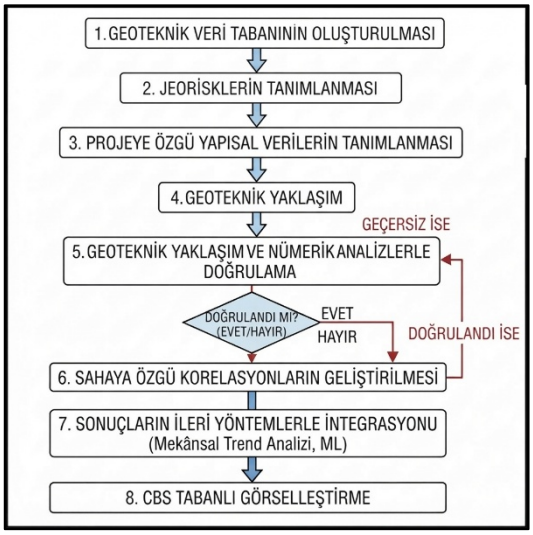
Bu bildiri kapsamında, söz konusu projenin 30 kilometrelik koridoru boyunca gerçekleştirilen geoteknik karakterizasyon çalışmaları özetlenecektir. Söz konusu koridor Şekil 1'de verilmiş olup, ilgili alanda 89 adet kule çalışma sahasına tabidir.



Şekil 1. Proje Sahası – İnceleme Alanı

3. DEĞERLENDİRME AKIŞ ŞEMASI

Hem arazi hem de laboratuvar incelemelerinden elde edilen tüm geoteknik kısıtları sistematik olarak değerlendirmek amacıyla, veri işleme sürecine yönelik projeye özgü bir çerçeve geliştirilmiştir. Kapsamlı iş akışı Şekil 2'de sunulmakta olup, her bir işlem adımının ayrıntılı tanımları bu bölümde daha da detaylandırılmaktadır.



Şekil 2. Değerlendirme Akış Şeması

4. DEĞERLENDİRME AŞAMALARI

4.1 Geoteknik Veri Setinin Oluşturulması

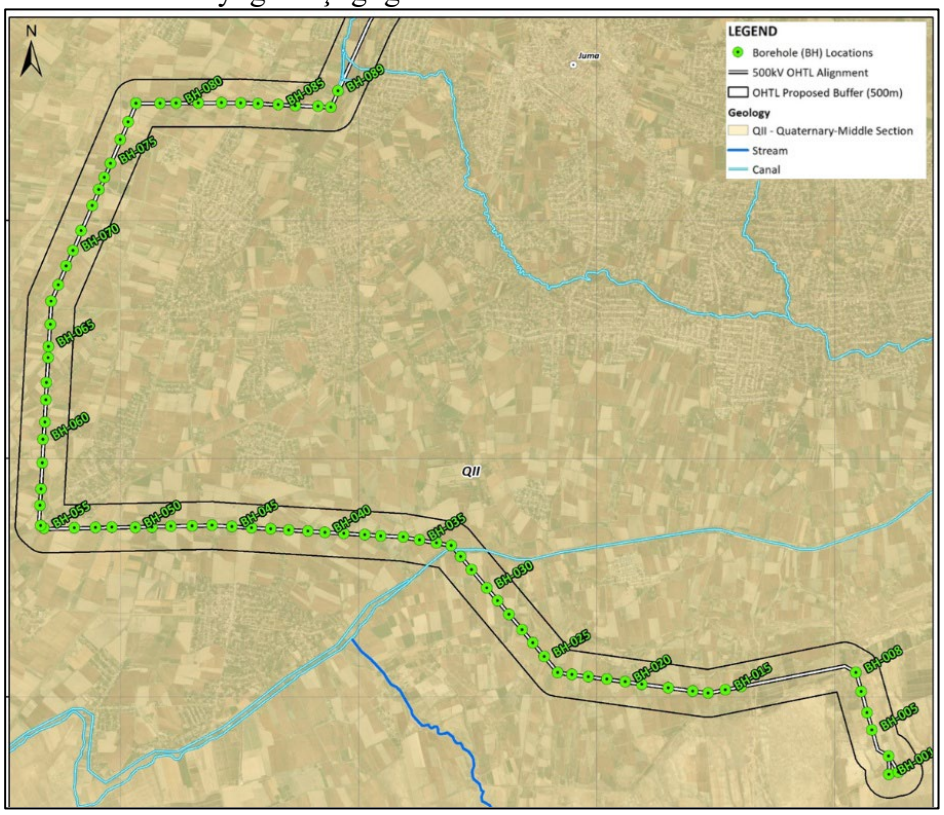
Heim vd. (2011), derinlik, zemin sınıfı ve düzeltilmiş Standart Penetrasyon Testi (SPT) darbe sayıları da dahil olmak üzere deney sonuçlarını indeks haline getiren bir hesap tablosu (spreadsheet) veri tabanının; lot sınırlarının belirlenmesinde ve anomalilerin tespit edilmesinde etkili bir araç olduğunu belirtmiştir. Veri tabanı oluşturulduktan sonra, jeolojik olarak homojen bölgeler içindeki sondaj kuyuları gruplandırılabilir. Ayrıca, sahaya özgü geoteknik tasarım parametrelerini belirlemek amacıyla laboratuvar testi sonuçları SPT aralıklarıyla entegre edilebilir. Bu parametreler; fiziksel indeks özelliklerini (su içeriği (WC), Atterberg limitleri (LL, PL, IP), dane boyutu dağılımı), zemin parametrelerini (sürtünme açısı Ø', kohezyon c'), birim hacim ağırlığını (γ), ortalama standart penetrasyon testi darbe sayısını (Ort. SPT-N), yeraltı su seviyesi derinliğini (GWT), en yüksek yer ivmesini (PGA) ve sismik bölge sınıflandırmasını kapsamaktadır.

Bu bağlamda yürütülen geoteknik araştırma çalışmalarına ait özet sonuçlar bu başlık altında maddelenecek ve tablo formunda sunulacaktır.

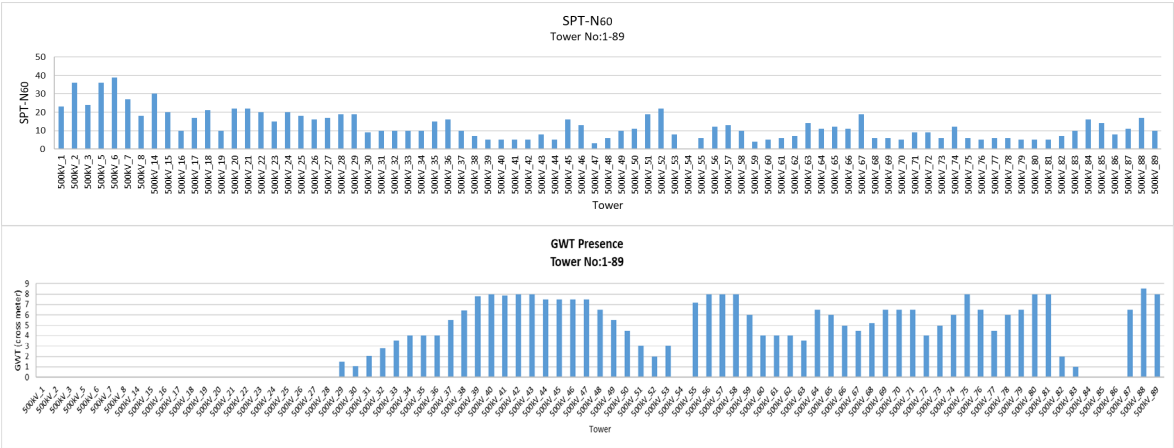
- Araştırma sahasının genel jeolojisi dikkate alındığında, proje koridorunun tamamı kuvaterner yaşlı alüvyon birimlerde yer almaktadır (Şekil 3).
- Araştırma kapsamında gerçekleştirilen sondajlarda, ilk 29 kule altındaki sondajda yeraltı su seviyesi ile karşılaşılmamış olup, 29-89 numaralı kulelerin altında yapılan sondajlarda, yüzeyden itibaren 1.0 ile 7.5 m arasında değişken derinliklerde yeraltı su seviyesine rastlanmıştır (Şekil 4).
- Araştırma derinliği boyunca 1.50 m düşey aralıklarla yapılan SPT değerleri, %60 enerji oranı dikkate alınarak her bir sondaj başında ortalama olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçlara göre, yeraltı su seviyesinin görülmeye başladığı Kule-30 bölgesinden itibaren ortalama SPT-N_{60} değerlerinde dramatik bir düşüş gözlenmektedir (Şekil 4). Bu anomali, koridorda kullanılacak zemin senaryolarının etki bölgesinin tespiti açısından önemli bir bulgudur.
- Gerçekleştirilen sondajlardan alınan deney sonuçları ve karot sandık fotoğrafları incelendiğinde, 1-29 arasındaki bölgede çakıllı, silt-kil bantlı ince kum birimler, 30-89

arasındaki bölgede ise suya doygun, kum-çakıl bantları barındıran düşük plastisiteli yumuşak-sert killi silt&siltli kil birimler göze çarpmaktadır (Şekil 5).

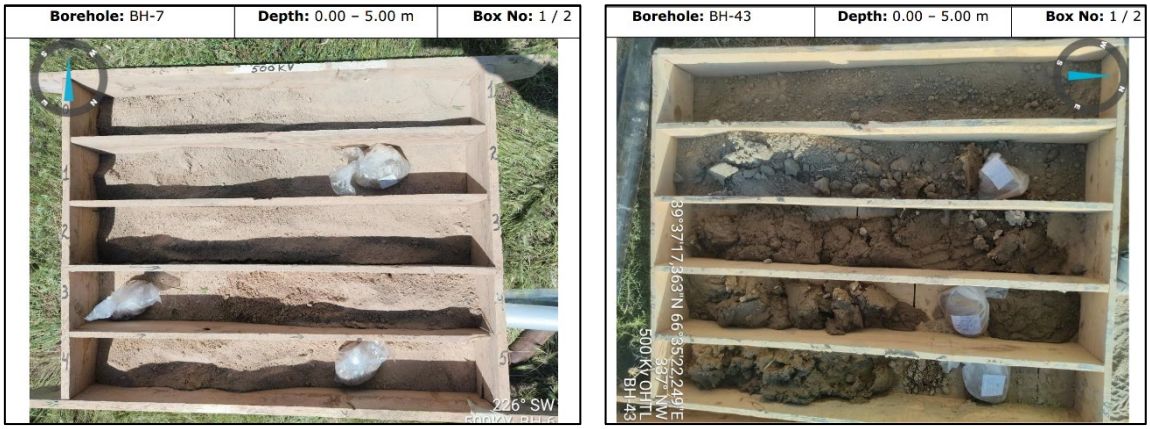
- Yürütülen laboratuvar çalışmalarına ait özet bilgiler Tablo 1'da sunulmuştur. Kıvam limitleri sonuçlarına göre, sondajlarda gözlenen ince daneli birimlerin düşük plastisiteli silt-siltli kil sınıfında yoğunlaştığı görülmektedir.



Şekil 3. Proje Sahası Jeoloji Haritası



Şekil 4. Ortalama SPT-N_{60} ve Yeraltı Su Seviyesi (Yüzeyden İtibaren) Histogramları



Şekil 5. Karot Sandık Örnekleri (BH-7 ve BH-43)

Tablo 1. Laboratuvar Testleri Özet Sonuçlar

Deney	Ölçüm	Minimum	Maksimum	Ortalama
Elek Analizi	Çakıl Miktarı (%)	0.1	15.65	3.60
	İnce Dane Oranı (%)	2.6	99.5	74.6
Atterberg Limitleri	Likit Limit (%)	17.4	34.7	24.9
	Plastik Limit (%)	11.2	22.2	18.2
	Plastisite İndisi(%)	3.5	14.1	6.8
	Su Muhtevası (%)	0.7	29.2	15.6
Fiziksel Özellikler	Doğal Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	18.8	20.3	19.6
	Kuru Birim Hacim Ağırlık (kN/m^3)	14.9	17.7	16.3
	Özgül Ağırlık (Gs)	2.65	2.73	2.68
Mekanik Özellikler	Sıkışma İndisi (C_c)	0.15	0.17	0.16
	Boşluk Oranı (e_0)	0.49	0.76	0.63
	Tek Eksenli Basınç Mukavemeti (q_u (kPa))	36	170	85

Laboratuvar deney sonuçları ve saha deney sonuçları biraraya getirildiğinde, ince daneli zeminlerin düşük plastisiteli yumuşak-katı siltlerle, kaba daneli zeminlerin çakıllı, orta sıkı-sıkı kumlarla temsil edildiği anlaşılmaktadır.

4.2 Jeorisklerin Tanımlanması

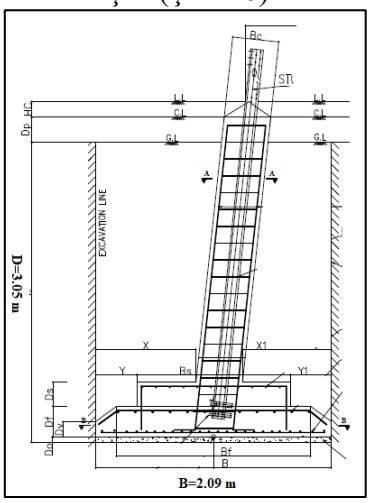
Bölüm 4.1'de detaylandırıldığı üzere sahada gözlenen yeraltı su seviyesi, gevşek-çok sıkı kum tabakalarının yanı sıra yumuşak-katı killi silt tabakalarının varlığı öne çıkmaktadır. Koridor boyunca en yüksek yer ivmesi (PGA) değerlerinin 0,20g ile 0,30g arasında değiştiği dikkate alındığında, sıvılaşma problemi proje için orta düzeyde bir risk oluşturmaktadır (Uray ve Yıldız, 2026). Buna bağlı olarak, sahayı belirleyen başlıca jeolojik tehlike (geohazard) unsurları aşağıdaki gibidir:

- Taşıma gücü problemi
- Oturma problemi
- Temel kazıları özelinde şev stabilitesi problemi
- Susuzlaştırma & parplanj ihtiyacı (Yüzeye yakın YASS görülen kesimler)
- Sıvılaşma problemi

Bu bildiri özelinde, taşıma gücü ve oturma problemleri özelindeki geoteknik karakterizasyon ve değerlendirme aşamalarına odaklanılmıştır.

4.3 Yapısal Veriler

Kuleler tekil temellerle teşkil edilecektir. Tekil temeller 2.1 x 2.1 m boyutlarında olup gömme derinliği 3.05 m olarak verilmiştir. Maksimum izin verilebilir oturma miktarı proje kriterlerine göre 25 mm olarak önerilmiştir (Şekil 6).



Şekil 6. Kule Tekil Temel Tipkesiti

4.4 Geoteknik Senaryolar

Bu başlık altında koridor bölgesindeki zemin davranışını kontrol eden senaryolar detaylandırılacaktır. Bu senaryolar özelinde kule temelleri altındaki zemin emniyet gerilmeleri hesaplanacaktır. Bölüm 4.1'de detayları verildiği üzere, yeraltı su seviyesinin litolojide gözlendiği ve gözlenmediği senaryolar hesap yaklaşımlarında dikkate alınacaktır:

- **Senaryo-1: Suya Doygun Durum:** Senaryo-1 yeraltı su seviyesinin gözlendiği, genel litolojinin ince daneli kısmen-tamamen suya doygun düşük plastisiteli siltli kil&killi silt birimlerin yer aldığı bölgelerin değerlendirilmesinde dikkate alınacaktır. Temel altı izin verilebilir maksimum oturmaya (25 mm) sebebiyet verecek gerilme hesabında, ani ve konsolidasyon oturma hesapları yapılacak, drenajsız koşullardaki taşıma gücü hesabından gelecek gerilmeler dikkate alınacaktır. Ampirik yöntemler ve denklemlerle hesaplanan gerilmeler, nümerik analizi program sonuçlarıyla doğrulanacaktır.
- **Senaryo-2: YASS Gözlenmeyen Durum:** Bu senaryo YASS görülmeyen, genel litolojinin kil-silt bandı gözlenen, hakim malzemenin orta sıkı-sıkı ince kumlardan oluştuğu bölgelerin değerlendirilmesinde dikkate alınacaktır. Senaryo-2'de meydana gelecek oturmaların elastik oturma olacağı kabulüyle, maksimum oturmaya karşılık gelen gerilmeler düzeltilmiş SPT değerlerinden hareketli ampirik formüller kullanılarak hesaplanacak, hesaplanan değerler nümerik analizi program sonuçlarıyla doğrulanacaktır.

Ayrıca, temel kazısı sırasında kaldırılacak 3.0 m yüksekliğindeki zemin tabakasından elde edilen yaklaşık 50 kPa mertbesindeki sürşarj basıncı brüt taşıma kapasitesi hesaplamalarına dahil edilmiştir. Yeraltı su seviyesindeki mevsimsel dalgalanmaları dikkate almak amacıyla, sondajlarda ölçülen yeraltı su seviyeleri analitik modellerde ihtiyatlı bir yaklaşımla 0,50 m yükseltilmiş; böylece net emniyetli taşıma basıncı değerleri üzerindeki kaldırma kuvveti (buoyancy) hesaba katılmıştır. (Uray ve Yildiz, 2026). Yukarıda tariflenen geoteknik koşullar ışığında, tariflenen senaryoların kule temelleri bazında etki bölgeleri aşağıdaki gibidir:

- Kule:1-28 Arası: Senaryo-2
- Kule: 29-89 Arası: Senaryo-1 (YASS gözlenmeyen 84-86 arası Senaryo-1'e dahildir)

Senaryo-1 Geoteknik Yaklaşım Kabulleri

Yeraltı su seviyesinin bulunduğu ince taneli zeminler üzerine oturan kule temellerinin taşıma kapasitesi, Ø=0° koşulu için Terzaghi (1943) yöntemine göre aşağıdaki taşıma kapasitesi bağıntısı kullanılarak hesaplanacaktır;

$$q_{ult} = 1.3.c.N_c + q.N_q + 0.4.\gamma B N_\gamma \text{ (Kare Temeller)}$$

Ø=0° koşulu için taşıma kapasitesi faktörleri:
N_c=5.14
N_q=1.00
N_γ=0
Değişken su seviyesi ve görece düşük efektif birim hacim ağırlık durumu dikkate alınarak, muhafazakar bir yaklaşımla N_q çarpanı denklemde 0 kabul edilmiştir. Bu durum ışığında taşıma gücü denklemi aşağıdaki forma dönüşmektedir:

$$q_{ult} = 1.3 * 5.14 * c \approx 6.7c$$

Bölüm 4.1'de derlenen laboratuvar sonuçlarına istinaden, sahada gözlenen ince daneli birimlerin düşük plastisiteli formda (PI<%20) olmasından ötürü drenajsız kayma mukavemetinin kıvam limitleri ve SPT değerleriyle ampirik olarak elde edildiği Stroud (1974) yaklaşımı değerlendirilmiştir. Söz konusu plastisite indisi aralığı için c_u= 6*N_{60} eşitliği seçilmiştir.
Güvenlik katsayısının 3 olarak seçildiği durumda Senaryo-1 özelindeki taşıma gücü denklemi aşağıdaki gibi şekillenmektedir;

$$q_{all} = \frac{q_{ult}}{3} = \frac{6.7 * 6 * N_{60}}{3} = \mathbf{13.4 * N_{60}}$$

Senaryo-2 Geoteknik Yaklaşım Kabulleri

Temel genişliği B>1.0 m olan temellerde maksimum taşıma basıncı, izin verilen maksimum oturma durumu tarafından kontrol edilmektedir. Bu koşullar altında Peck (1974) tarafından kohezyonsuz zemin tabakaları için SPT-N tabanlı aşağıdaki bağıntı dikkate alınacaktır;

$$\boldsymbol{q_{all} = 11 * (N_1)_{55}}$$

Where,
q_{all}= 25 mm oturmaya karşılık gelen temel altı gerilme
$N_{1\text{-}55}$ = %55 enerji düzeltmesi için SPT değeri

Her iki senaryo için de, temel gömme derinliği ve temel etki derinliği dikkate alınarak sondajlarda 3-10 metre arasında elde edilen SPT-N_{60} değerlerinin ortalaması hesaplanacak, kule temel lokasyonunun geoteknik koşullarını temsilen kullanılacaktır. Güzergah boyunca sondaj yapılamayan toplam 14 noktada ise, yakın noktaların temsiliyet olasılığı araştırılmalıdır. Bu araştırmalarda güvenilirlik bazlı tasarım (Reliability-Based Design-RBD) ve coğrafi bilgi sistemleri tabanlı geomekansal (geospatial) veri analizi yöntemleri

izlenebilmektedir. RBD yaklaşımları son yıllarda makine öğrenmesi algoritmalarıyla otomatize edilebilmekte ve güvenilir sonuçlar ortaya konmaktadır.

4.5 Nümerik Analizle Doğrulama

Yukarıda belirtildiği üzere, ampirik yöntemlerle hesaplanan gerilmeler maksimum oturma limiti kabulüne göre nümerik analiz programlarıyla doğrulanmalıdır. Her yöntem için hesaplanan gerilme değerleri mukayese edildiğinde, ampirik yöntemlerle analiz sonuçları arasında bir fark ortaya çıkmaktadır. Bu farkın giderilebilmesi için, ampirik yöntemden gelen gerilmelerin bir düzeltme faktörüyle çarpılması durumunda, nümerik analiz model sonuçlarıyla ampirik yöntem sonuçları kabul edilebilir bir mertebede uyumlu hale gelebilecektir. Buradaki amaç, çok sayıda kule temelinin bulunduğu projede, senaryoları temsil edebilecek, görece uniform zemin koşullarında çalışan ve nümerik analiz sonuçlarıyla uyumlu, sahaya özel korelasyonlar elde etmektir. Bu vesileyle geoteknik değerlendirmelerde hem güvenilir hem de çok sayıda analiz yapılması durumunu ekarte eden bir çözüm ortaya konabilecektir.

$$q_{all\text{-}final} = CF * q_{all\text{-}ampirik}$$

$q_{all\text{-}final}$= Nümerik analizle kalibre taşıma kapasitesi

CF= Düzeltme faktörü

Oturma analizlerine esas deformasyon modülü (E) ve hacimsel sıkışma katsayısı (m_v) aşağıdaki yöntemlerle elde edilecektir.

Ani oturma hesabı için deformasyon modülü: (Bowles, 1988)

- Senaryo-1: E=300 (SPT_{N55}+6)
- Senaryo-2: E=500 (SPT_{N55}+15)

Konsolidasyon oturması hesabı için hacimsel Sıkışma katsayısı (m_v) (Stroud ve Butler ,1975):

$$\boldsymbol{m_v = \frac{1}{\frac{56000 * N}{(PI)^{2.07}} + 435 * N}}$$

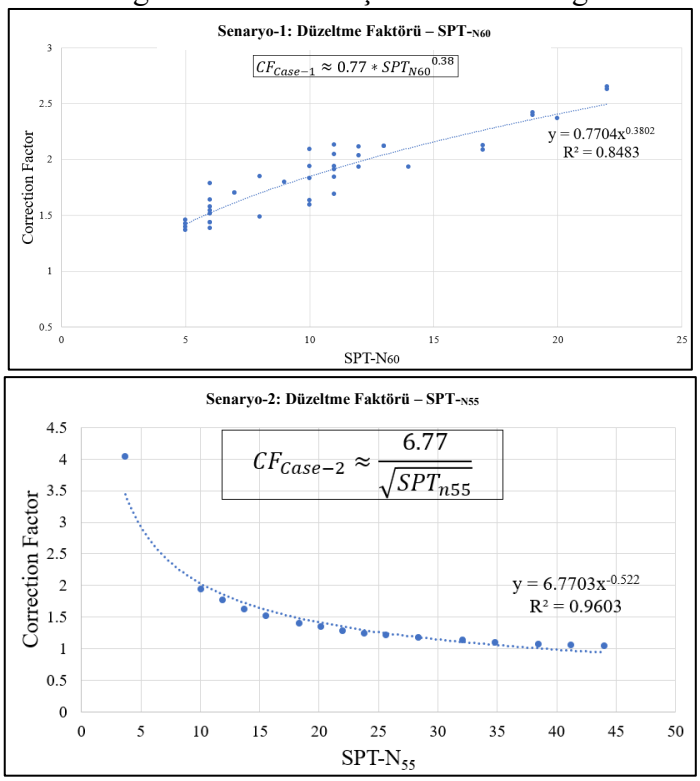
4.6 Sahaya Özel Korelasyonlar

Sahaya özel korelasyonların geliştirilmesi özelinde Senaryoların kullanılacağı kule temel sayıları ve ortalama SPT_{N60} değerleri aşağıdaki gibidir.

- Senaryo-1: SPT_{N60}: 5 - 22 (32 kule)
- Senaryo-2: SPT_{N55}: 4 - 50 (43 kule)

Düzeltme faktörlerine ait grafikler Şekil 7'de verilmiştir. Bu faktörleri dikkate alan sahaya özel taşıma gücü denklemlerinin son formu ise Tablo 2'de sunulmaktadır. Elde edilen formüller Senaryo-1 için %85, Senaryo-2 için %98 yaklaşıklıkta nümerik analizle hesaplanan taşıma gücü değerlerini yakalamaktadır. Senaryo-1'deki ince daneli zeminlerde konsolidasyon oturması ve ani oturmanın birarada görülmesi, Senaryo-2'deki basitleştirilmiş yaklaşımdan farklı olarak sonuçlardaki tutarlılığı azaltmaktadır. Buna

rağmen %85 yaklaşıklık, nümerik analiz modellemesi seçeneği öncesinde taşıma gücü tahmini noktasında tutarlı öngörüler sunması açısından önemli görülmektedir.



Şekil 7. Senaryolar İçin Düzeltme Faktörü Diyagramları

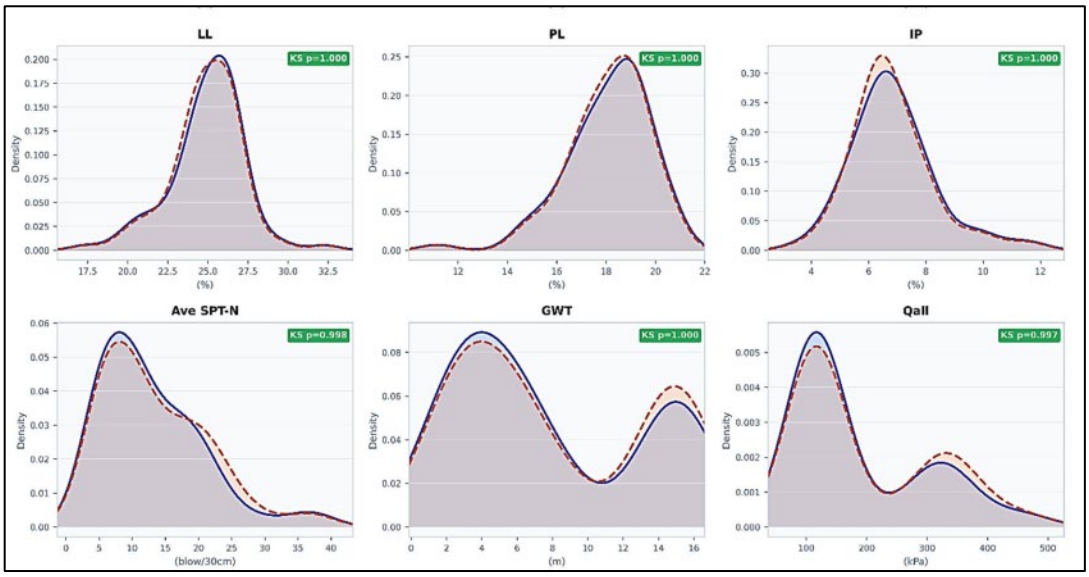
Tablo 2. Sahaya Özel Taşıma Kapasitesi Korelasyonları

Senaryo	Ampirik Formül	Düzeltme Faktörü	R^2	Sahaya Özel Korelasyonlar
1	$q_{all} = 13.4 * SPTN_{60}$	$CF = 0.77 * SPT_{N60}{}^{0.38}$	0.85	$\boldsymbol{q_{all-final} = 10.3 * (N_{60})^{1.38}}$
2	$q_{all} = 11 * N_{55}$	$CF = \frac{6.77}{\sqrt{SPT_{N55}}}$	0.96	$\boldsymbol{q_{all-final} = 74.5 * \sqrt{SPT_{N55}}}$

4.7 Sonuçların Alternatif Metotlarla Kalibrasyonu

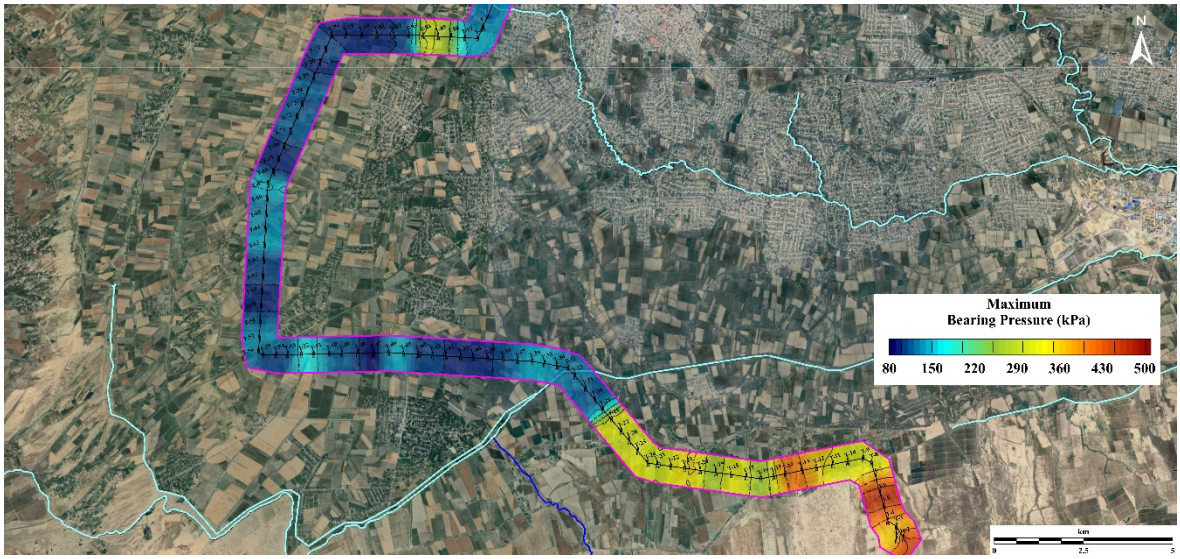
Sahaya özgü taşıma kapasitesi bağıntıları geliştirilerek, kuleye özel temel kapasiteleri geomekansel trend analizi, ya da makine öğrenmesi tabanlı güvenilirlik bazlı tasarım yaklaşımlarıyla hesaplanabilmektedir. Uygun bir interpolasyon çerçevesinin seçilmesini müteakip, saha araştırması verilerini görselleştirmek ve geoteknik özelliklerin üç boyutlu mekânsal değişkenliğini yakalamak amacıyla Surfer gibi CBS tabanlı yazılım platformları yaygın olarak kullanılmaktadır (Yildiz ve diğ., 2024). Mekânsal interpolasyona ek olarak, makine öğrenmesi (MÖ) algoritmaları, uzun lineer altyapı koridorları boyunca geoteknik parametreleri tahmin etmek ve sonuçları yorumlamak için etkili bir araç sunmaktadır. Yapay zekadaki, özellikle MÖ alanındaki son gelişmeler, Standart Penetrasyon Testi (SPT) indeksleri ile jeomekanik davranışlar arasındaki karmaşık ve oldukça lineer olmayan ilişkileri modellemek için güçlü kabiliyetler sağlamaktadır. Bu yaklaşımlar, geleneksel ampirik eşitliklerin ötesine geçerek tahmin doğruluğunu, güvenilirliği ve sahaya özgü kalibrasyonu önemli ölçüde artırmaktadır (Wu ve diğ., 2025). Bu yöntemlerle, araştırma safhasında çeşitli sebeplerle sondaj yapılamayan ve numune toplanamayan alanlarda taşıma gücü tahmini yapılabilmektedir. MÖ tabanlı yöntemler mevcut verisetlerini dikkate alarak tahmin algoritmasını çalıştırırken, geomekansal trend analizleri ise ardışık noktalarda

yürütülen geoteknik hesap sonuçlarını uygun interpolasyon yöntemleriyle hesaplamaktadır. Ayrıca, MÖ tabanlı çerçeveler, gelişmiş mekânsal veri tamamlama teknikleri aracılığıyla güzergah boyunca örnekleme yapılmamış mekânsal boşluklardaki yeraltı parametrelerini tahmin etmede yüksek etkinlik sergilemektedir. (Bkz. Şekil 8).



Şekil 8. MÖ tabanlı geoteknik veri tahmini sonuçları (Uray ve Yıldız, 2026)

Geomekansal veri analizine dayalı taşıma kapasitesi haritası Şekil 9'da sunulmaktadır. Bu tür haritalar, anomali gözlenen bölgeleri jeomorfolojik kısıtlarla korele etmek için oldukça kullanışlı olup, örnekte Kule-29'a komşu bir nehir geçişi ile taşıma kapasitesi değerlerinin dramatik düşüşü görselleştirilmiştir.



Şekil 9. Geomekansal Veri Analizi Tabanlı Taşıma Gücü Haritası

5. SONUÇLAR

Bu çalışma kapsamında, Özbekistan'da planlanan bir havai enerji nakil hattı için gerçekleştirilen saha karakterizasyonu faaliyetleri, özellikle entegre geoteknik araştırmalara

odaklanılarak sunulmaktadır. Havai Enerji Nakil Hattı (OHTL) projesi, geleneksel koridor bazlı "lot" ayrımlarının lokal zemin anomalilerini risklerini yakalamada sıklıkla yetersiz kaldığını ve projeye özel, saha araştırması planlaması, geomekansal analizler ve makine öğrenmesi destekli güvenilirlik bazlı tasarım yaklaşımlarına geçişin gerekli olduğunu göstermektedir. Bildiri kapsamında sahada yürütülen geoteknik saha ve laboratuvar araştırma çalışmaları derlenmiş, jeotehlike unsurları listelenmiş, bu unsurlardan taşıma gücü ve oturma problemlerinin çözüm yöntemleri araştırılmıştır. Litolojik anomalilerin tespiti ve gruplandırılması sonrasında, iki farklı zemin senaryosu için hesap yöntemleri tariflenmiştir. Geoteknik hesaplamaların ampirik yöntemlerle yürütülmesi ve elde edilen sonuçların nümerik analiz modelleriyle doğrulanması sonrasında, sahaya özel tariflenen zemin senaryoları için projeye özgü taşıma gücü denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler, proje kapsamında oluşturulan veri setine dayalı olarak nümerik analiz programlarıyla tutarlı sonuçlar vermesi yönünden, geoteknik değerlendirmelerdeki yapı çokluğu ve analiz süresi gibi kısıtları ekarte etmesi açısından önemli görünmektedir. Saha araştırması sırasında veri toplanmasının mümkün olmadığı bölgelerin karakterizasyonu noktasında ise, mevcut veri setinin genel trendini takip eden makine öğrenmesi tabanlı parametre tahmin algoritmaları, uygun interpolasyon yöntemiyle veri bulunmayan alanlardaki taşıma gücü tahminini mümkün kılan geomekansal veri analiz yöntemlerine bildiri içeriğinde yer verilmiş, sonuçları Bölüm’4 kapsamında sunulmuştur.

KAYNAKLAR

Bowles J.E. (1988), Foundation Analysis and Design Fourth Edition.

Heim, Zack & Kandaris, Peter & Houston, Sandra. (2011). Simplified Reliability-Based Geotechnical Investigation and Design of Transmission Lines. Geotechnical Special Publication. 2968-2977. 10.1061/41165(397)304.

Johnson, Kristofer. (2009). Geotechnical Investigations for a Transmission Line Are More Than Drilled Borings. 1-12. 10.1061/41077(363)10.

Peck RB, Hanson WE, Thornburn TH (1974). Foundation Engineering. 2 ed. John Wiley and Sons Inc., 514, New York, USA

Phoon, Kok-Kwang & Kulhawy, Fred & Grigoriu, Mircea. (2000). Reliability-based design for transmission line structure foundations. Computers and Geotechnics. 26. 169-185. 10.1016/S0266-352X(99)00037-3.

Stroud M (1974). The standard penetration test in insensitive clays and soft rocks. Proceedings of the 1st European Symposium on Penetration Testing, Stockholm, Sweden, 367–375.

Stroud, M. A. and Butler, F. G. 1975. The standard penetration test and the engineering properties of glacial materials. Conference of the Midlands Geotechnical Society.

Terzaghi K (1943). Theoretical Soil Mechanics. 1 ed. Wiley, New York, USA.

Uray E, Yildiz T (2026). Comparative machine learning study for allowable bearing capacity prediction of OHTL tower foundations with spatially imputed geotechnical borehole databases’ interpretability. Challenge Journal of Structural Mechanics, 12(2), 125–144.

Wu H, Aguilar V, Montgomery J (2025). Applications of machine learning to foundation design for transportation structures. Transportation Research Record, 2679(1), 556–568.

Yildiz T., Dag E., Cakan A.G., Afacan O., (2024). Geoteknik&Jeofizik Saha Araştırma Çalışmalarının Geomekansal Veri Yöntemleriyle Değerlendirilmesi, 19th National Conference of Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Ankara, Turkey