



## Determination of Liquefaction Potential Using SPT Test Data for the Kızılırmak Settlement Area in Sivas Province

Hacı Bekir Kara<sup>1,a</sup>, Esra Erdem<sup>2,b,\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Erciyes University, Kayseri, Turkey

<sup>2</sup>Graduate School of Natural and Applied Sciences, Erciyes University, Kayseri, Turkey

\*Corresponding author

### Research Article

#### History

Received: 12/07/2023

Accepted: 12/10/2023

#### Copyright



This work is licensed under  
Creative Commons Attribution 4.0  
International License

### ABSTRACT

From a geological point of view, the presence of young formed and moving plates constitutes the reality of the earthquake in our country. Earthquakes can cause damage to structures as well as decrease in bearing power and high deformations on their floors. This situation adversely affects even reliably designed and built structures. One of the biggest problems that occur on the ground because of earthquakes is liquefaction. In this study, the liquefaction potential of the Kızılırmak settlement area of Sivas province will be evaluated. The points examined are located around Kızılırmak, the groundwater level is high, it is very important to evaluate it in terms of liquefaction as it may be affected by earthquakes that may occur on the North Anatolian Fault Line or in the surrounding provinces. In the study, laboratory and terrain characteristics of the ground obtained by SPT experiment were determined. Liquefaction potentials were evaluated using scenario earthquakes obtained with empiric expressions. Liquefaction analyses were compared with SPT values obtained from research pits according to the Simplified Method obtained by Seed and Idriss (1971), Tokimatsu and Yoshimi (1983), Iwasaki et al. (1981) and Turkish Building Earthquake Regulation (TBER-2018).

**Keywords:** Liquefaction, Earthquake, SPT, TBER 2018, Seed and Idriss (1971)

## Sivas İli Kızılırmak Yerleşim Bölgesinin SPT Deneyi Verileri ile Sıvılaşma Potansiyelinin Belirlenmesi

### Araştırma Makalesi

#### Süreç

Geliş: 12/07/2023

Kabul: 12/10/2023

### ÖZ

Jeolojik açıdan bakıldığında genç oluşumlu ve hareketli levhaların varlığı ülkemizdeki deprem gerçeğini oluşturmaktadır. Depremler yapılar üzerinde hasar bırakabildiği gibi zeminlerinde de taşıma gücünün azalmasına ve yüksek deformasyonlara yol açabilmektedir. Bu durum güvenilir olarak tasarlanan ve inşa edilen yapıları bile olumsuz olarak etkilemektedir. Deprem etkisiyle zeminde oluşan en büyük sorunlardan biri de sıvılaşmadır. Bu çalışma içeriğinde Sivas ilinin Kızılırmak yerleşim bölgesinin sıvılaşma potansiyeli değerlendirilecektir. Bu bölgenin Kızılırmak'tan dolayı yeraltı su seviyesinin yüzeye yakın oluşu, çevredeki faylardan ve özellikle Kuzey Anadolu Fay Hattı'nda veya çevre illerde oluşabilecek depremlerden etkilenebileceğinden dolayı sıvılaşma potansiyelinin belirlenmesi ve değerlendirilmesi oldukça önemlidir. Yapılan çalışmada; arazide yapılan SPT deneylerinden ve alınan zemin örnekleri üzerinde yapılan laboratuvar deney sonuçlarından faydalanılmıştır. Ampirik ifadeler ile elde edilen senaryo depremleri kullanılarak bölgenin sıvılaşma potansiyeli; farklı araştırmacılar tarafından önerilen yöntemlerle Seed ve Idriss (1971), Tokimatsu ve Yoshimi (1983), Iwasaki vd. (1981) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018)'e göre karşılaştırmalı olarak değerlendirilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Sıvılaşma, SPT, Deprem, TBDY 2018, Seed ve Idriss (1971)

<sup>a</sup> [hbkara@erciyes.edu.tr](mailto:hbkara@erciyes.edu.tr)

<sup>b</sup> 0000-0002-6466-0281

<sup>b</sup> [erdemesra@gmail.com](mailto:erdemesra@gmail.com)

<sup>b</sup> 0000-0002-6466-0281

**How to Cite:** Kara H, Erdem E. (2023) Determination of Liquefaction Potential Using SPT Test Data for the Kızılırmak Settlement Area in Sivas Province, Journal of Science and Technology, 2(2): 80-91.

## Giriş

Yerkabuğunu oluşturan levhaların birbirine sürtünme, itme hareketleri sonucu oluşan enerjinin boşalması ile depremler meydana gelmektedir. Deprem esnasında oluşan gerilmeler levhaların dayanımını aşması durumunda ise levhalar üzerinde kırılmalar ve fay kırıkları meydana gelmektedir. Ülkemizde yer alan, yerkabuğundaki kırılmalar sonucu oluşan fay hatları ve fay bölgelerinde ağır hasar veren depremler meydana getirmektedir. Deprem sonucu oluşan yıkıcı etkileri önlemek adına yeterli önlemler alınmadığı takdirde can ve mal kaybı ile milli ekonomi bu durumdan olumsuz olarak etkilenmektedir.

Ülkemizde; Kuzey Anadolu Fay Hattı (KAF), Doğu Anadolu Fay Hatları (DAF) ile Batı Anadolu (BAF) ve İç Anadolu Fay Bölgeleri gibi aktif ve etkin deprem potansiyeli içeren yerler bulunmaktadır. Deprem yapıları etkilediği kadar zeminler üzerinde de olumsuz etkiler oluşturmaktadır. Deprem zeminlerde oluşturduğu en tehlikeli sorunlardan biri sıvılaşmadır. Sıvılaşma; deprem etkisi ile veya büyük titreşimler sonucu oluşan tekrarlı gerilmeler altında doygun zeminlerin boşluk suyu basıncının artmasına bağlı olarak kayma mukavemetinde ve zeminin taşıma kapasitesinin azalması, yüksek deformasyonların meydana gelmesi hatta bir sıvı gibi davranması olaydır. Sıvılaşma yeteneğine sahip zeminlerde yeraltı su seviyesi yüzeye yakınsa ve yeterli büyüklükte oluşan titreşimler söz konusu ise sıvılaşma sonucu zeminde mukavemet kaybı ve yüksek deformasyonlar büyük hasarlara yol açar.

Bu çalışmada; Sivas ili Kızılırmak çevresinde yer alan yerleşim bölgelerinin sıvılaşma potansiyeli arazide yapılan SPT deneyi verilerine dayanan farklı araştırmacıların önerdiği yöntemlerle incelenmiştir. Seed ve Idriss (1971), Tokimatsu ve Yoshimi (1983), Iwasaki vd. (1981) ve Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY-2018) analiz yöntemleri kullanılarak 6.0–6.5–7.0 büyüklüğündeki senaryo depremlerine göre karşılaştırmalı olarak bölgenin sıvılaşma potansiyeli belirlenmiştir.

Ülkemizde 18 Mart 2018 tarihinde Resmî Gazete’de yayımlanan ve Ocak 2019 itibari ile yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği’nde (TBDY 2018) ayrıntılı olarak yer alan sıvılaşma risk analizi yöntemi SPT verilerine dayalı bir analiz yöntemidir. Bu nedenle çalışmada SPT deneyi verilerine bağlı diğer analiz yöntemleri seçilerek hem TBDY 2018’in diğer yöntemlerle karşılaştırması yapılmıştır hem de bölgenin sıvılaşma riski araştırılmıştır.

## Sıvılaşma Analizleri

### Seed ve Idriss (1971) Basitleştirilmiş Yöntemi

Bu yöntemde; zeminde deprem veya tekrarlı yüklemeler sonucu elde edilen veriler ile çevrimsel gerilme oranı hesaplanır. (Seed vd., 1971)

$$CSR=0.65 \times \frac{a_{maks}}{g} \times \left( \frac{\sigma_{v_0}}{\sigma'_{v_0}} \right) \times r_d \quad (1)$$

Burada,

$a_{maks}$  : Deprem etkisiyle yüzeyde oluşan maksimum yatay yer ivmesi(m/sn<sup>2</sup>)

$g$  : Yer çekimi ivmesi (m/sn<sup>2</sup>)

$\sigma_{v_0}$  : Toplam düşey gerilme (kPa)

$\sigma'_{v_0}$  : Efektif düşey gerilme (kPa)

$$r_d = \frac{1,000 - 0,4113z^{0.5} + 0,04052z + 0,001753z^{1.5}}{1,000 - 0,4177z^{0.5} + 0,05729z - 0,006205z^{1.5} + 0,001210z^2} \quad (2)$$

ile gösterilmiştir.

Maksimum yer ivmesinin hesabı:

Eşitlik 1’de yer alan  $a_{maks}$ , çevrimsel yer hareketlerinin miktarını belirtmektedir. Bu ivme değer önceki deprem ve fay hatlarında dayanarak elde edilmektedir. Maksimum yer ivmesinin hesabında DESRA, SHAKE gibi bilgisayar yazılımları kullanılabileceği gibi literatürde bir çok araştırmacının sönüm denklemlerinde yer almaktadır. Beyaz(2004) zemin etkisinden uzak, maksimum yer ivmesi değeri için 64 lokasyonda yapmış olduğu çalışmalar sonucu Türkiye’ye özel, güvenilir ve güncel bir sönüm denklemi elde etmiştir. (Eşitlik 3). (Beyaz, 2004), (Duman, 2013)

$$\text{Log}a_{maks} = \beta_0 + (\beta_1 \times M^2) + (\beta_2 \times \log(R+1)) \quad (3)$$

Burada,

$$\beta_0 = 2,08; \beta_1 = 2,54 \times 10^{-2}; \beta_2 = -1,001$$

$a_{maks}$  : Verilen denklem kullanarak hesaplanan maksimum yer ivmesi (cm/s<sup>2</sup>)

$M$  : Moment magnitüd değeri ( $M_w$ )

$R$  : Mesafe (km cinsinden) ‘dir.

Çevrimsel direnç oranı ise zeminin SPT verilerinden elde edilen, zeminin sıvılaşma direnci ile ilgili bilgi verir. Eşitlik 4’teki gibi belirlenir.

$$CRR = \left[ \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{[10 \times N_{1,60f} + 45]^2} - \frac{1}{200} \right] \quad (4)$$

Burada;

$CRR_{7,5}$  : 7,5 şiddetindeki deprem için çevrimsel direnç oranı

$(N_1)_{60f}$  : %60 enerji iletim oranı ve ince tane oranı düzeltilmesi yapılmış SPT-N değeridir. Eşitlik 5 ile elde edilir.

$$N_{1,60f} = \alpha + \beta \times N_{1,60} \quad (5)$$

Eşitlik 5’te;

$N_{1,60}$  :Düzeltilme yapılmış SPT-N değeridir. Eşitlik 6 ile hesaplanır.

$$N_{1,60} = C_E * C_R * C_B * C_S * C_A * C_{BF} * C_C * N_a \quad (6)$$

$N_a$  : Ölçülen SPT-N değeri

$C_N$  : Efektif düşey basınç düzeltme katsayısı

$C_R$  : Tij uzunluğu düzeltme katsayısı

$C_S$  : Numune alma kılıf düzeltme katsayısı

$C_B$  :Sondaj çapı düzeltme katsayısı

$C_E$  : Enerji düzeltme katsayısıdır.

$\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları ise Eşitlik (7), (8), (9)’te verilmiştir.

$$IDO \leq \%5 \text{ için } \alpha=0; \beta=1.0 \quad (7)$$

$$\%5 < IDO < \%35 \text{ için } \alpha = \exp\left(1.76 - \frac{190}{(IDO)^2}\right);$$

$$\beta = \left[ 0,99 + \left( \frac{IDO}{1000} \right)^{1.5} \right] \quad (8)$$

$$IDO \geq 35 \text{ için } \alpha=5.0; \beta=1.2 \quad (9)$$

$IDO$  : İnce dane oranının yüzde cinsinden değeridir.

Güvenlik katsayısı (FS) Eşitlik (10) yardımıyla elde edilir.

$$FS = \left( \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \right) \times MSF \quad (10)$$

Burada,

$CSR$  : Deprem sebebiyle oluşan çevrimsel gerilme oranı

$CRR$  : Çevrimsel direnç oranı

$FS$  : Güvenlik faktörüdür.

$$MSF = 10^{2.24 / M_w^{2.56}} \quad (11)$$

Burada,

MSF : Deprem büyüklüğüne bağlı katsayı

M : Deprem momentinin magnitudü (büyüklüğü)

Eşitlik 10'da yer alan denkleme göre;

$FS \leq 1$  ise sivilaşma vardır,

$1 < FS \leq 1,2$  ise potansiyel sivilaşma vardır,

$FS > 1,2$  ise sivilaşma gerçekleşmez (Day, 2002).

### Tokimatsu ve Yoshimi (1983)

Tokimatsu ve Yoshimi (1983), çevrimsel gerilme oranı hesaplanırken yer hareketi ivmesi ve yer hareketinin devir sayısı olmak üzere iki veriden faydalanmıştır. (Mollamahmutoglu ve Babuucu, 2006)

$$CSR = \frac{a_{maks}}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \times r_d \times r_n \quad (12)$$

Burada;

$r_d$  : Gerilme azaltma katsayısı

$r_n$  : Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısıdır.

Tokimatsu ve Yoshimi (1983) gerilme düzeltme katsayısı için Eşitlik 13 kullanılarak hesaplanır.

$$r_d = 1 - 0,015 \times z \quad (13)$$

Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı ise Eşitlik 14 kullanılarak hesaplanır.

$$r_n = 0,1 \times (M - 1) \quad (14)$$

z derinlik iken, M deprem magnitudüdür.

Tokimatsu ve Yoshimi (1983), çevrimsel direnç oranını ise çalışmalarında zeminin kayma gerilmesi ile rölatif sıklığı arasındaki ilişkiyi kullanarak Eşitlik 15 'i elde etmişlerdir. Bu hesaplamada SPT-N değerlerini %80 enerji oranına göre belirleyerek kullanmışlardır. (Tokimatsu ve Yoshimi, 1983)

$$CRR = a C_r \times \left[ \left( \frac{16 \times \sqrt{(N_1)_{80} + \Delta N_f}}{100} \right) + \left( \frac{16 \times \sqrt{(N_1)_{80} + \Delta N_f}}{c_s} \right)^n \right] \quad (15)$$

Burada;

a = 0.45; n=14;  $\Delta N_f = 0$  (temiz kumlar);  $\Delta N_f = 5$  (siltli kumlar);  $C_r = 0.57$ ;  $C_s = 80-90$  arasında değerler alabilmektedir.

$$(N_1)_{80} = \frac{170}{\sigma'_{v0} + 70} \times N \quad (16)$$

Burada;

$(N_1)_{80}$  : %80 enerji oranına göre düzenlenmiş SPT- N değeri

N : Arazi de ölçülen SPT darbe sayısı

$$(N_1)_{80} = N \times C_R \times C_S \times C_B \times C_E \quad (17)$$

Burada;

$C_E$  : Enerji oranı düzeltme katsayısıdır. ( $C_E = 0,56$  olarak hesaplanmıştır.)

Tokimatsu ve Yoshimi (1983) analiz yönteminde ince tane oranına bağlı olarak belirlenen ince tane oranı düzeltme katsayıları Çizelge 1'de yer almaktadır.

Güvenlik sayısı (FS) aşağıdaki denklem ile hesaplanarak sivilaşma potansiyelleri elde edilir.

$$FS = \left( \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \right) \quad (18)$$

### Iwasaki vd. (1981)

Iwasaki vd. (1981) geliştirmiş olduğu çevrimsel gerilme oranı Eşitlik 19 ile hesaplanır. (Mollamahmutoglu vd., 2006)

$$CSR = \frac{a_{maks}}{g} \times \frac{\sigma_{v0}}{\sigma'_{v0}} \times r_d \quad (19)$$

Gerilme azaltma katsayısı ( $r_d$ ) Iwasaki vd. (1978) tarafından Eşitlik 20'deki gibi hesaplanır.

$$r_d = 1 - 0,015 \times z \quad (20)$$

z metre cinsinden sondaj kuyusu derinliğini temsil eder.

Iwasaki vd. (1981), devrimsel direnç oranının hesabını drenajsız basit kesme kutusu deneyinin sonuçlarından yararlanarak belirlemişlerdir. Bu hesap yönteminde SPT-N değerleri ve  $D_{50}$  ortalama çap değerleri bir arada kullanılır. Ortalama çap değerinin bilinmediği durumlarda ise zemin sınıfına göre Çizelge 2'den faydalanarak analiz yapılabilir.

Çizelge 1.  $\Delta N_f$  'in İnce Tane Oranı Oranına Göre Hesaplanması (Mollamahmutoglu ve Babuucu, 2006)

Table 1. Calculation of  $\Delta N_f$  According to the Fine Grain Ratio (Mollamahmutoglu and Babuucu, 2006)

İnce Tane Oranı(%)	$\Delta N_f$
0-5	0
5-10	ITO(%) - 5
10-	0,1 × ITO + 4

Çizelge 2. Farklı Zemin Türleri İçin Birim Hacim Ağırlıkları ve Ortalama Tane Çapı (Iwasaki, 1981)

Table 2. Unit Volume Weights and Average for Different Floor Types Grain Diameter (Iwasaki, 1981)

Zemin Sınıfı	Doğal Birim Ağırlığı (kN )/m <sup>3</sup>	Ortalama Tane Çapı $D_{50}$ (mm)
Yüzey zemini	17,0	0,020
Silt	17,5	0,025
Kumlu silt	18,0	0,040
Çok ince kum	18,5	0,100
İnce kum	19,5	0,150
Orta kum	20,0	0,350
İri kum	20,0	0,600
Çakıl	21,0	2,000

Çevrimsel direnç oranı ise belirli aralıklar arasındaki ortalama çap değerlerine göre Eşitlik 21 ve Eşitlik 22 kullanılarak hesaplanır.

$$0,04 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 0,6 \text{ mm için}$$

$$DDO_{7,5} = 0,0882 \times \sqrt{\frac{N}{\sigma_{v_0}^{+0,7}}} + 0,225 \times \log \frac{0,35}{D_{50}} \quad (21)$$

$$0,6 \text{ mm} \leq D_{50} \leq 1,5 \text{ mm için};$$

$$DDO_{7,5} = 0,0882 \times \sqrt{\frac{N}{\sigma_{v_0}^{+0,7}}} - 0,05 \quad (22)$$

Burada;

$CRR_{7,5}$  : 7,5 şiddetindeki deprem için çevrimsel direnç oranı

$N$  : Arazi ölçüle SPT-N değeri

$\sigma_{v_0}'$  : Düşey efektif gerilme ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$D_{50}$  : Ortalama dane çapı (mm)

Güvenlik katsayısı (FS) Eşitlik (23) yardımıyla elde edilir.

$$FS = \left( \frac{CRR_{7,5}}{CSR} \right) \times MSF \quad (23)$$

$$MSF = 10^{2,24} / M_w^{2,56} \quad (24)$$

Eşitlik 10'da yer alan denkleme göre;

$FS \leq 1$  ise sivilaşma vardır,

$1 < FS \leq 1,2$  ise potansiyel sivilaşma vardır,

$FS > 1,2$  ise sivilaşma gerçekleşmez. (Day, 2002)

### Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Sivilaşma Potansiyeli

Çevrimsel gerilme oranı diğer bir deyişle devrimsel kayma mukavemeti oranı (CRR) Eşitlik 25 ile hesaplanır. Bu denklemden kayma mukavemeti oranı 7,5 büyüklüğündeki deprem için hesaplanmıştır.

$$CRR = \left[ \frac{1}{34 - N_{1,60f}} + \frac{N_{1,60f}}{135} + \frac{50}{[10 \times N_{1,60f} + 45]^2} - \frac{1}{200} \right] \quad (25)$$

$N_{1,60f}$  değeri 34 olduğunda devrimsel gerilme oranı tanımsız olacağı için ince tane oranına göre düzenlenmiş SPT-N değerinin  $N_{1,60f} \geq 34$  olduğu durumda sivilaşma hesabı yapılmaz.

Arazide ölçülen SPT-N değerinin örtü gerilme düzeltmesi, tij uzunluğu, enerji oranı gibi düzeltmelerin yanında zeminin ince tane oranına göre düzeltilmesi için Eşitlik 26 kullanılır.

$$(N_1)_{60f} = \alpha + \beta \times (N_1)_{60} \quad (26)$$

Burada;

$(N_1)_{60f}$  : Düzeltilmiş SPT-N değeri

$\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları ince tane oranı yüzdesine göre elde edilir. Eşitlik 27, 28 ve 29 kullanılarak belirlenir.

$$IDI \leq \%5 \text{ için } \alpha=0; \quad \beta=1,0 \quad (27)$$

$$\%5 < IDI < \%35 \text{ için } \alpha = \exp\left(1,76 - \frac{190}{(IDI)^2}\right); \quad \beta = \left[0,99 + \left(\frac{IDI}{1000}\right)^{1,5}\right] \quad (28)$$

$$IDI \geq 35 \text{ için } \alpha=5,0; \quad \beta=1,2 \quad (29)$$

Deprem düzeltme katsayısı deprem büyüklüğü kullanılarak Eşitlik 30 ile hesaplanır.

$$C_M = \frac{10^{2,24}}{M_w^{2,56}} \quad (30)$$

Burada;

$C_M$  : Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı

$M_w$  : Tasarım depremi büyüklüğüdür. ( $M_w=7,5$  için  $C_M$  değeri 1'e eşittir.)

Sivilaşma direnci ( $\tau_R$ ) ise Eşitlik 31 ile hesaplanır. Birimi  $\text{kPa}'dır$ .

$$\tau_R = CRR_{M7,5} \cdot C_M \cdot \sigma_{v_0}' \quad (31)$$

Burada;

$\tau_R$  : Sivilaşma direnci

Deprem ile meydana gelen kayma gerilmesi Eşitlik 32 ile hesaplanır. Birimi  $\text{kPa}'dır$ .

$$\tau_{\text{deprem}} = 0,65 \cdot \sigma_{v_0} \cdot (0,4 \cdot S_{DS}) \cdot r_d \quad (32)$$

Burada;

$\sigma_{v_0}$  : Sivilaşma hesabı yapılan derinlikteki toplam düşey gerilmeyi,

$r_d$  : Hesabı yapılan derinliğe göre gerilme azaltma katsayısını,

$S_{DS}$  : Kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısını ifade eder.

( $S_{DS}$  AFAD'ın sitesinde yer alan sismik tehlike haritasından araştırma bölgesinin koordinatları girilerek elde edilir.)

Gerilme azaltma katsayısı ( $r_d$ ) araştırılan derinliğe ( $z$ ) bağlı olarak Eşitlik 33 ile elde edilir.

$$r_d = 1,0 - 0,00765 \cdot z \quad z \leq 9,15 \text{ m}$$

$$r_d = 1,174 - 0,0267 \cdot z \quad 9,15 \text{ m} < z \leq 23,00 \text{ m}$$

$$r_d = 0,744 - 0,008 \cdot z \quad 23,00 \text{ m} < z \leq 30,00 \text{ m}$$

$$r_d = 0,50 \quad z > 30,00 \text{ m} \quad (33)$$

Sivilaşmaya karşı güvenlik katsayısı Eşitlik 34 ile hesaplanır.

$$\frac{\tau_R}{\tau_{\text{deprem}}} \geq 1,10 \quad (34)$$

Burada;

$\tau_R$  : Sivilaşma direnci,

$\tau_{\text{deprem}}$  : Zeminde depremden oluşan ortalama tekrarlı kayma gerilmesini ifade etmektedir. (TBDY, 2018)

### Yapılan Çalışmalar

#### İnceleme Alanının Tanıtılması

Bu çalışma Sivas ili, Merkez ilçesinde Kızılırmak çevresinde bulunan yerleşim bölgelerinde gerçekleştirilmiştir. Sivas ili,  $35^\circ - 50^\circ$  ve  $38^\circ - 14^\circ$  doğu boylamları ile  $38^\circ - 32^\circ$  ve  $40^\circ - 16^\circ$  kuzey enlemleri arasında İç Anadolu Bölgesi, Yukarı Kızılırmak Bölümü'nde yer almakla birlikte  $28.488 \text{ km}^2$  yüz ölçümü ile ülkemizin en büyük ikinci ilidir.

Kentin jeolojisi genel olarak Milyosen, Pilyosen ve Kuvarterner litolojik birimler yer almaktadır. Hafik Formasyonu (Oligo-Miyosen), Tatlıcak Formasyonu (Orta-Üst Miyosen), İncesu Formasyonu (Pliyosen), Traverten (Kuvaterner), ve Alüvyonlar (Kuvaterner)' dan oluşmaktadır.

Sivas il merkezi ve yakın çevresi Türkiye'de aktif fay hattı olan Kuzey Anadolu Fay Hattı'nın yaklaşık 80 km uzaklıkta, şehrin güneyinde yer almaktadır. (Avcı vd., 1997)

#### Arazi Çalışmaları

Bu çalışmada Sivas ili, Merkez ilçesinde Kızılırmak akarsuyu etrafında yerleşime açılan alanların sivilaşma açısından riskli olması nedeniyle inceleme alanı olarak seçilmiştir. Çalışma alanının geoteknik özelliklerini belirlemek için  $3,2 \text{ km}^2$  lik bir alanda yapılmış olan ve

derinlikleri 1,5 m ile 20.0 m arasında değişen 19 adet sondaj kuyusundan yararlanılmıştır. Çalışma alanı eğimin % 0 – 10 arasında değiştiği, alüvyon biriminin kalınlığı 10 - 50 m. arasında olduğu bilinmektedir. Bölge genelinde SPT  $N_{30}$  değerleri 2 - 26, yer altı suyu seviyesi ise 2.50 – 5.00 m. arasında değişmektedir. Yapılan sondajlar, arazi ve laboratuvar deneyleri sonuçları inceleme bölgesindeki zeminlerin alüvyon (kil-kum-silt-çakıl) birimden oluştuğunu göstermektedir. Ayrıntılı zemin profili bilgileri sondaj loglarında verilmiştir.

### Sıvılaşma Potansiyelinin Değerlendirilmesi Seed ve Idriss (1971)

Bu kısımda daha önce verilen formüller ile SK-1 kuyusunun Basitleştirilmiş Analiz Yöntemi 'ne göre sıvılaşma potansiyeli hesaplanacaktır. Sondaj kuyusu 1'de yapılan arazi deneylerinden elde edilen örselenmiş ve örselenmemiş numuneler ile yapılan laboratuvar deneyleri sonuçlarına göre;

- zeminin doğal birim hacim ağırlığı  $19,20 \text{ kN/m}^3$ ,
- doymun birim hacim ağırlığı  $19.39 \text{ kN/m}^3$ ,
- içsel sürtünme açısı  $9^\circ$ ,
- yeraltı su seviyesi ise  $4,50 \text{ m}$  olarak bulunmuştur.

Toplam düşey gerilme ( $\sigma_{v0}$ ) ve efektif gerilme ( $\sigma_{v0}'$ ) Eşitlik 35 ve Eşitlik 36'da gösterildiği gibi hesaplanmaktadır.

$$\sigma_{v0} = \gamma_n \times h_1 \quad (35)$$

$$\sigma_{v0}' = \gamma_n \cdot z_w + (\gamma_d - \gamma_w)(z - z_w) \quad (36)$$

Burada;

- $\gamma_n$  : Zeminin doğal birim hacim ağırlığı
- $\gamma_d$  : Suyu doymun zeminin birim hacim ağırlığı
- $\gamma_w$  : Suyun birim hacim ağırlığı
- $z$  : Zeminin derinliği
- $z_w$  : Zeminin su seviyesidir.

Eşitlik 6' daki formülü kullanarak elde edilen  $(N_1)_{60}$  değerleri Çizelge 3'te yer almaktadır. Formülde yer alan tij boyu düzeltme faktörü ( $C_R$ ) derinliğe bağlı olarak elde edilmiştir. Türkiye'de yapılan Standart Penetrasyon Deneyleri'nde teorik enerjinin % 45'ini ileten bir tokmak kullanılmasından, enerji düzeltme katsayısı ( $C_E$ ) 0,75 olarak alınmıştır. Derinlik düzeltme katsayıları ise Liao ve Whitman (1986) eşitliği kullanarak hesaplanmıştır. Youd vd.'ye (2001) göre  $C_N$  değerleri 1,7 değerini geçemeyeceğinden bu değeri geçmesi sonucunda katsayı yine 1,7 olarak alınmıştır. Numune alma metodu ( $C_s$ ) katsayısı 1.20, kuyu çapı ( $C_B$ ) katsayısı ise 1,00 olarak alınmıştır ayrıca SPT-N değerleri için yer altı su seviyesi düzeltmesi yapılmıştır. İnce dane oranı ise Eşitlik 5, 7, 8 ve 9 kullanarak belirlenir. Öncelikle  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları elde edilerek Eşitlik 5'te yerine konulması ile  $N_{1.60f}$  değeri bulunur.

İnceleme alanında Seed ve Idriss (1971) tarafından bulunan, Seed vd. (1985) ve Youd vd. (2001) tarafından geliştirilen Basitleştirilmiş Yöntem'ini kullanarak yapılacak hesaplarda sıvılaşma için değerlendirilecek magnitüd değerleri için 6.0, 6.5 ve 7.0 senaryo depremleri uygulanmıştır. Çizelge 4'te senaryo depremleri için beklenen maksimum yer hareketi ivmelerine ve deprem büyüklüğü düzenleme faktörlerine yer verilmiştir.



Şekil 1. İnceleme Alanı ve Sondaj Noktaları  
Figure 1. Inspection Area and Drilling Points

Çizelge 3. Seed ve Idriss (1971) Yöntemine Göre SK-1 Düzeltme Katsayıları  
Table 3. SK-1 Correction Coefficients According to the Seed and Idriss (1971) Method

Derinlik (m)	YASS (m)	SPT-N Arazi	Zemin Tipi	N'	Düşey Toplam Gerilme, $\sigma_{vo}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Düşey Efektif Gerilme, $\sigma'_{vo}$ (kN/m <sup>2</sup> )	Derinlik Düzeltme Katsayısı (C <sub>N</sub> )	Tij Boyu Düzeltme Katsayısı (C <sub>R</sub> )	Düzenlenmiş SPT-N Değeri (N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>
1,50	4,50	-	-	-	28,80	28,80	-	-	-
3,00	4,50	4	CL	4	57,60	57,60	1,32	0,75	3,56
4,50	4,50	3	CL	3	86,40	86,40	1,08	0,85	2,47
6,00	4,50	3	CL	3	115,20	100,49	0,99	0,95	2,56
7,50	4,50	0	CL	0	144,00	114,57	0,93	0,95	0,00
9,00	4,50	0	CL	0	172,80	128,66	0,88	1,00	0,00
10,5	4,50	5	CL	5	201,60	142,74	0,84	1,00	3,77
12,00	4,50	6	CL	6	230,40	156,83	0,80	1,00	4,31
13,50	4,50	28	SC	21,5	259,20	170,91	0,76	1,00	14,80
15,00	4,50	34	GC	24,5	288,00	185,00	0,73	1,00	16,21
16,50	4,50	39	GC	27	316,80	199,08	0,70	1,00	17,22
18,00	4,50	32	GC	23,5	345,60	213,17	0,67	1,00	14,49
19,50	4,50	42	GC	28,5	374,40	227,25	0,66	1,00	17,02

Çizelge 4. Senaryo Depremleri için Beklenen Maksimum Yer İvmeleri ( $a_{maks}$ ) ve Deprem Büyüklüğü Düzeltme Faktörleri (MSF)  
Table 4. Maximum Expected Ground Accelerations for Scenario Earthquakes ( $a_{maks}$ ) and Earthquake Magnitude Correction Factors (MSF)

Deprem Büyüklüğü (Mw)	$a_{maks}$ (R=63) km	MSF
6.0	0,153g	1,77
6.5	0,221g	1,44
7.0	0,329g	1,19



Şekil 2.  $a_{maks}$ 'in Belirlenmesinde Kullanılan Odak Uzaklığı  
Figure 2. Focal Length Used to Determine  $a_{max}$

Bu senaryo deprem büyüklüklerine ait maksimum yer ivmesi (PGA) değerleri için Beyaz (2014) tarafından geliştirilen formül kullanılmıştır. Bu formül için 1916 yılında Tokat'ın Almus ilçesinde meydana gelen 7.1

büyüklüğündeki deprem verileri kullanılmıştır. Bu depremin gerçekleştiği noktanın araştırılan bölgeye olan odak uzaklığı yaklaşık olarak 63 km olarak alınmıştır ( Şekil 2).

Maksimum yer ivmesi belirlendikten sonra devrinsel gerilme oranını hesaplamak için Eşitlik (1)' de yer alan gerilme azaltma katsayısı,  $r_d$  Eşitlik 2 ile belirlenir. Daha önce elde ettiğimiz  $(N_1)_{60f}$  değeri Eşitlik 4'te yerine yazılarak ile devrinsel direnç oranı hesaplanır. Hesaplanan devrinsel direnç oranı, deprem anında oluşan devrinsel gerilme oranına bölünerek sıvılaşmaya karşı güvenlik faktörü hesaplanır. Kullanılan senaryo deprem büyüklükleri 7.5'ten farklı olduğundan dolayı Eşitlik 11 ile magnitüd düzeltme faktörü bulunur ve Eşitlik 10 ile güvenlik faktörü hesaplanır (Çizelge 5).

Güvenlik faktörünün 1 ve 1'den küçük olduğu durumlarda sıvılaşmanın mevcut olduğu; 1 ile 1,2 arasında potansiyel sıvılaşmanın var olduğu; 1,2'den büyük olduğu durumlarda ise sıvılaşmanın mevcut olmadığı kabul edilmiştir.

### **Tokimatsu ve Yoshimi (1983)**

Bu yöntemde SPT-N değerlerinin düzeltilmesi için Eşitlik 6'daki formül kullanarak elde edilen  $(N_1)_{60}$  değerleri

Çizelge 6'da yer almaktadır. Burada yer alan tij boyu düzeltme faktörü ( $C_R$ ) derinlik esas alınarak belirlenmiştir. Standart Penetrasyon Deneylemlerinde teorik enerjinin % 80'ini iletildiği varsayılarak enerji düzeltme katsayısı  $C_E=45/80=0,56$  olarak alınmıştır. Derinlik düzeltme katsayılarının hesabında ise Liao ve Whitman (1986) eşitliğinden faydalanılmıştır. Youd vd.'ye (2001) göre  $C_N$  değerleri 1,7'den büyük olmaması gerekir. Bu değer 1,7'yi geçmesi durumunda katsayı yine 1,7 alınmıştır.  $C_S$  katsayısı 1.20,  $C_B$  katsayısı ise 1.00 olarak alınmıştır. Ayrıca SPT-N değerleri için yeraltı su seviyesi düzeltmesi yapılmıştır.

Daha önce gösterildiği üzere devrinsel gerilme oranı Eşitlik 12 kullanarak hesaplanır. Basitleştirilmiş Analiz formülünden farklı olarak ise deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı,  $r_n$  kullanılır. Deprem büyüklüğü düzeltme katsayısı Eşitlik 14 ile hesaplanır. Devrinsel direnç oranı ise Eşitlik 15 ile elde edilir. Son olarak güvenlik katsayısı Eşitlik 18 kullanılarak belirlenmiştir.

Çizelge 5. Seed ve Idriss (1971) Yöntemine Göre SK-1 Analiz Sonuçları

Table 5. SK-1 Analysis Results According to Seed and Idriss (1971) Method

Derinlik (m)	$r_d$	IDO	$\alpha$	$\beta$	$(N_1)_6$ 0	$(N_1)_{60}$ f	CRR	$CSR_{M=6}$ 6	$CSR_{M=6}$ 5	$CSR_{M=7}$ 0	FS M=6 6	FS M=6. 5	FS M=7 7
1,50	0,989	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,00	0,977	92	5	1,2	3,56	9,27	0,107	0,097	0,140	0,209	1,94	1,10	0,61
4,50	0,966	90	5	1,2	2,47	7,96	0,096	0,096	0,139	0,207	1,76	0,99	0,55
6,00	0,954	89	5	1,2	2,56	8,07	0,097	0,109	0,157	0,234	1,57	0,88	0,49
7,50	0,943	8,0	0,30	1,01	0,00	0,30	0,049	0,118	0,170	0,253	0,73	0,41	0,23
9,00	0,931	15,0	2,50	1,05	0,00	2,50	0,055	0,124	0,180	0,267	0,79	0,44	0,25
10,5	0,894	9,5	0,71	1,02	3,77	4,55	0,069	0,126	0,181	0,270	0,97	0,55	0,30
12,00	0,854	5	0	1	4,31	4,31	0,067	0,125	0,180	0,268	0,95	0,54	0,30
13,50	0,814	3	0	1	14,80	14,80	0,158	0,123	0,177	0,264	2,28	1,28	0,71
15,00	0,774	4,9	0	1	16,21	16,21	0,172	0,120	0,173	0,258	2,55	1,43	0,80
16,50	0,733	4,9	0	1	17,22	17,22	0,183	0,116	0,168	0,249	2,80	1,57	0,87
18,00	0,693	4,9	0	1	14,49	14,49	0,155	0,112	0,161	0,240	2,45	1,38	0,77
19,50	0,653	4,9	0	1	17,02	17,02	0,181	0,107	0,155	0,230	2,99	1,69	0,94

Çizelge 6. Tokimatsu ve Yoshimi (1983) Yöntemine Göre SK-1 Düzeltme Katsayıları  
Table 6. SK-1 Correction Coefficients According to Tokimatsu and Yoshimi (1983) Method

Derinlik (m)	YASS (m)	SPT-N Arazi	N'	Düşey Toplam Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ), $\sigma_{vo}$	Düşey Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ), $\sigma'_{vo}$	Derinlik Düzeltme Katsayısı (C <sub>N</sub> )	Tij Boyu Düzeltme Katsayısı (C <sub>R</sub> )	Düzenlenmiş SPT-N Değeri (N <sub>1</sub> ) <sub>80</sub>
1,50	4,50	-	-	28,80	28,80	-	-	-
3,00	4,50	4	4	57,60	57,60	1,33	0,75	2,69
4,50	4,50	3	3	86,40	86,40	1,07	0,85	1,86
6,00	4,50	3	3	115,20	100,49	0,99	0,95	1,91
7,50	4,50	0	0	144,00	114,57	0,92	0,95	0,00
9,00	4,50	0	0	172,80	128,66	0,86	0,95	0,00
10,5	4,50	5	5	201,60	142,74	0,80	1,00	2,68
12,00	4,50	6	6	230,40	156,83	0,75	1,00	3,02
13,50	4,50	28	21,5	259,20	170,91	0,70	1,00	10,20
15,00	4,50	34	24,5	288,00	185,00	0,66	1,00	10,98
16,50	4,50	39	27	316,80	199,08	0,63	1,00	11,46
18,00	4,50	32	23,5	345,60	213,17	0,60	1,00	9,48
19,50	4,50	42	28,5	374,40	227,25	0,58	1,00	10,95

Çizelge 7. Tokimatsu ve Yoshimi (1983) Yöntemine göre SK-1 Analiz Sonuçları  
Table 7. SK-1 Analysis Results According to Tokimatsu and Yoshimi (1983) Method

Derinlik (m)	r <sub>d</sub>	IDO	(N <sub>1</sub> ) <sub>80</sub>	$\Delta n_f$	CRR	CSR <sub>M=6</sub>	CSR <sub>M=6.5</sub>	CSR <sub>M=7.0</sub>	FS M=6	FS M=6.5	FS M=7
1,50	0,977	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,00	0,955	92	2,69	13,2	0,195	0,073	0,116	0,189	<b>2,67</b>	<b>1,68</b>	<b>1,04</b>
4,50	0,932	90	1,86	13	0,171	0,071	0,113	0,184	<b>2,40</b>	<b>1,51</b>	<b>0,93</b>
6,00	0,91	89	1,91	12,9	0,166	0,080	0,127	0,206	<b>2,08</b>	<b>1,31</b>	<b>0,81</b>
7,50	0,887	8,0	0,00	3	0,091	0,085	0,136	0,220	<b>1,07</b>	<b>0,67</b>	<b>0,42</b>
9,00	0,865	15,0	0,00	5,5	0,108	0,089	0,141	0,229	<b>1,21</b>	<b>0,76</b>	<b>0,47</b>
10,5	0,842	9,5	2,68	4,5	0,123	0,091	0,145	0,235	<b>1,35</b>	<b>0,85</b>	<b>0,52</b>
12,00	0,82	5	3,02	0	0,059	0,092	0,146	0,238	<b>0,65</b>	<b>0,41</b>	<b>0,25</b>
13,50	0,797	3	10,20	0	0,145	0,092	0,147	0,239	<b>1,57</b>	<b>0,99</b>	<b>0,61</b>
15,00	0,775	4,9	10,98	0	0,145	0,092	0,147	0,238	<b>1,57</b>	<b>0,99</b>	<b>0,61</b>
16,50	0,752	4,9	11,46	0	0,140	0,092	0,145	0,236	<b>1,53</b>	<b>0,96</b>	<b>0,59</b>
18,00	0,73	4,9	9,48	0	0,136	0,091	0,144	0,234	<b>1,51</b>	<b>0,95</b>	<b>0,58</b>
19,50	0,707	4,9	10,95	0	0,133	0,089	0,142	0,230	<b>1,49</b>	<b>0,94</b>	<b>0,58</b>

### Iwasaki vd. (1981) yöntemi

SPT-N değerlerinin düzeltilmesi için Eşitlik 6'daki formüller kullanarak elde edilen (N<sub>1</sub>)<sub>60</sub> değerleri Çizelge 8'de verilmiştir. Burada yer alan tij boyu düzeltme faktörü derinliğe bağlı olarak alınmıştır. Derinlik düzeltme katsayılarının hesabında ise Liao ve Whitman (1986) eşitliğinden faydalanılmıştır. Youd vd.'ye (2001) göre C<sub>N</sub> değerleri 1,7'den büyük olmaması gerekir. Geçmesi

durumunda katsayı yine 1,7 alınmıştır. C<sub>s</sub> katsayısı 1.20, C<sub>b</sub> katsayısı ise 1,00 olarak alınmıştır. Enerji oranı düzeltme katsayısı (C<sub>E</sub>), çalışmada kullanılan şahmerdan halatlı ve iki tur sarım tipinde olduğu için enerji iletimi ortalama % 45'tir. Seed ve Idris (1971) yönteminde kullanılabilmesi için %60 enerji oranına göre hesaplanması gerekmektedir bu yüzden C<sub>E</sub> = 45/60= 0,75 olarak hesaplanmıştır. SPT-N değerleri için yeraltı su seviyesi düzeltmesi yapılmıştır.



Çizelge 8. Iwasaki vd.1981 Yöntemine Göre SK-1 Düzeltme Katsayıları

Table 8. SK-1 correction coefficients according to Iwasaki et al.1981 Method

Derinlik (m)	YASS (m)	SPT-N Arazi	N'	Düşey Toplam Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ), $\sigma_{vo}$	Düşey Efektif Gerilme (kN/m <sup>2</sup> ), $\sigma'_{vo}$	Derinlik Düzeltme Katsayısı (C <sub>N</sub> )	Tij Boyu Düzeltme Katsayısı (C <sub>R</sub> )	Düzenlenmiş SPT-N Değeri (N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>
1,50	4,50	-	-	28,80	28,80	-	-	-
3,00	4,50	4	4	57,60	57,60	1,32	0,75	3,56
4,50	4,50	3	3	86,40	86,40	1,08	0,85	2,47
6,00	4,50	3	3	115,20	100,49	1,00	0,95	2,56
7,50	4,50	0	0	144,00	114,57	0,93	0,95	0,00
9,00	4,50	0	0	172,80	128,66	0,88	1,00	0,00
10,5	4,50	5	5	201,60	142,74	0,84	1,00	3,77
12,00	4,50	6	6	230,40	156,83	0,80	1,00	4,31
13,50	4,50	28	21,5	259,20	170,91	0,76	1,00	14,80
15,00	4,50	34	24,5	288,00	185,00	0,74	1,00	16,21
16,50	4,50	39	27	316,80	199,08	0,71	1,00	17,22
18,00	4,50	32	23,5	345,60	213,17	0,68	1,00	14,49
19,50	4,50	42	28,5	374,40	227,25	0,66	1,00	17,02

Çizelge 9. Iwasaki vd.1981 Yöntemine Göre SK-1 Analiz Sonuçları

Table 9. SK-1 Analysis Results According to Iwasaki et al.1981 Method

Derinlik (m)	rd	(N <sub>1</sub> ) <sub>60</sub>	CRR	CSR <sub>M=6</sub>	CSR <sub>M=6.5</sub>	CSR <sub>M=7.0</sub>	FS M=6	FS M=6.5	FS M=7
1,50	0,977	-	-	-	-	-	-	-	-
3,00	0,955	3,56	0,311	0,146	0,211	0,314	<b>3,77</b>	<b>2,12</b>	<b>1,18</b>
4,50	0,932	2,47	0,241	0,143	0,206	0,307	<b>3,00</b>	<b>1,69</b>	<b>0,94</b>
6,00	0,91	2,56	0,233	0,160	0,231	0,343	<b>2,59</b>	<b>1,46</b>	<b>0,81</b>
7,50	0,887	0,00	0,093	0,171	0,246	0,367	<b>0,97</b>	<b>0,54</b>	<b>0,30</b>
9,00	0,865	0,00	0,093	0,178	0,257	0,382	<b>0,93</b>	<b>0,52</b>	<b>0,29</b>
10,5	0,842	3,77	0,236	0,182	0,263	0,391	<b>2,30</b>	<b>1,29</b>	<b>0,72</b>
12,00	0,82	4,31	0,239	0,184	0,266	0,396	<b>2,29</b>	<b>1,29</b>	<b>0,72</b>
13,50	0,797	14,80	0,352	0,185	0,267	0,398	<b>3,37</b>	<b>1,90</b>	<b>1,05</b>
15,00	0,775	16,21	0,354	0,185	0,267	0,397	<b>3,39</b>	<b>1,91</b>	<b>1,06</b>
16,50	0,752	17,22	0,352	0,183	0,264	0,394	<b>3,40</b>	<b>1,92</b>	<b>1,06</b>
18,00	0,73	14,49	0,323	0,181	0,262	0,389	<b>3,15</b>	<b>1,78</b>	<b>0,99</b>
19,50	0,707	17,02	0,334	0,178	0,257	0,383	<b>3,32</b>	<b>1,87</b>	<b>1,04</b>

Daha önce bahsedildiği gibi devrinsel gerilme oranı Eşitlik 19'da verildiği gibi hesaplanır. Bu formülde geçen gerilme azaltma katsayısı derinliğe bağlı olarak Eşitlik 20 ile elde edilir. devrinsel direnç oranı ortalama tane çapına değerine göre Eşitlik 21 ve 22 denklemlerinden uygun olanı

seçilerek belirlenir. Ortalama dane çapı ise zeminin birim hacim ağırlığına bağlı olarak Çizelge 2'den alınır. (Doğal birim hacim ağırlığı 19,2 olduğundan ortalama tane çapı D<sub>50</sub> =0,135 mm olarak alınır.)

### Türkiye Bina Deprem Yönetmeliğine Göre Sıvılaşma Potansiyeli

Bu analiz yönteminde SPT-N değerlerinin düzeltilmesi için Eşitlik 6'daki formül kullanarak elde edilen  $(N_1)_{60}$  değerleri Çizelge 10'da verilmiştir. Burada yer alan  $t_{ij}$  boyu düzeltme ( $C_R$ ) faktörü derinliğe bağlı olarak belirlenmiştir. Türkiye'de yapılan Standart Penetrasyon Deneyleri'nde teorik enerjinin %45'ini ileten bir tokmak kullanıldığından enerji düzeltme katsayısı  $C_E=0,75$  olarak alınmıştır. Derinlik düzeltme katsayıları ise Liao ve Whitman (1986) eşitliği ile hesaplanmıştır. Youd vd.'ye (2001) göre  $C_N$  değerleri 1,7'den büyük olmaması gerekir geçmesi durumunda katsayı yine 1,7 alınmıştır.  $C_S$  katsayısı 1.20,  $C_B$  katsayısı ise 1,00 olarak alınmıştır. SPT-N değerleri için yer altı su seviyesi düzeltilmesi yapılmıştır.

TBDY 2018 analiz yöntemine göre sıvılaşma direnci ( $\tau_R$ ) Eşitlik 31 ile, formülde geçen devirsel direnç oranı Eşitlik 25 ile hesaplanır. İnce dane oranı ise Eşitlik 26, 27, 28 ve 29'de yer alan formüller ile belirlenir. Öncelikle  $\alpha$  ve  $\beta$  katsayıları elde edilerek Eşitlik 26 kullanılarak  $N_{1,60f}$  değeri bulunur. Sıvılaşma

direncinde geçen bir diğer parametre olan deprem düzeltme katsayısı  $C_M$  ise Eşitlik 30 ile hesaplanır.

Deprem düzeltme katsayısı aşağıda verilmiştir.

$$C_M = \frac{10^{2.24}}{M_w^{2.56}}$$

$M_w$  : Tasarım depreminin moment büyüklüğüdür

$M_w = 6.0$  için  $C_M = 1.77$

$M_w = 6.5$  için  $C_M = 1.44$

$M_w = 7.0$  için  $C_M = 1.19$

$S_{DS}$ , kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı ise inceleme alanının koordinatları ile

AFAD'ın sitesinden  $S_{DS} = 0,789$  olarak belirlenmiştir.

Deprem ile meydana gelen kayma gerilmesi Eşitlik 32 ile hesaplanır. Bu eşitlikte bulunan  $\sigma_{v0}$ , sıvılaşma değerlendirilmesi yapılan derinlikteki toplam düşey gerilmeyi;  $r_d$ , ilgili derinlikteki gerilme azaltma katsayısını Eşitlik 33 ile hesaplanır. Güvenlik faktörü ise Eşitlik 34 kullanılarak ise yani sıvılaşma direncinin, deprem kayma gerilmesine bölünmesiyle elde edilir. SK-1 sondaj kuyusu sıvılaşma potansiyelleri aşağıda Çizelge 11'de verilmiştir.

Çizelge 10. TBDY 2018 Deprem Yönetmeliğine göre SK-1 Düzeltme Katsayıları

Table 10. TBDY SK-1 Correction Coefficients according to 2018 Earthquake Regulation

Derinlik (m)	YASS (m)	SPT-N Arazi	N'	Düşey Toplam Gerilme ( $kN/m^2$ ), $\sigma_{v0}$	Düşey Efektif Gerilme ( $kN/m^2$ ), $\sigma'_{v0}$	Derinlik Düzeltme Katsayısı ( $C_N$ )	Tij Boyu Düzeltme Katsayısı ( $C_R$ )	Düzenlenmiş SPT-N Değeri ( $(N_1)_{60}$ )
1,50	4,50	-	-	28,80	28,80	-	-	-
3,00	4,50	4	4	57,60	57,60	1,29	0,75	3,48
4,50	4,50	3	3	86,40	86,40	1,05	0,85	2,41
6,00	4,50	3	3	115,20	100,49	0,98	0,95	2,50
7,50	4,50	0	0	144,00	114,57	0,91	0,95	0,00
9,00	4,50	0	0	172,80	128,66	0,86	1,00	0,00
10,5	4,50	5	5	201,60	142,74	0,82	1,00	3,68
12,00	4,50	6	6	230,40	156,83	0,78	1,00	4,22
13,50	4,50	28	21,5	259,20	170,91	0,75	1,00	14,48
15,00	4,50	34	24,5	288,00	185,00	0,72	1,00	15,85
16,50	4,50	39	27	316,80	199,08	0,69	1,00	16,84
18,00	4,50	32	23,5	345,60	213,17	0,67	1,00	14,17
19,50	4,50	42	28,5	374,40	227,25	0,65	1,00	16,64

Çizelge 11. TBDY 2018 Deprem Yönetmeliğine göre SK-1 Analiz Sonuçları

Table 11. TBDY 2018 SK-1 Analysis Results According to Earthquake Regulation

Derinlik (m)	$r_d$	IDO	A	$\beta$	$(N_1)_{60}$	$(N_1)_{60f}$	CRR	$\tau_R$ ( $kN/m^2$ ) M=6.0	$\tau_R$ ( $kN/m^2$ ) M=6.5	$\tau_R$ ( $kN/m^2$ ) M=7.0	$\tau_{deprem}$ ( $kN/m^2$ )	FS M=6.0	FS M=6.5	FS M=7.0
1,50	0,989	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
3,00	0,977	92	5	1,2	3,48	9,18	0,106	10,80	8,79	7,26	11,56	<b>0,93</b>	<b>0,76</b>	<b>0,63</b>
4,50	0,966	90	5	1,2	2,41	7,90	0,095	14,54	11,83	9,77	17,14	<b>0,85</b>	<b>0,69</b>	<b>0,57</b>
6,00	0,954	89	5	1,2	2,50	8,00	0,096	17,07	13,88	11,47	22,57	<b>0,76</b>	<b>0,62</b>	<b>0,51</b>
7,50	0,943	8,0	0,30	1,01	0,00	0,30	0,049	9,85	8,02	6,63	27,89	<b>0,35</b>	<b>0,29</b>	<b>0,24</b>
9,00	0,931	15,0	2,50	1,05	0,00	2,50	0,055	12,63	10,28	8,49	33,04	<b>0,38</b>	<b>0,31</b>	<b>0,26</b>
10,5	0,894	9,5	0,71	1,02	3,68	4,47	0,068	17,22	14,01	11,58	37,02	<b>0,47</b>	<b>0,38</b>	<b>0,31</b>
12,00	0,854	5	0	1	4,22	4,22	0,066	18,43	14,99	12,39	40,41	<b>0,46</b>	<b>0,37</b>	<b>0,31</b>
13,50	0,814	3	0	1	14,48	14,48	0,155	46,84	38,11	31,49	43,34	<b>1,08</b>	<b>0,88</b>	<b>0,73</b>
15,00	0,774	4,9	0	1	15,85	15,85	0,169	55,26	44,96	37,15	45,79	<b>1,21</b>	<b>0,98</b>	<b>0,81</b>
16,50	0,733	4,9	0	1	16,84	16,84	0,179	63,13	51,36	42,44	47,70	<b>1,32</b>	<b>1,08</b>	<b>0,89</b>
18,00	0,693	4,9	0	1	14,17	14,17	0,152	57,28	46,60	38,51	49,19	<b>1,16</b>	<b>0,95</b>	<b>0,78</b>
19,50	0,653	4,9	0	1	16,64	16,64	0,177	71,19	57,92	47,86	50,22	<b>1,42</b>	<b>1,15</b>	<b>0,95</b>

Diğer sondaj kuyularının analiz sonuçları SK-1'deki gibi hesaplanarak Çizelge 12'de verilmiştir

Çizelge 12. Diğer Sondaj Kuyularının Analiz Sonuçları

Table 12. Analysis Results of Other Drilling Wells

Sk	Seed Ve Idriss (1971) Yöntemine Göre			Tokimatsu Ve Yoshimi (1983) Yöntemine Göre			Iwasaki Vd.1981 Yöntemine Göre			Tbdy 2018 Deprem Yönetmeliğine Göre		
	M <sub>w</sub> =6. 0	M <sub>w</sub> =6. 5	M <sub>w</sub> =7. 0	M <sub>w</sub> =6. 0	M <sub>w</sub> =6. 5	M <sub>w</sub> =7. 0	M <sub>w</sub> =6. 0	M <sub>w</sub> =6. 5	M <sub>w</sub> =7. 0	M <sub>w</sub> =6. 0	M <sub>w</sub> =6. 5	M <sub>w</sub> =7. 0
Sk -1	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -2	Risk	Var	Var	Yok	Var	Var	Yok	Yok	Var	Var	Var	Var
Sk -3	Risk	Var	Var	Yok	Var	Var	Risk	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -4	Var	Var	Var	Risk	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -5	Yok	Var	Var	Yok	Risk	Var	Yok	Yok	Var	Var	Var	Var
Sk -6	Var	Var	Var	Risk	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -7	Risk	Var	Var	Risk	Var	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -8	Var	Var	Var	Yok	Var	Var	Risk	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -9	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Risk	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -10	Var	Var	Var	Risk	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -11	Var	Var	Var	Risk	Var	Var	Yok	Risk	Var	Var	Var	Var
Sk -12	Yok	Var	Var	Yok	Var	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -13	Risk	Var	Var	Yok	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -14	Yok	Var	Var	Yok	Var	Var	Yok	Yok	Var	Var	Var	Var
Sk -15	Risk	Var	Var	Yok	Var	Var	Yok	Yok	Var	Var	Var	Var
Sk -16	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -17	Risk	Var	Var	Yok	Var	Var	Risk	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -18	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var	Var
Sk -19	Risk	Var	Var	Yok	Var	Var	Yok	Risk	Var	Var	Var	Var

## Sonuç ve Öneriler

Bu çalışma Sivas ili Kızılırmak çevresinde yer alan Üçlerbey Mahallesi, Kızılırmak Mahallesi ve Kılavuz Mahallesi'nin zeminlerinin senaryo depremleri etkisi altında sivilaşma potansiyellerini elde etmek amacıyla yapılmıştır. Çalışma kapsamında; 3.2 km<sup>2</sup> alanın içinde, inceleme derinliği 1,5 - 19,5 m arasında değişen 19 adet sondaj logları kullanılarak Seed ve Idriss (1971), Tokimatsu ve Yoshimi (1983) ve Iwasaki vd. (1981) ve TBDY-2018 sivilaşma analizleri  $M_w=6.0$ ,  $M_w=6.5$  ve  $M_w=7.0$  senaryo deprem büyüklüklerine göre sivilaşma potansiyelleri değerlendirilmiştir.

Çalışma alanı Kızılırmak boyunca çökelmiş kum, kil, silt ve çakıl alüvyon birikintilerinden oluşmakta ve YAS seviyesi 1,5-6 m arasında değişmektedir.

Bu çalışmanın sonuçları:

Seed ve Idriss (1971) yöntemine göre yapılan analizlerde, 6,0 büyüklüğündeki senaryo depremde SK-1, SK-4, SK-6, SK-8, SK-9, SK-10, SK-11, SK-16 ve SK-18 sondaj kuyularında sivilaşma tespit edilmiştir. SK-2, SK-3, SK-7, SK-13, SK-15 SK-17 ve SK-19'da sivilaşma riski görülmemiştir. 6,5 büyüklüğündeki depremde ve 7,0 büyüklüğündeki senaryo depremde tüm sondaj kuyularında sivilaşmanın varlığı söz konusudur.

Tokimatsu ve Yoshimi (1983) yöntemine göre yapılan analizlerde, 6,0 büyüklüğündeki depremde SK-1, SK-9, SK-16, SK-18 sondaj kuyularında sivilaşma belirlenmiştir. SK-4, SK-6, SK-7, SK-10, SK-11 sondaj kuyularında sivilaşma riski varken, 6,5 büyüklüğündeki depremde ve 7,0 büyüklüğündeki senaryo depremde tüm sondaj kuyularında sivilaşmanın varlığı söz konusudur.

Iwasaki vd. (1981) yöntemine göre yapılan analizlerde 6,0 büyüklüğündeki depremde SK-1, SK-4, SK-6, SK-10, SK-13, SK16, SK18 sondaj kuyularında sivilaşma; SK-3, SK-8, SK-9, SK-17 sondaj kuyularında sivilaşma riski tespit edilmiştir. 6,5 büyüklüğündeki depremde SK-1, SK-3, SK-4, SK6, SK-7, SK-8, SK-9, SK-10, SK-12, SK-13, SK-16, SK-16, SK-17 ve SK-18 sondaj kuyularında sivilaşma; SK-11 ve SK-19 kuyularında ise sivilaşma riski tespit edilmiştir. 7,0 büyüklüğündeki senaryo depremde tüm sondaj kuyularında sivilaşmanın varlığı söz konusudur.

TBDY 2018 Deprem Yönetmeliği'ne göre yapılan analizlerde 6, 6,5 ve 7,0 büyüklüğündeki depremlerde tüm sondaj kuyularında sivilaşma tespit edilmiştir. (Çizelge 12)

Çalışmada dört ayrı analiz yöntemine göre hesaplanan güvenlik faktörü değerleri farklılık göstermektedir. Bunun sebebi hesaplamalarda kullanılan CSR için hemen hemen benzer formüller kullanılırken formüllerde geçen gerilme azaltma katsayısı ve magnitud düzeltme katsayısı farklılık göstermektedir. Aynı zamanda CRR için araştırmacılar farklı formüller önermişlerdir. Ayrıca Seed ve Idriss (1971)

ve TBDY (2018) hesaplamaları her ne kadar aynı olsa da kullanılan maksimum yer ivmesinin farklılık göstermesi nedeniyle sonuçlarda yine yer yer farklılık göstermektedir.

Genel olarak sivilaşma analizlerinin güvenlik faktörü değerleri incelendiğinde, Seed ve Idriss (1971) ve Tokimatsu ve Yoshimi (1983) tarafından önerilen analiz yöntemleri birbirine daha yakın sonuçlar verdiği görülürken, Iwasaki vd. (1981) yönteminde elde edilen güvenlik faktörü değeri Seed ve Idriss (1971) ve Tokimatsu ve Yoshimi (1983) yöntemlerine göre güvenlik faktörü değeri yer yer daha büyük çıkmıştır. TBDY 2018 Deprem Yönetmeliği'ne göre ise güvenlik faktörü değeri diğer yöntemlerden daha düşük sonuçlar vermiştir.

Bu araştırma sonucunda Sivas ili Kızılırmak çevresinde suya doymuş zeminler sivilaşma açısından riskli olarak belirlenmiştir. Bu bölgelerde inşaa edilecek yapıların da zemin açısından risk altında olacağı sonucuna varılmıştır. Bu gibi suya doymuş zeminler için saha çalışmaları daha dikkatli olarak yapılmalı, gerektiği takdirde birden fazla analiz yöntemi ile zeminin durumu belirlenmelidir. Analiz sonuçlarına göre ise zemine gerekli iyileştirme çalışmalarının uygulanması gerekir.

## Kaynaklar

- Seed, H. B. and Idriss, I. M., 1971. Simplified Procedure for Evaluating Soil Liquefaction Potential, Journal of the Soil Mechanics and Foundation Div., ASCE, 97, 9, 1249-1273.
- Beyaz, T., 2004. Zemin Etkisinden Arındırılmış Deprem Kayıtlarına Göre Türkiye İçin Yeni Bir Deprem Enerjisi Azalım Bağıntısının Geliştirilmesi, Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Duman S. E., 2013. Erzincan İl Merkezi ve Çevresindeki Zeminlerin Standart Penetrasyon Deneyi Verileri Kullanılarak Sivilaşma Potansiyelinin Belirlenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Trabzon.
- Day, R., W., 2002. Earthquake Engineering Handbook, McGraw-Hill, USA, 600 s.
- Mollamahmutoğlu, M., ve Babuçcu, F., 2006. Zeminlerde Sivilaşma Analiz ve İyileştirme Yöntemleri, Gazi Kitabevi, Ankara, 267.
- Tokimatsu, K. and Yoshimi, Y., 1983. Empirical Correlation of Soil Liquefaction Based on SPT N-value and Fines Content, Soil and Foundations, 23, 4, 56-74.
- Iwasaki, T., Tokida, K. and Tatsuoka, F., 1981. Soil Liquefaction Potential Evaluation with Use of The Simplified Procedure, International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics, St. Louis, 209-214.
- TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara.
- Avcı N. vd., 1997. Sivas Kentinin Çevre Jeolojisi ve Doğal Kaynakları, MTA Genel Müdürlüğü Jeoloji Etütleri Dairesi.