

Sıvılaşma ve Yanal Yayılmanın Coğrafi Bilgi Sistemleri ile Değerlendirilmesi

¹Sedat SERT ^{*1}Ertan BOL ¹Aşkın ÖZOCAK
²Sakarya Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, Sakarya, Türkiye

Özet:

Türkiye'nin üçüncü uzun akarsuyu olan Sakarya Nehri 1999 depreminde büyük hasara uğrayan Adapazarı kenti zeminlerinin oluşumunda başlıca rol oynamıştır. Son zamanlarda; gelişen şehirde yeni rekreasyon alanlarına ihtiyaç duyulmuş ve Sakarya Nehri'nin kent merkezinin doğu sınırını teşkil eden bölümündeki her iki kıyı şeridi bu alanlar için seçilmiştir. Koni penetrasyon deneyi, zemin sıvılaşması ve yanal yayılmanın tespiti için kullanılan önemli bir araç olduğu için nehrin her iki kıyısı boyunca koni penetrasyon deneylerinin gerçekleştirilmesine karar verilmiştir. Bu bildiri öncelikli olarak sıvılaşma ve yanal yayılma açısından riskli bölgelerin koni penetrasyon deneyi verilerinin literatürdeki yöntemlerle değerlendirilmesi ile belirlenmesine yer verilmiştir. Sonrasında riskli alanları gösteren tematik haritalar bir coğrafi bilgi sistemleri yazılımı ile oluşturulmuş ve sonuçta coğrafi bilgi sistemleri nehir kenarlarındaki alanlarda güvenli ve ekonomik tasarım için kullanılmıştır.

Anahtar kelimeler: Sıvılaşma, yanal yayılma, koni penetrasyon deneyi, coğrafi bilgi sistemleri

Evaluation of Soil Liquefaction and Lateral Spreading by using Geographical Information Systems

¹Sedat SERT ^{*1}Ertan BOL ¹Aşkın ÖZOCAK
¹Sakarya University, Faculty of Engineering, Civil Engineering Department, Sakarya, Turkey

Abstract:

Adapazarı City, Turkey, suffered great damage during the 1999 earthquakes. Sakarya River, which is the third longest river of Turkey, played a major role in the formation of Adapazarı soils. Nowadays, there has been a need to have new creation areas in the developing city and river sides have been thought to be used as the new recreation areas. Because the cone penetration test (PCPT) is an important tool to evaluate soil liquefaction and lateral spreading and to have a quick and reliable evaluation, PCPT tests have been decided to be conducted along both river sides. In this paper, potential risky areas of lateral spreading at sides of Sakarya River were determined by using PCPT results in the light of the available methods in the literature. Thematic map of risky areas was then prepared by using a Geographical Information System software. The City will now be in a position to design riverbank improvement systems safely and economically.

Key words: Liquefaction, lateral spreading, cone penetration test, geographical information systems

1. Giriş

Türkiye'nin en uzun üçüncü nehri olan Sakarya Nehri, Adapazarı kent merkezinin doğu sınırı boyunca Karadeniz'e doğru akmaktadır. Adapazarı kenti, Sakarya Nehri'nin taşıdığı çökeller üzerine kurulmuş olup, 1960'lı yıllara kadar süregelen taşkınlarla nehir, şehir zeminlerinin oluşumunda önemli rol oynamıştır. 1965'te nehrin her iki sahiline yapılan seddelerle taşkın etkisi önemli ölçüde önlenmiştir.

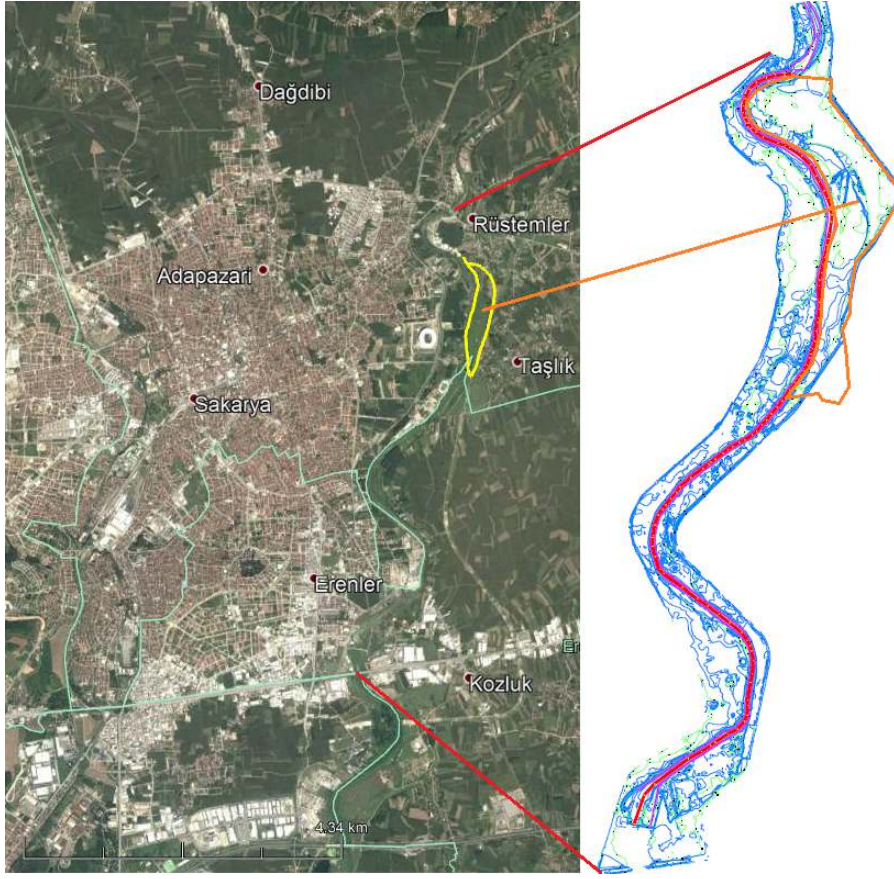
Sakarya Nehri'nin oluşturduğu yumuşak/gevşek alüvyonlar üzerinde kurulu şehir 1999 depremlerinde çok ağır hasar görmüştür. Deprem sonrasında yapılan ayrıntılı zemin incelemeleri, Adapazarı kentinin üzerine kurulduğu Akova'nın Sakarya Nehri tarafından oluşturulduğunu işaret etmektedir. Bütün şehir boyunca yapılan sondaj ve sondalama çalışmalarında farklı derinliklerde Sakarya Nehri'nin terkedilmiş kanallarını gösteren kum ve çakıllara bolca rastlanmaktadır. Diğer taraftan taşkınlar sırasında seddelerde meydana gelen yarık yayılmaları (*crevasse splays*) ile gevşek ince kum ve silt zeminler bütün şehre yayılmışlardır. Taşkın suyunun enerjisini yitirmesi ile ana kanaldan uzak bölgelerde oluşan ard bataklık çökelleri (*backswamps*) de bolca görülebilmektedir. Sonuç olarak şehirde hem yatayda hem de düşeyde hızla farklılaşabilen çok sayıda zemin türüyle karşılaşılabilir.

Zamanla gelişen Adapazarı kentinde yerel yönetimler, yeni rekreasyon alanlarının oluşturulması amacıyla yeni alternatif yerler aramaya başlamışlardır. Sakarya Nehri'nin, Adapazarı kent merkezi doğu sınırında çok uzun yıllar atıl vaziyette bulunan ve toplamda 16 km uzunluğundaki bir şeride karşılık gelen 8 km'lik kısmı bir seçenek olarak gündeme gelmiştir. Alanın kullanılabilirliğine yönelik araştırma talebi Sakarya Üniversitesi'ne iletildiğinde hızlı bir biçimde gerçekleştirilebilmesi nedeniyle koni penetrasyon deneyinin (PCPT/CPTu) sondaj desteğiyle kullanılması uygun görülmüştür.

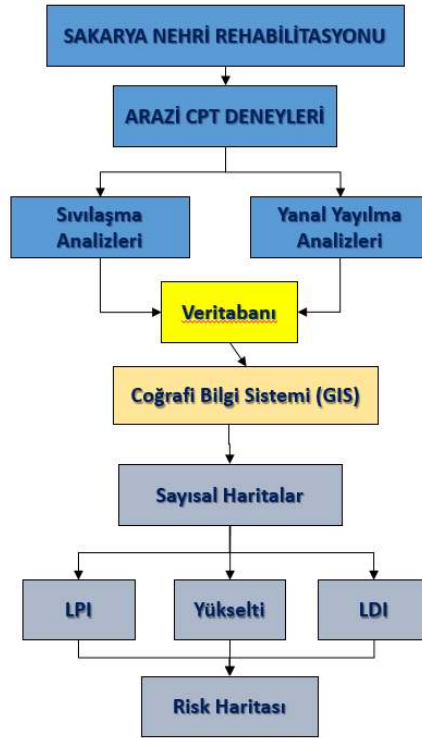
2. Yöntem ve Arazi Çalışmaları

Bu çalışmada öncelikli olarak alanın hâlihazır haritaları çıkartılmış ve bu haritalar yardımı ile yükseklik haritası oluşturulmuştur. Buna göre çalışma alanının güneyinde yüksekliklerin 30-35 metreler, kuzeyinde ise 28-30 metrelerde olduğu görülmekte olup, kuzeye doğru eğimlerde kademeli olarak bir düşüş bulunmaktadır (Şekil 1). İnceleme alanında Sakarya nehrinin taban kotu ortalama 20 metre civarlarındadır. Bölgede inşa edilen hidroelektrik santralinden sonra kuzey yönünde sol sahilin 1-2 km'lik kısmında dik yamaçların olduğu izlenmiştir. Bu kısmın sağ sahilinde ise daha az yükseklikte şevlerin olduğu anlaşılmaktadır. Çalışma alanının kuzeyinde nehir kenarları genelde etrafındaki alanlar ile tatlı eğimler yapmaktadır.

Çalışma alanında nehrin her iki yakasında yaklaşık 300 metre aralıklarla toplam 44 adet boşluk suyu basınçlarının da ölçüldüğü koni penetrasyon deneyleri (PCPT) gerçekleştirilmiş ve arazi verileri oluşturulan veri tabanına aktarılmıştır. Hâlihazır harita altlık olarak kullanılmış ve çalışma alanları Coğrafi Bilgi Sistemi yazılımı olan MapInfo programı ile sayısallaştırılmıştır [3]. MapInfo haritaları ile veri tabanı arasında gerekli ilişkiler kurularak sonuca ulaştıracak tematik haritalar hazırlanmıştır. Söz konusu tematik haritalar yardımı ile nehrin her iki sahili için risk dağılımları irdelenmiştir. Çalışmada izlenen yöntem şeması Şekil 2'de verilmektedir.



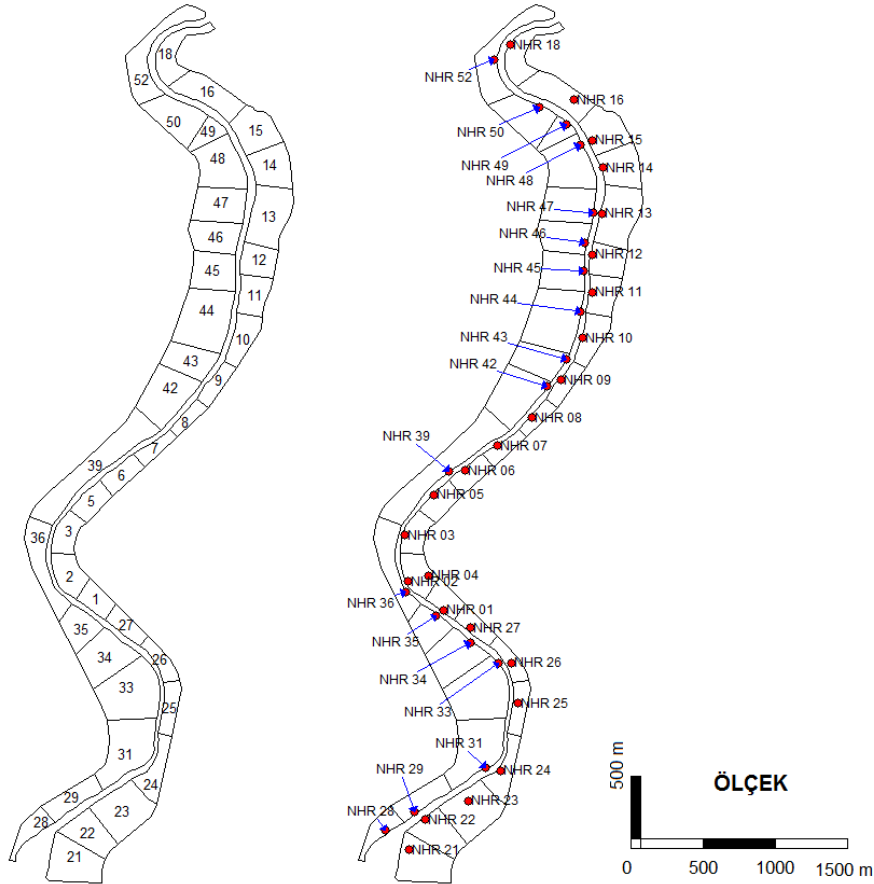
Şekil 1. Çalışma alanı yer bulduru haritası



Şekil 2. Çalışmada izlenen yöntemin akış diyagramı

Şekil 3’de MapInfo yazılımında tematik haritalandırma yapılacak bölgelerin tanımlaması gösterilmektedir. Şekilden de anlaşılacağı üzere ayrıtılan her bir bölgede en az bir CPT bulunacak şekilde bölümlendirme yapılmış, çalışma alanı farklı segmentlere ayrılmıştır. Segmentler içinde bulundurduğu CPT numarasını ad olarak almıştır.

Sakarya Nehri’nin 8 km’lik kısmının rehabilitasyonuna yönelik yürütülen çalışmada; toplam 521.23 m uzunluğunda 44 adet boşluk suyu basınçlarının da ölçüldüğü koni penetrasyon deneyi (PCPT) icra edilmiştir. Yerleri Şekil 3’de görülebileceği gibi, sağ sahilde toplam 313.90 m uzunluğunda 25 adet ve sol sahilde ise toplam 207.33 m uzunluğunda 19 adet sondalama gerçekleştirilmiştir. Yeraltı su seviyesinin topografyaya bağlı olarak değiştiği düşünülmektedir. Ölçülen minimum su seviyesi 1.50 m olmakla birlikte CPT deneyi yapılan kot arttıkça su seviyesinin derinleştiği söylenebilir.



Şekil 3. Çalışılan bölgenin bölümlere ayrılması

3. Analizler

3.1. Sıvılaşma ve yanal yayılma analizleri

Boşluk suyu basınçlarının da ölçülebildiği koni penetrasyon deneyi (PCPT) gelişen teknolojisi ile birçok ülkede önemli bir uygulama alanı bulmuş ve geleneksel yöntem olarak kabul edilen standart penetrasyon deneyinin (SPT) yerini almaya başlamıştır. Bu çalışmada da sıvılaşma ve yanal yayılma değerlendirmesi CPT verileri kullanılarak yapılmıştır. Şekil 4’te arazide yürütülen CPT çalışmalarından bir görünüm sunulmaktadır.



Şekil 4. Çalışma alanında yürütülen CPT çalışmalarından bir görüntü

Sıvılaşabilir kumların tanımlanmasında, Seed ve Idriss (1971) tarafından geliştirilip genel kabul görmüş olan ve SPT deney verilerini kullanan yöntemin uygulanması sürmekte olup, bu yaklaşımda çoğunlukla çevrimsel gerilme oranını yansıtan CRR/CSR değeri kullanılmakta ve yöntem bu nedenle kumlarla sınırlanmaktadır [4]. Bu yöntemde; bir tasarım depremi tarafından oluşturulan çevrimsel kayma gerilmesi profilinin “*cyclic stress ratio*” (CSR) ve zeminin çevrimsel direnç oranının “*cyclic resistance ratio*” (CRR) tahmin edilmesi gerekmektedir. Bunun yanında, sıvılaşma potansiyelinin tahmini için Iwasaki vd. (1978)’nin geliştirdiği sıvılaşma potansiyeli indisi (LPI) yöntemi mevcuttur [5]. Bu yöntemde, sıvılaşmanın büyüklüğü sıvılaşan tabaka kalınlığına, bunun yüzeye olan yakınlığına ve sıvılaşmaya direncin deprem tarafından beliren yüke oranını ifade eden güvenlik sayısının (FS) birden küçük olduğu orana bağlıdır.

20 m’den daha büyük derinliklerde oluşacak sıvılaşmanın etkisinin yüzeyde çok nadir belireceği gerekçesiyle araştırmacılar, LPI’nın hesabını 0 ile 20 m arasında sınırlandırmışlar ve aşağıda verilen tanımlamayı önermişlerdir:

$$LPI = \int_0^{20m} Fw(z)dz \quad (1)$$

Burada z metre boyutunda derinlik, w ise derinlik ağırlık faktörü olmak üzere;

$$FS \leq 1 \text{ için } F=1-FS \quad (2)$$

$$FS > 1 \text{ için } F=0 \quad (3)$$

$$w(z)=10-0.5z \text{ dir.} \quad (4)$$

Buradan, bulunan LPI değerinin Tablo 1’de verilen aralıklarına göre sıvılaşma potansiyelinin büyüklüğü tahmin edilebilmektedir. Toprak ve Holzer (2003) 1989 Loma Prieta, California depremindeki sıvılaşmanın yüzey gözlemleri ile LPI korelasyonunu incelemişler ve sıvılaşma olayının tipik olarak LPI değerinin 5’i aştığı durumlarda gerçekleştiğini belirlemişlerdir.

Tablo 1. Sıvılaşma Potansiyeli İndisine göre Sıvılaşmanın Şiddeti

Sıvılaşmanın Şiddeti	LPI
Az-yok	LPI=0
Düşük	0 < LPI < 5
Orta	5 < LPI < 15
Yüksek	15 < LPI

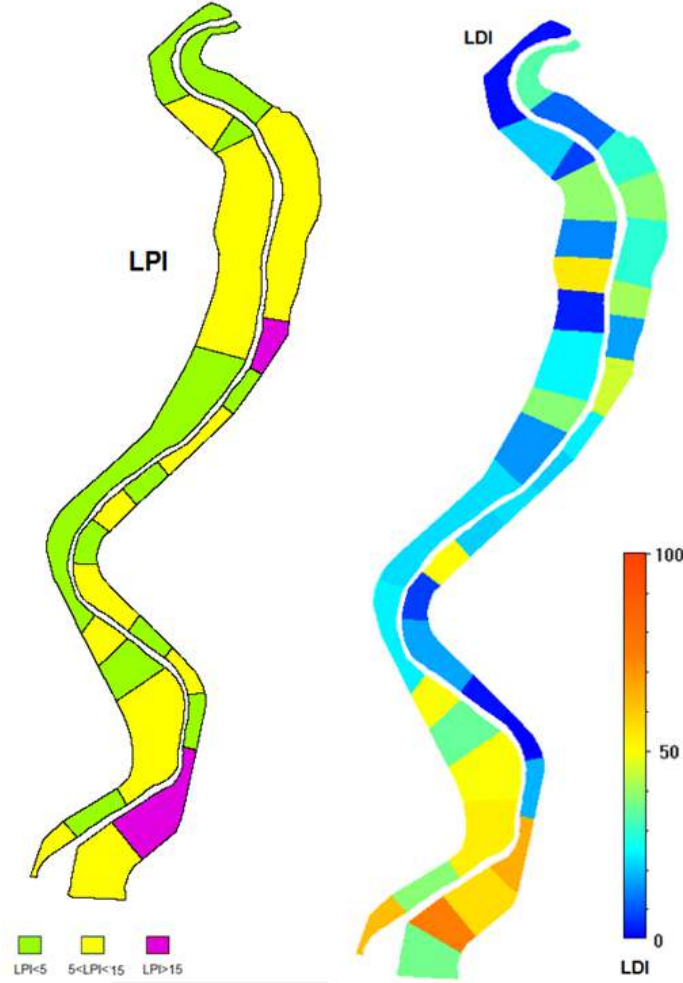
3.2. Sakarya Nehri rehabilitasyonu CPT değerlendirme sonuçları

Bu çalışma kapsamında tüm CPT'lerde sıvılaşma analizleri çevrimsel gerilme yöntemine göre yapılmış ve her sondalamada sıvılaşma potansiyeli indisi tayin edilmiştir. *CRR-CSR* çevrimsel gerilme oranları hesaplanıp, sıvılaşan tabakaların bir nevi kümülatif toplamını veren *LPI* değerleri belirlenmiştir.

Tablo 2'de hesaplanmış sıvılaşma potansiyeli indisi değerleri (LPI) yeraltı su seviyeleri (YASS) ile birlikte görülmektedir. YASS yüzeye yaklaştıkça çoğu durumda LPI değerinin önemli artışlar gösterdiği anlaşılmaktadır. Bu durum; çalışma alanında sıvılaşabilir tabakaların yüzeye daha yakın olduğunun, diğer bir deyişle üst kısımlarda daha çok sıvılaşabilir kumlu/siltli zeminlerin bulunduğu bir göstergesidir. Tablo 1 ve Tablo 2 birlikte değerlendirildiğinde LPI'nın 5'den küçük olduğu durumlarda sıvılaşma olayının gerçekleşme potansiyelinin düşük olduğu, LPI'nın 15'den büyük olduğu durumlarda ise sıvılaşmanın oluşacağı anlaşılmaktadır. Şekil 5'te çalışma alanı için coğrafi bilgi sisteminde hazırlanmış tematik LPI haritası gösterilmektedir.

Tablo 2. Segmentlerde Hesaplanan LPI ve LDI Değerleri

Segment	YASS	LPI	LDI	Segment	YASS	LPI	LDI
1	3.10	13.21	17.41	26	>5.00	5.25	3.17
2	3.30	6.14	17.36	27	>5.00	3.45	4.48
3	2.80	2.09	8.48	28	2.40	7.18	61.44
5	1.80	6.28	50.15	29	2.50	3.06	38.57
6	3.20	4.48	21.08	31	3.10	7.38	52.87
7	1.20	13.09	22.61	33	0.80	7.22	49.70
8	2.70	8.22	21.08	34	>2.70	4.22	35.09
9	1.50	2.75	24.03	35	2.90	7.91	49.71
10	2.50	16.49	45.27	36	>1.10	2.06	24.06
11	2.90	7.15	16.91	39	3.50	2.59	22.24
12	2.00	5.95	41.18	42	--	0.86	15.94
13	3.40	9.70	29.24	43	>2.55	4.42	38.46
14	2.70	11.48	38.88	44	4.00	11.20	24.58
15	1.80	8.01	29.55	45	2.00	5.88	5.79
16	2.90	3.95	11.87	46	1.40	12.28	53.66
18	>5.00	3.78	33.34	47	>5.00	9.97	14.67
21	2.90	5.22	36.35	48	2.40	7.35	39.25
22	1.00	12.22	72.82	49	2.70	2.88	8.74
23	3.90	15.21	55.92	50	>4.70	9.64	20.78
24	>5.00	17.99	64.10	52	>5.00	0.40	4.16
25	>5.00	1.19	18.70				



Şekil 5. Sıvılaşma potansiyeli indisi (LPI) ve yanıl yayılma indisi (LDI) haritaları

Deprem sırasında genellikle çok az eğimli (0.3-3 derece arası) yamaçlarda veya su kütlelerine komşu yerlerde gelişen bir diğer etki de “yanıl yayılma” dır. Yayılmalar altta bulunan zeminin sıvılaşmasını ve yüzeysel sediment bloklarının yanıl ötelenmesini temsil eder. Bu yayılmalar çoğunlukla birkaç metre ile sınırlıdır. Bu gibi hareketler, tipik olarak dolgulara, boru hatlarına, köprülere, yüzeysel temellere ve bu çalışmanın da konusu olan su kütlelerine bitişik istinat duvarı gibi yapılara zarar verirler. Yanıl yayılma ile ilgili CPT tabanlı çözümlerler arasında ilk yapılan bilimsel araştırma Zhang vd. (2004)’e aittir. Buna göre sıvılaşmış katmandaki kalıcı kayma deformasyonları esasen maksimum çevrimsel kayma deformasyonları (γ_{max}) ve yerinde statik kayma gerilmelerinin bir fonksiyonudur.

Sıvılaşmış tabakaların kalınlığının artması daha fazla yanıl yer değiştirmeye neden olacaktır. Sıvılaşmış tabakanın hem maksimum çevrimsel kayma deformasyonları (γ_{max}), hem de tabaka kalınlığı, zemin özellikleri ve deprem özelliklerinden etkilenir. Ishihara ve Yoshimine (1992), γ_{max} ve sıvılaşmaya karşı güvenlik sayısı (FS) arasındaki ilişkiyi, temiz kumların farklı bağıl birim hacim ağırlıkları (D_r) için oluşturmuşlardır [7]. Bağıl birim hacim ağırlıklar ya SPT ya da CPT verileri için oluşturulmuş olan korelasyonlardan tahmin edilebilir. D_r ile CPT verileri arasındaki korelasyon Tatsuoka vd. (1990)’a göre:

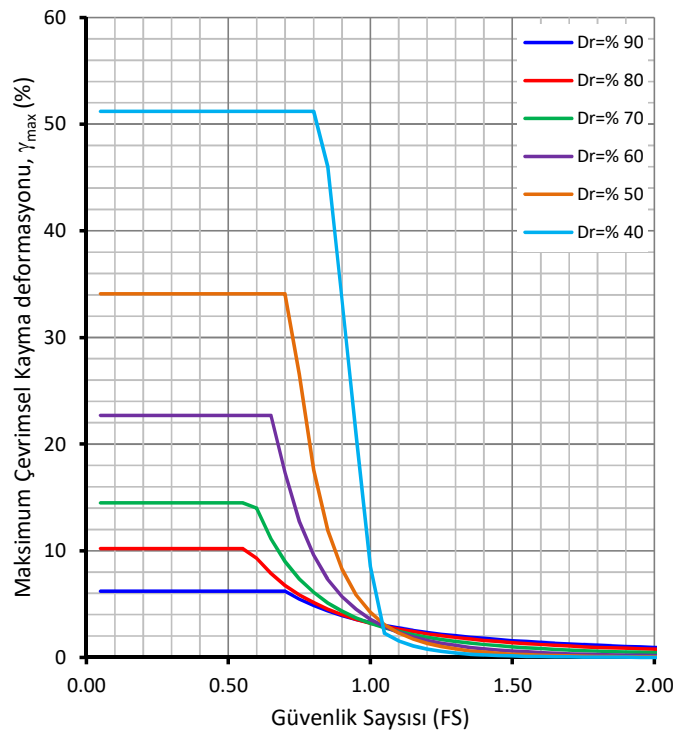
$$D_r = -85 + 76 \cdot \log(q_{c1N}) \quad [q_{c1N} \leq 200] \quad (5)$$

şeklinde hesaplanabilir [8]. Burada q_{c1N} 100 kPa efektif örtü yüküne göre normalize edilmiş koni penetrasyon direncidir.

Şekil 6 güvenlik sayısı ile bağıl birim hacim ağırlıkları arasındaki ilişkiyi göstermektedir. Burada güvenlik sayısı (FS) NCEER (1997)'in önermiş olduğu şekilde SPT veya CPT verilerine dayanılarak hesaplanabilir [9]. Hesaplanan γ_{max} değerlerinin derinliğe göre integrali alınarak yanal yayılma indeksi aşağıdaki şekilde (LDI) belirlenir.

$$LDI = \int_0^{z_{max}} \gamma_{max} dz \quad (6)$$

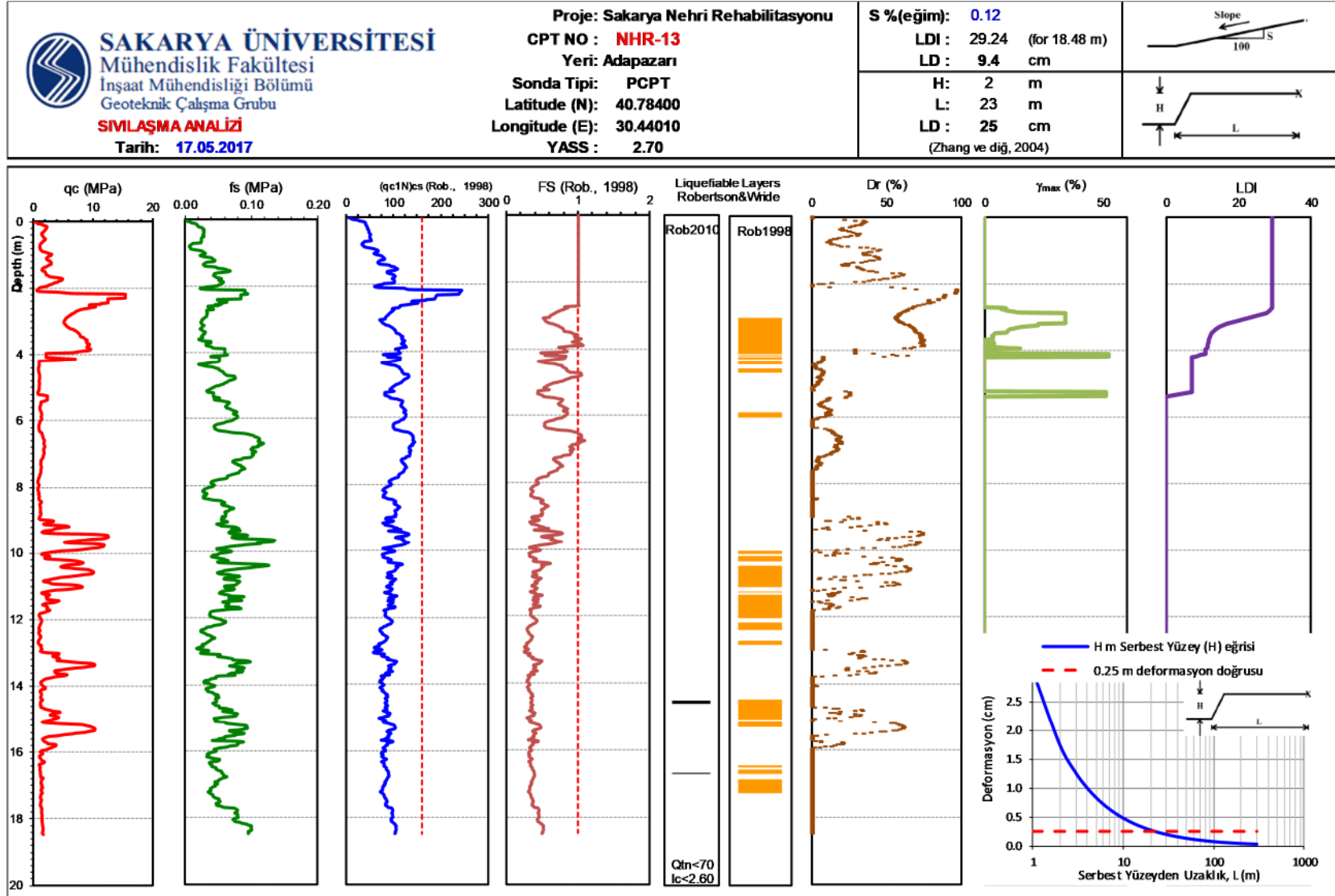
Burada z_{max} FS'in 2'den küçük olduğu değerler için tüm sıvılaştıran tabakaların maksimum derinliğidir.



Şekil 6. Temiz kumlarda farklı bağıl sıklıklar için maksimum çevrimsel kayma deformasyonu ve güvenlik sayısı ilişkisi

LDI, deformasyon birimine sahip olmasına karşın yanal yayılmanın büyüklüğünü ifade eden bir değer olarak ele alınır. Sonuçta oluşacak deformasyonlar LDI'nın büyüklüğü yanında zemin yüzey eğimi, şev yüksekliği ve geometrisi ile yapının konumuna ve deprem karakteristiklerine bağlı olarak değişmektedir. Bu çalışmada nehrin her iki sahilinde inşa edilecek yapı türleri belli olmadığı için söz konusu deformasyon hesaplamaları (LD) yapılmamış, ancak yanal yayılmanın derecesini yansıtan LDI hesaplamaları gerçekleştirilmiştir. Şekil 7'de örnek bir hesaplama tablosu NHR-13 CPT verisi için verilmiştir. Söz konusu sondalamada LDI 29.24 olarak bulunmuştur.

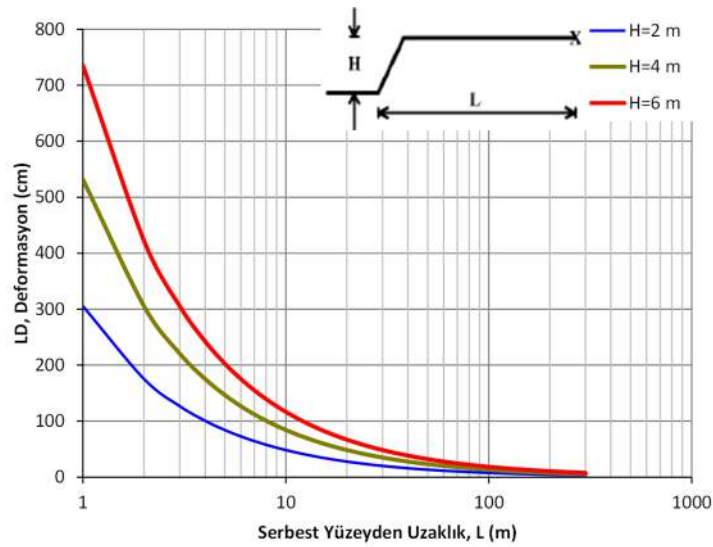
Tablo 2'de ayrıca bu çalışmada yürütülen CPT çalışmalarının her birinde hesaplanmış LDI sonuçları verilmiştir. Bu veriler yardımı ile çalışma alanını temsil eden segmentler için hazırlanmış tematik harita da Şekil 5'te gösterilmektedir.



Şekil 7. NHR-13 CPT sondalmasına ait LDI hesap grafikleri

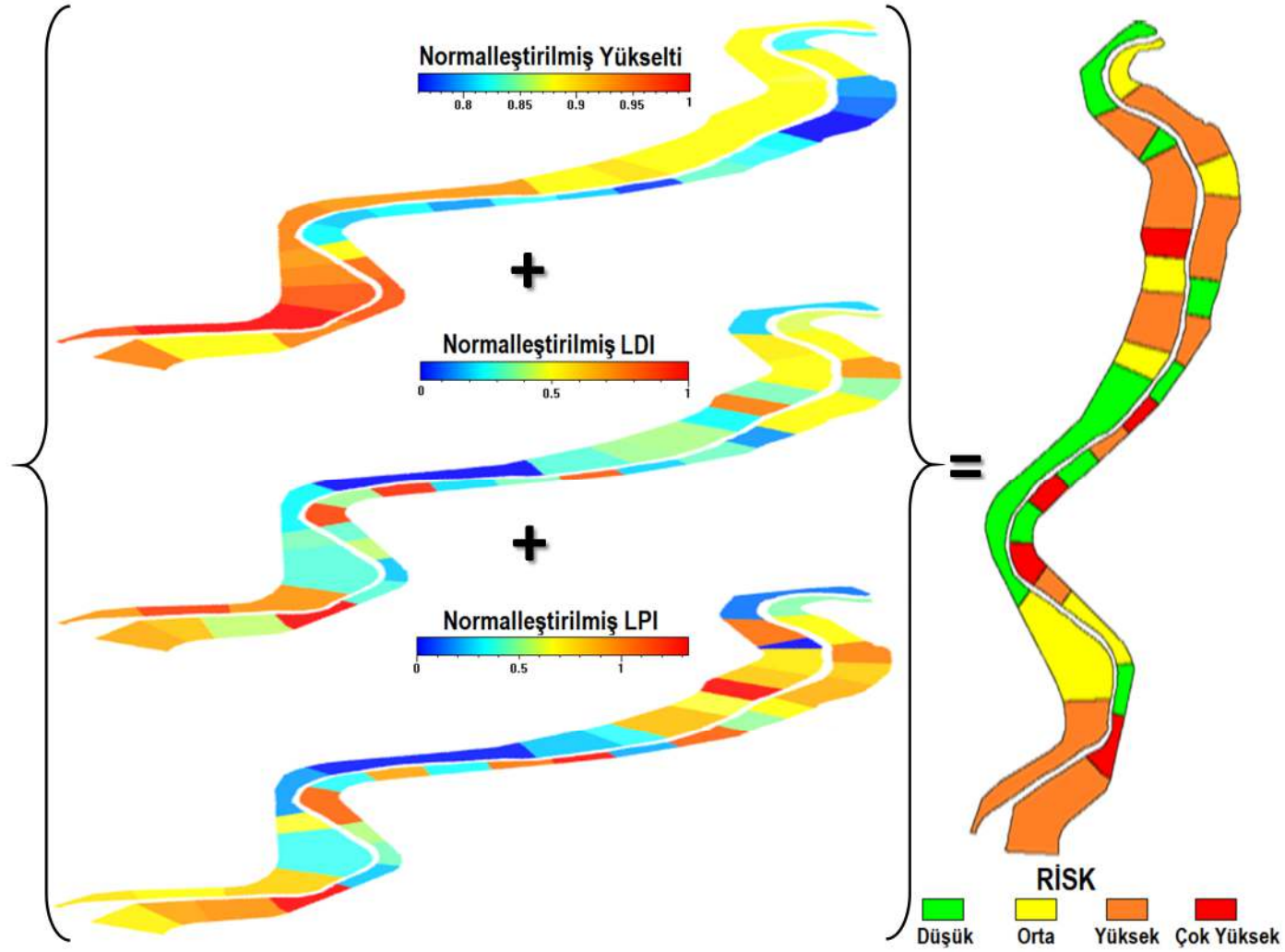
3.2.1. Sakarya Nehri rehabilitasyonu risk haritası

Çalışmanın sonraki aşamasında nehrin her iki sahiline yapılması düşünülen tahkimat sistemlerinin seçimine ışık tutacak bir risk haritası çalışması yapılmıştır. Bu haritada; sınıvlaşma, yanıl yayılma ve topoğrafik açıdan riskli olabilecek alanları bölgesel olarak birbirlerinden ayırtlamak amaçlanmıştır. Bu değerlendirmeye topoğrafik yüksekliğin de dahil edilmesindeki amaç; Sakarya Nehri taban kotu 20 m gibi sabit bir değerde iken, her iki sahildeki yüksekliklerin değışken olmasıdır. Bu farklılıklar beraberinde yer yer yüksek şevleri getirmekte, bu da yanıl yayılma açısından riski arttırmaktadır. Söz konusu risk Şekil 8’de gösterilmektedir. Bu grafikte LDI=29.24 değerine sahip NHR-13 nolu CPT sondasının LD değışim grafiği gösterilmektedir. Buradan da izlenebileceği gibi yanıl yayılma potansiyeli bulunan kesitlerde şev yüksekliği arttıkça LD değeri (gerçekleşecek yanıl yayılma deformasyonu, cm) de artmaktadır. Buradan dolaylı olarak şev yüksekliği yanıl yayılma açısından riski arttırmaktadır denilebilir.



Şekil 8. NHR-13 için şev yüksekliği - yanıl deformasyon ilişkisi

Çalışmanın son aşamasında söz konusu sınıvlaşma haritasının, yanıl yayılma ve topoğrafik harita ile ilişkilendirilmesi ve çıkan sonuca göre bir değerlendirme yapılması amaçlanmıştır. Bununla birlikte ilişkilendirilecek olan haritalarda her bir segmentin sayısal büyüklükleri (LPI, LDI ve Kot “m”) farklı ölçeğe sahiptir. Bu bakımdan farklı ölçeklere sahip olan bu haritalar normalleştirilerek aynı ölçeğe çekilmiştir. Önceki bölümlerde sınıvlaşmanın değerlendirilmesi amacı ile hazırlanmış olan sınıvlaşma potansiyeli indeksi haritasında LPI değeri 15’den büyük olduğu alanların sınıvlaşma açısından en yüksek risk potansiyeline sahip olduğu belirtilmiştir. Bu nedenle haritadaki alanlar bu 15 değeri bölünerek sınıvlaşma haritası normalleştirilmiştir. Benzer şekilde yanıl yayılma ve topoğrafik haritalarda da ilgili segmentteki değeri maksimum değeri bölünerek normalleştirme yapılmıştır. Daha sonra normalleştirilmiş değeri ile tekrar tematik haritalar oluşturulmuştur (Şekil 9). Sonuçta tüm haritalar benzer ölçeğe sahip olduğundan hepsinin coğrafi bilgi sistemleri (CBS) ile ilişkilendirilerek yorumlanması mümkün olmuştur. Şekil 9’da normalleştirilmiş yükseklik, LPI ve LDI haritaları üst üste bindirilmiş, sayısal değeri toplanmış ve ortalaması alınmıştır. Oluşan ortalama haritası bir anlamda riskli alanları yansıtmaktadır. Zira tüm haritalarda 0’a yakın değeri düşük, 1’e yakın değeri ise yüksek riski ifade etmektedir. Dolayısı ile ortalamaları da aynı aralıkta kalmaktadır.



Şekil 9. Sakarya Nehri rehabilitasyonu risk haritası

Buna göre Şekil 9’da oluşturulan risk haritasında kırmızı renklere sahip olan bölgelerin en riskli bölgeler olduğu, ancak bu alanların da çok fazla yer tutmadığı anlaşılmaktadır. Yeşil alanlar düşük, sarı olanlar orta riskli bölgeleri temsil etmektedir.

Sonuç

Bu çalışmada Sakarya Nehri’nin 8 km uzunluğundaki kısmı, sıvılaşma potansiyeli ile nehir ve arazi kotları dikkate alınarak yanal yayılma riski açısından irdelenmiştir. CPT deney verilerinin analizi sonrasında nehrin iki yakasındaki çalışma alanı düşük, orta, yüksek ve çok yüksek riskli segmentlere ayrılmıştır. Yanal yayılma riski arazi kotunun yüksek olduğu, sıvılaşabilir tabakaların üst katmanlarda yoğunlaştığı durumlarda yüksek çıkmaktadır. CPT deneyi bu çalışmada coğrafi bilgi sistemleri ile birlikte değerlendirilerek sıvılaşma ve yanal yayılma analizlerinde etkin olarak kullanılmıştır. Çalışma sonunda güvenliğin ekonomik bir şekilde sağlanabilmesi için yöntem seçimine alt yapı oluşturulmuştur. Buna göre düşük ve orta riskli bölgelerde taş tahkimat gibi klasik yöntemlerin kullanılması ekonomik bir çözüm sağlayacaktır.

Kaynaklar

- [1] Robertson PK, Wride CE, (1998). “Evaluating cyclic liquefaction potential using the cone penetration test”. Canadian Geotechnical Journal, 35:442-459.
- [2] Zhang G, Robertson PK, Brachman RWI, (2004). “Estimating liquefaction-induced lateral displacements using the standard penetration test or cone penetration test”, ASCE Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 130:8:861-871.
- [3] MAPINFO User Manual
- [4] Seed HB, Idriss IM, (1971). “Simplified procedure for evaluating soil liquefaction potential”. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 97:9:1249-1273.
- [5] Iwasaki T, Tatsuoka F, Tokia K-i, Yasuda S, (1978). “A practical method for assessing soil liquefaction potential based on case studies at various sites in Japan”. Proc. 2nd International Conference on Microzonation, San Francisco, 885-896.
- [6] Toprak S, Holzer TL, (2003). “Liquefaction potential index: Field assessment”. ASCE Journal of Geotechnical Engineering, 129:4:315-322.
- [7] Ishihara K, Yoshimine M, (1992). “Evaluation of settlements in sand deposits following liquefaction during earthquakes”, Soils and Foundations 32:1:173-188.
- [8] Tatsuoka F, Zhou S, Sato T, Shibuya S, (1990). “Method of evaluating liquefaction potential and its application”. Rep. on Seismic hazards in the soil deposits in urban areas, Ministry of Education of Japan, 75-109 (in Japanese).
- [9] National Center For Earthquake Engineering Research, NCEER. (1997). Proc., NCEER Workshop on Evaluation of Liquefaction Resistance of Soils, TL Youd and IM Idriss, eds., Technical Rep. NCEER-97- 0022, Salt Lake City.