

ZEMİN VE YAPISAL DEĞİŞKENLİĞİN ETKİSİYLE BETON BİR ÇERÇEVENİN ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ

SOIL-STRUCTURE INTERACTION OF A CONCRETE FRAME CONSIDERING SOIL AND STRUCTURAL VARIABILITY

Ahmet Can MERT¹, Gökhan YAZICI²

ÖZET

Çalışmada zemin ve beton özelliklerindeki değişkenliğin, çerçeve tipi bir sistemin zemin-yapı etkileşimine (SSI- *Soil-Structure Interaction*) etkisi değerlendirilmiştir. Rastgele alan sonlu elemanlar yöntemi (RFEM-*Random Field Finite Element Method*) kullanılarak zemin deformasyon modülü (E_s) ve beton elastisite modülü (E_c) boşluksal değişkenlikle (*spatial variability*) tanımlanmıştır. Modüllerdeki değişimin etkisi değerlendirilmiş ve sonuçlar deterministik analizle karşılaştırılmıştır. Çalışmanın amacı olan zemin ve yapısal değişkenliğin SSI analizlerinde kullanımının vurgulanması çerçevesinde edinilen sonuçlar, yalnızca zemin değişkenliğinin göz önüne alınması durumu ile karşılaştırılarak sunulmuştur. Kıyaslamalar sonucunda çerçevenin kirişinde meydana gelen en büyük bileşik normal gerilme, kirişteki çökme ve temeldeki oturma değerleri deterministik sonuçlardan belirgin şekilde sapmaktadır. Ayrıca, yalnızca zemin değişkenliğinin göz önüne alınması da zemin ve beton değişkenliğinin aynı anda hesaba katılması durumuna göre sonuçlarda farklılık göstermiştir. Mevcut çalışmadaki bulgular, yapı-zemin etkileşimlerinde tüm değişkenliklerin göz önüne alınarak RFEM ile etkili çözüm gerçekleştirileceğini göstermiştir.

Anahtar Kelimeler: Beton değişkenliği, rastgele alan teorisi, sonlu elemanlar yöntemi, zemin değişkenliği, zemin-yapı etkileşimi

ABSTRACT

The purpose of the paper is to evaluate the influence of soil and concrete variability on soil-structure interaction (SSI) analysis of a frame type structure. Random field finite element method (RFEM) were used to account for spatial variability of soil deformation modulus (E_s) and elasticity modulus of concrete (E_c). The effect of E_s and E_c variation was evaluated, and the results of RFEM analyses were compared with the deterministic results of the model. Since the paper aimed to show the necessity of soil and structural variability together in SSI evaluation of concrete frames, results of full variability case

¹ Öğretim Görevlisi, İstanbul Kültür Üniversitesi, a.mert@iku.edu.tr (Sorumlu Yazar)

² Doktor Öğretim Üyesi, İstanbul Kültür Üniversitesi, gokhanyazici@iku.edu.tr

were consequently compared with the results of the soil variability case. It is found after the comparison that the results of max. combined normal stress along the beam, beam deflection and footing settlement were considerably deviated from the results of deterministic and soil variability cases when soil and structural variability were considered together. The findings of the present study revealed that the full variability is essential for efficient RFEM calculation of SSI systems.

Keywords: *Concrete variability, random field theory, finite elements method, soil variability, soil-structure interaction*

1. GİRİŞ

Mühendislik zemini ve yapıların etkileşimi, İnşaat Mühendisliğindeki değerlendirmelerde göz önüne alınan ana unsurlardandır. Yapısal sistem içinde kullanılan malzemelerin özellikleri, zeminden tamamıyla farklı olduğundan zemin-yapı etkileşimleri (SSI- *Soil-Structure Interaction*) kapsamlı bir değerlendirme gerektirir. Deterministik yaklaşımlı SSI analizlerinin birçoğunda, zemin ve beton gibi birbirinden çok farklı rijitliğe sahip iki malzemenin teması sonucu ara yüzey (*contact/ interface*) sorunu ortaya çıkmaktadır. Ara yüzey rijitliği, dayanma yapıları, kazıklı temeller veya kayma/ devrilme tehlikesi altındaki yapılar için kritik olsa da ağırlıklı olarak düşey yük etkisindeki yapıların temelleri için kritik değildir. Öte yandan, sanayi yapılarının temeli gibi bu tip sistemlerde temel ve zemin ara yüzeyinin birbirinden ayrılması pek olası değildir. Ayrıca, düşey yük etkisinde sistemin hizmet görebilirlik sınır durumuna (SLS- *Serviceability Limit State*) göre değerlendirilmesi yenilme durumuna göre daha büyük önemdedir (EN-1990:2002, 2002). Zemin ve yapısal malzeme özelliklerindeki değişim, düşey yük etkisindeki çerçeve tipi yapılarda daha kritiktir. Bu tip analizde, malzeme değişkenliği göz önüne alınamadığında deterministik yaklaşım yetersiz kalacak, olasılık tabanlı bir yaklaşım kullanımı gerekecektir. Malzemenin uzaydaki konumuna göre boşluksal değişkenliğini (*spatial variability*) göz önüne alabilen olasılık tabanlı yöntemlerden biri rastgele alan teorisidir (*random field theory*). Bu teori, bir değişkenin üç boyutlu uzaydaki değişkenliğini etkili bir şekilde ifade ettiğinden malzeme değişkenliğinin temsili için uygundur (Vanmarcke, 2010).

Zemin-yapı etkileşimi, yer değiştirme tabanlı bir değerlendirme gerektirir. Bu nedenle, sonlu elemanlar yöntemi (FEM- *Finite Elements Method*) gibi sayısal analiz metodu kullanılması önemlidir. Ancak, olasılık tabanlı bir değerlendirme için klasik FEM çözümünün özel kullanımı gerekir. Bu çerçevede, FEM çözümünün rasgele alan teorisi ile kullanımı amaçlı birçok çalışma bulunmaktadır. Bu çalışmalardan ilkinde, stokastik sonlu elemanlar yöntemi (SFEM- *Stochastic Finite Elements Method*) adı verilen metod ile basit mesnetli bir kirişin rijitliği, bir boyutlu rastgele alan kullanılarak tanımlanmıştır (Vanmarcke ve Grigoriu, 1983). SFEM birçok mühendislik problemine uygulanmıştır (Der Kiureghian ve Ke, 1988; Li ve Der Kiureghian, 1993; Liu ve Der Kiureghian, 1991). Geoteknik alanında SFEM' in ilk kullanımı, temel elastik oturmalarını incelemiştir (Beacher ve Ingra, 1981). SFEM' in ayrıca yapı mühendisliği alanında da uygulamaları olmuştur (Gomes ve Awruch, 2002; Zhang ve Ellingwood, 1996). Bu yöntemin çözümü, seri açılımlarının karmaşık matematiksel ifadelerle çözümünü gerektirdiğinden daha etkili ve verimli yöntem arayışları olmuştur. Bu çalışmalardan birinde, rastgele alanlı sonlu elemanlar yöntemi (RFEM- *Random Field Finite Elements Method*) adı verilen rastgele alan gerçekleştirmelerinden (*realizations*) tekrarlı çözümle olasılık dağılımı üreten bir yaklaşım geliştirilmiş ve SFEM çözümüne verimli bir alternatif önerilmiştir (Griffiths ve

Fenton, 2009). RFEM' in geoteknik alanında birçok probleme uyarlanmıştır; temel oturmaları (Ahmed ve Soubra, 2012; Fenton ve Griffiths, 2008; Paice vd., 1996), iki ve üç boyutlu temel farklı oturma analizi (Ahmed ve Soubra, 2014; Fenton ve Griffiths, 2005; Griffiths vd., 2002). Literatürdeki çalışmaların birçoğu zemin direnç veya rijitlik parametrelerini rastgele alanda tanımlayarak zemin doğal değişkenliğini göz önüne almıştır. Yapısal özelliklerin değişkenliği ile ilgili çalışmalar da rastgele alan teorisini kullanmaktadır. SFEM veya RFEM yaklaşımlarıyla yapısal analizler yapılmıştır (De Stefano vd., 2014; Gomes ve Awruch, 2002; Sosso vd., 2020). Bazı çalışmalar, beton basınç dayanımı veya beton elastisite modülü gibi özelliklerin doğal değişkenliklerini, deneysel ve arazi çalışmaları ile tanımlamıştır (Bonfigli vd., 2017; Xu ve Li, 2018). Hem zemin hem de yapısal değişkenliklerin göz önüne aldığı çalışmalar, malzeme özelliklerindeki belirsizliğin göz önüne alınması gerekliliğini vurgulamıştır. Olasılık tabanlı değerlendirmeler, deterministik yaklaşımların zemin veya yapısal elemanlardaki yer değiştirme ile gerilmelerin tahmininde yanıltıcı olabileceğini ortaya çıkarmıştır.

Çalışmanın literatür araştırması, SSI değerlendirmelerinin hem zemin hem de yapısal değişkenlikler göz önüne alınarak yapılması gerektiğini göstermiştir. Zemin ve yapısal değişkenliklerin etkisinde, beton bir çerçevedeki yer değiştirme ve gerilmelerin RFEM yaklaşımıyla incelenmesi çalışmanın temel amacıdır. Zemin ve yapısal değişkenlikler için ayrı olarak birçok çalışma yapılmış, ancak her iki tip değişkenliğin birlikte kullanıldığı bir yaklaşım literatürde bulunamamıştır. Yakın zamanda yayınlanan bir çalışma zemin değişkenliğinin yapısal bir çerçevedeki iç kuvvetlere etkisi incelenmiş, ancak burada da beton vb. bir malzeme özelliğindeki değişimden söz edilmemiştir (Luo vd., 2021). Mevcut çalışma, beton bir çerçevenin SSI değerlendirmesinde zemin ve yapısal değişkenliğin birlikte kullanılması gerekliliğini göstermeyi hedeflemiştir. Zemin deformasyon modülü (E_s) ve beton elastisite modülü (E_c) rastgele alan olarak modellenmiş ve sayısal analizlerden edinilen sonuçlar ile olasılık tabanlı değerlendirme yapılmıştır. Çalışmanın çıktılarının yapısal güvenilirlik analizlerine alternatif bir bakışı açısı getirmesi ve literatürdeki rastgele alan modelleme çalışmalarına yeni kabul gören bir katkı sağlanması beklenmektedir.

2. RASTGELE ALAN SONLU ELEMANLAR YÖNTEMİ

Yöntem, boşluksal değişken olarak tanımlanacak parametrelerin rastgele alanda tanımlanması ile başlamaktadır. Parametrelerin normal dağılıma uyması durumunda rastgele alan tanımlı kolaylaştığından, çalışmada Gauss rastgele alanı tercih edilmiştir. Bunun yanı sıra rastgele alan, ortalama fonksiyonu $\mu(\mathbf{x})$, varyans fonksiyonu $\sigma^2(\mathbf{x})$ ve korelasyon fonksiyonu $\rho(\tau)$ ile tanımlanır. Burada τ parametresi, iki rastgele değişken arasındaki mesafeyi göstermekte ve korelasyon fonksiyonu içindeki başlıca kontrol eden parametre korelasyon uzunluğu (*correlation length*, θ) adını almaktadır. Çalışmada üstel Markov korelasyon fonksiyonu kullanılmıştır (Denklem 1).

$$\rho(\tau) = \exp\left(-\frac{|\tau|}{\theta_x} - \frac{|\tau|}{\theta_y}\right) \quad (1)$$

Burada, θ_x ve θ_y sırasıyla yatay ve düşey korelasyon uzunluklarıdır. Bir boyutlu rastgele alan tanımlanmasında korelasyon uzunluğu tek parametre olur ve bir yöndeki boşluksal değişkenliği temsil eder. Çalışmada zemin deformasyon ve beton elastisite modülleri

Gauss rastgele alanı olarak tanımlanmıştır. Zemin, iki boyutlu izotrop alan olarak; beton rijitliği ise, kiriş derinliğinden daha kritik olan kiriş açıklığı boyunca tek boyutlu rastgele alan şeklinde tanımlanmıştır.

2.1. Rastgele Alanın Ayırıştırılması

Bir Gauss rastgele alanı tanımlandığı ilk aşamada sürekli bir fonksiyon halindedir. Bu tanımlama genelde sonsuz sayıda terim ile rastgele alan oluşturur. Bu çalışma kapsamında rastgele alan, denklem 2' de verilen eşitlikle Karhunen-Loève (KL) seri açılımı kullanılarak tanımlanmıştır:

$$f(\mathbf{x}) = \mu(\mathbf{x}) + \sigma(\mathbf{x}) \sum_{i=1}^{\infty} \xi_i \sqrt{\lambda_i} g_i(\mathbf{x}) \quad (2)$$

Burada; ξ_i standart normal değişken, λ_i ve $g_i(\mathbf{x})$ ise sırasıyla korelasyon yapısının (*correlation structure*) özdeğer ve özfonksiyonlarıdır. Özdeğer problemi, denklem 3 ile verilen integral eşitliğinin Ω tanım kümesinde çözümü ile elde edilmekte ve böylece sonsuz sayıda ξ_i rastgele değişkeni oluşmaktadır:

$$\int_{\Omega} \rho(\mathbf{x}, \mathbf{x}') g_i(\mathbf{x}') d\mathbf{x}' = \lambda_i g_i(\mathbf{x}) \quad (3)$$

Edinilen sürekli fonksiyonun, sayısal analizde kullanılması pratik değildir. Bu nedenle, sürekli rastgele alan ayırıştırılarak (*discretization*) en yüksek özdeğere sahip sonlu sayıda r terim içeren bir fonksiyon haline gelir:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \mu(\mathbf{x}) + \sigma(\mathbf{x}) \sum_{i=1}^r \xi_i \sqrt{\lambda_i} g_i(\mathbf{x}) \quad (4)$$

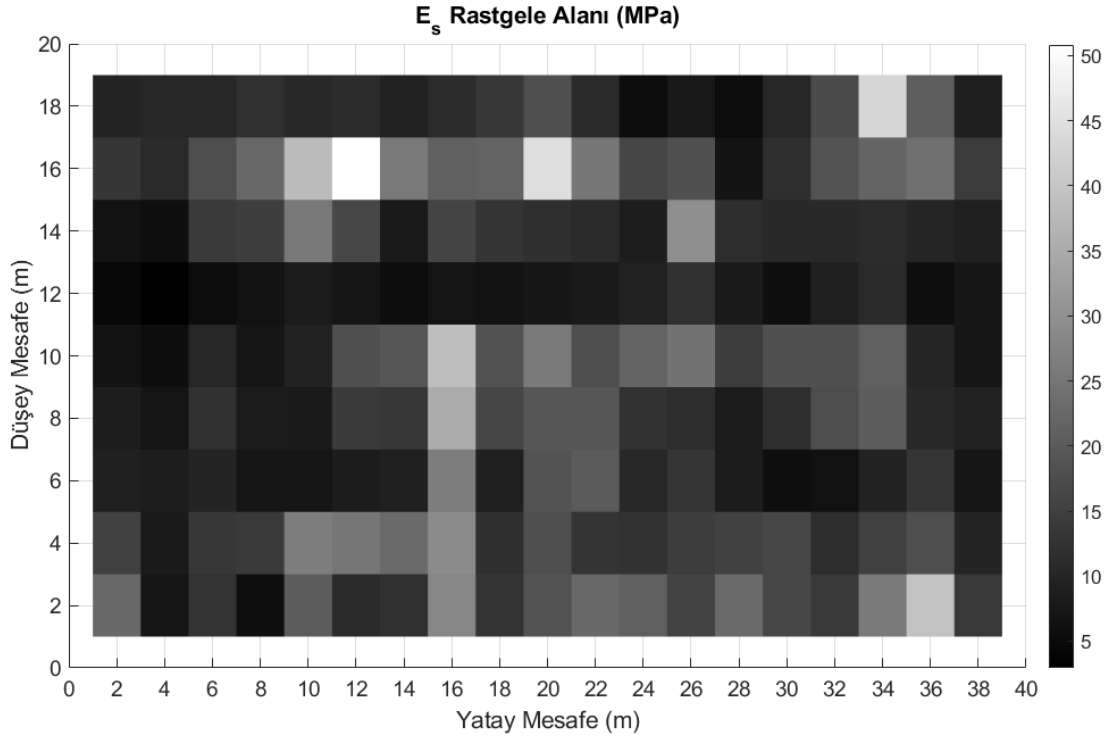
Denklem 4' teki çözüm, integral probleminin (Denklem 3) bir matris özdeğer problemine dönüştürülmesiyle elde edilmiştir (Ghanem ve Spanos, 1991; Mirfendereski, 1990). Bu bağlamda çalışmadaki çözümler, MATLAB yazılımına aktarılmış ve matris özdeğer probleminin “randomfield” adlı bir açık kaynak fonksiyonu ile çözülmesiyle rastgele alanlar üretilmiştir (Constantine, 2020).

2.2. Zemin Deformasyon Modülü için Rastgele Alan Üretimi

Zemin deformasyon modülü (E_s), iki boyutlu Gauss rastgele alanı olarak tanımlanmıştır. Üstel korelasyon yapısı seçilmiş ve korelasyon uzunluğu hem yatay hem düşey yönde 2 metre alınmıştır. Rastgele alan gerçekleştirmeleri belirlenen rastgele alan ağı ve korelasyon yapısı bilgileri ile MATLAB fonksiyonu kullanılarak üretilmiştir. Negatif değerlerin elenmesi amacıyla E_s ' nin lognormal dağılıma uyduğu kabul edilmiştir. Bu durumda, parametrenin ortalama (μ) ve standart sapması (σ), eşdeğer normal dağılım ortalama (μ_{LN}) ve standart sapmasına (σ_{LN}) dönüştürülmüştür:

$$\sigma_{LN} = \sqrt{\ln(1 + COV^2)} \quad \mu_{LN} = \ln(\mu) - 0.5\sigma_{LN}^2 \quad (5)$$

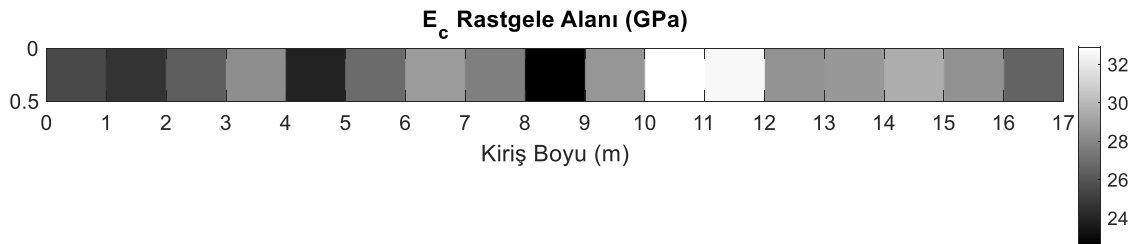
Denklem 5' te verilen eşitlikte E_s ' nin ortalaması 15 MPa alınmış ve 20 x 40 m zemin modelinde analiz için 1000 iterasyonlu rastgele alan gerçekleştirmeleri üretilmiştir. Rastgele alanlar, E_s ' nin değişme katsayısının (*coefficient of variation*) $COV= 0.60, 0.70$ ve 0.80 olması durumları için ayrıca üretilmiştir. Şekil 1' de $\mu=15$ MPa ve $COV=0.60$ için temsili bir E_s rastgele alan gerçekleştirmesi verilmiştir.



Şekil 1. $\mu=15$ ve $COV=0.60$ için temsili bir E_s rastgele alan gerçekleştirimi

2.3. Beton Elastisite Modülü için Rastgele Alan Üretimi

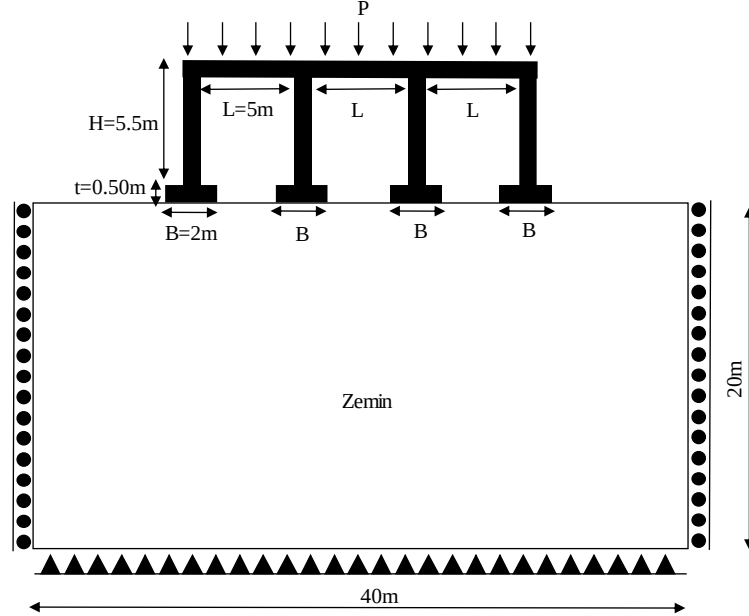
Yapısal elemanları modellemede kullanılacak betonun elastisite modülü (E_c), beton çerçevenin kiriş açıklığı boyunca bir boyutlu rastgele alan olarak tanımlanmıştır. Zemin rijitliğindeki benzer prosedür takip edilerek E_c rastgele alanı üretilmiştir. Literatürdeki çalışmalar referans alınarak, E_c rastgele alanı için üstel korelasyon yapısı ve normal dağılım kabul edilmiştir (Bonfigli vd., 2017; De Stefano vd., 2014; Xu ve Li, 2018). Ayrıca, literatürde beton değişkenliği ile ilgili kabul gören korelasyon uzunluğu 0.5 ile 7.5 m aralığında bulunmuş, çalışmadaki kiriş açıklığına (5.0 m) göre 1.0 m kabul edilmiştir. Elastisite modülünün ortalaması 30 GPa alınmış ve literatürde kabul gören %7 ile %35 değişim aralığına göre, beton için $COV=0.10$, 0.20 ve 0.30 seçilmiştir. Çalışmadaki örnek yapı-zemin modeli, 5m kiriş açıklığına sahip 3 açıklıklı tek katlı çerçeve seçilmiştir. Kolon ve kiriş boyutları 30 x 50 cm alınmıştır. Buna göre, E_c rastgele alanı bu modelde kullanılmak üzere 1000 iterasyon için toplam 17 m kiriş boyunca bir boyutlu rastgele alan olarak tanımlanmıştır. $COV= 0.10$ için temsili bir rastgele alan gerçekleştirimi Şekil 2' de verilmiştir.



Şekil 2. $\mu=30$ ve $COV=0.10$ için temsili bir E_c rastgele alan gerçekleştirimi

3. SAYISAL ANALİZ MODELİ

Bu bölümde iki boyutlu düzlem deformasyon durumunda oluşturulan sonlu elemanlar modelinin, yapı-zemin sistemi içinde deformasyon ve gerilmelerinin değerlendirilmesi aktarılmıştır. Zemin ve beton rijitlikleri rastgele alan olarak tanımlanmış ve RFEM modeli içine atanmıştır. Şekil 3' te kullanılan sayısal analiz modelinin temsili gösterimi verilmiştir.



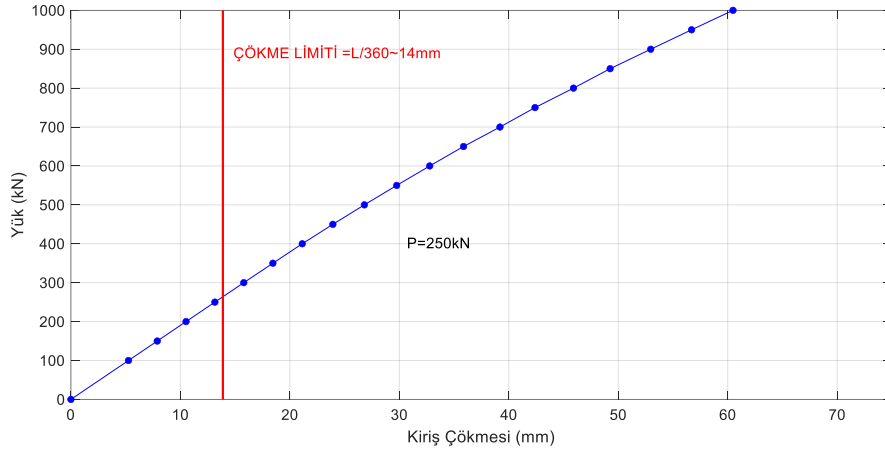
Şekil 3. Temsili RFEM modeli

Kiriş boyunca değişken beton rijitliğine sahip 3 açıklıklı tek katlı bir çerçeve modeli kullanılmıştır. Tüm kolonlar, 2.0 m genişliğinde ve 50 cm kalınlıkta boşluksal değişken zemine oturan tekil temelle desteklenmiştir. Model boyutları, sınır koşullarının deformasyon ve gerilme konturlarını etkilemeyeceği büyüklükte seçilmiştir. Zemin tabanı düşey deformasyonu engelleyecek şekilde tutulu, model kenarları ise kayıcı mesnet olarak tanımlanmıştır.

Analiz modeli, sonlu elemanlar yazılımı ANSYS ile oluşturulmuştur. Rastgele alan ağının simülasyonu zemin kısmının 2m x 2m, beton kirişin ise 1m elemanlara bölünmesiyle modellenmiştir. Rastgele alan olarak tanımlanan parametrelerin her biri ilgili eleman içine atanmış ve her bir analiz seti için 1000 iterasyon yapılmıştır. $COV_{zemin}=0.60$ & $COV_{beton}=0.10$ durumu SET1, $COV_{zemin}=0.60$ & $COV_{beton}=0.10$ durumu SET2 ve $COV_{zemin}=0.60$ & $COV_{beton}=0.10$ durumu SET3 olarak kabul edilmiştir. Bu durumda toplam 3000 iterasyonun çözümü ile sonuç çıktılarının olasılık dağılımları elde edilmiştir. Sonlu eleman ağının boyutu, rastgele alandaki korelasyon uzunluklarından daha küçük seçilmiş ve literatürde kabul gören koşullara uyulmuştur (Der Kiureghian ve Ke, 1988; Liu ve Der Kiureghian, 1991).

Zemin ve beton malzeme özelliklerindeki tüm diğer parametreler sabit alınmıştır. Zemin yenilme yüzeyi, Mohr-Coulomb kriteri ile kil benzeri davranış kabul edilerek oluşturulmuştur. Zemin kohezyonu (c') 10 kPa, kayma direnci açısı (ϕ') 25 derece alınmıştır. Zeminin yeraltı su seviyesinin üzerindeki kuru durumda olduğu kabulü ile çözüme gidilmiştir. Zeminin birim hacim ağırlığı 18 kN/m³ tanımlanmıştır. Betonun değişken elastisite modülü dışında tüm mekanik ve fiziksel özellikleri, yazılımın malzeme

kütüphanesinden alınmıştır. Yapıdaki kiriş üzerine, 250 kN bileşke kuvvete eşdeğer düzgün yayılı yük tanımlanmıştır. Bu değer, kiriş açıklığındaki çökme limitine göre yük-çökme eğrisi üzerinden belirlenmiştir. (Şekil 4).



Şekil 4. Kiriş yük-çökme eğrisi

4. ANALİZ SONUÇLARI

RFEM model sonuçları ile karşılaştırma amaçlı, ilk olarak modelin deterministik çözümü yapılmıştır. E_s ve E_c' nin ortalama değerleri sabit girdiler olarak alınmış, zemin (temel oturması) ve çerçevedeki deformasyonlar ile kirişteki en büyük bileşik normal gerilme sonuçları Tablo 1' de özetlenmiştir.

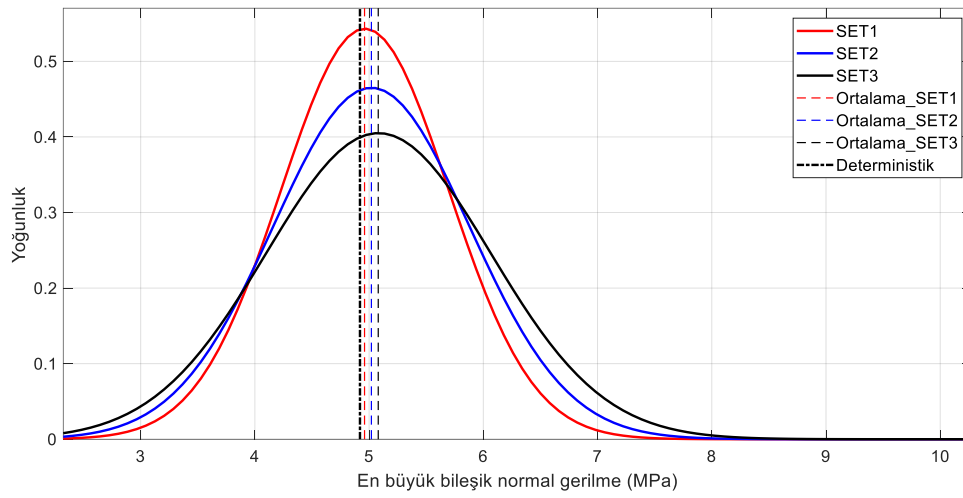
Tablo 1. Deterministik sonuçlar

En büyük bileşik normal gerilme (MPa)	4.92
Kirişteki en büyük çökme (mm)	13.15
Temeldeki en büyük oturma (mm)	12.27

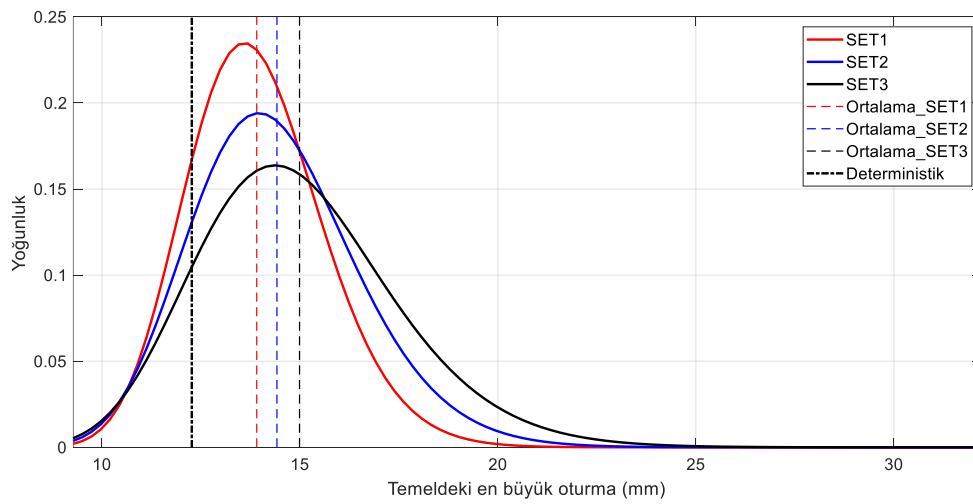
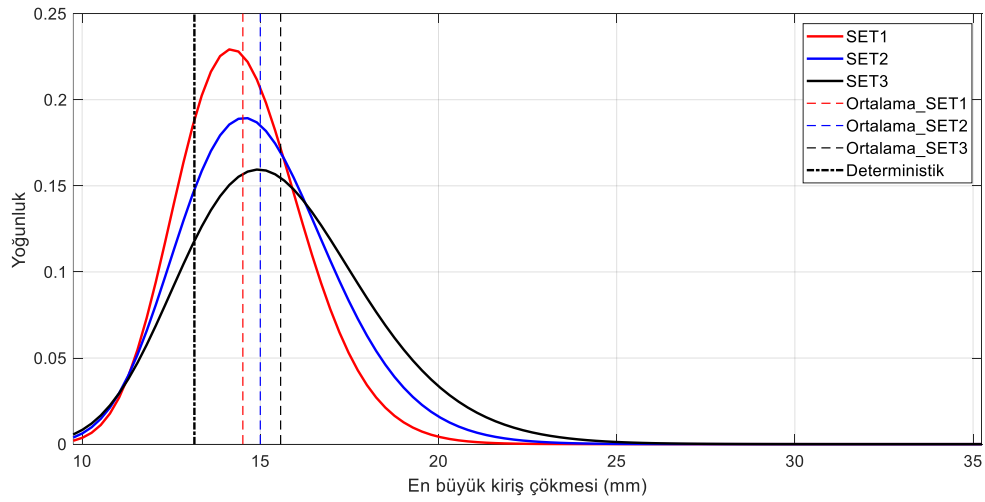
RFEM analizleri E_s ve E_c' nin değişme katsayıları (COV_{E_s} ve COV_{E_c}) için üç farklı çözüm seti içermektedir:

- $COV_{E_s}=0.60$ & $COV_{E_c}=0.10$: SET1,
- $COV_{E_s}=0.70$ & $COV_{E_c}=0.20$: SET2,
- $COV_{E_s}=0.80$ & $COV_{E_c}=0.30$: SET3.

Her bir analiz seti için 1000 iterasyonun çözümü, sonuç çıktılarının olasılık yoğunluk fonksiyonlarını (PDF- *Probability Density Function*) oluşturmaktadır. Kirişteki en büyük bileşik normal gerilmenin sonuç PDF' leri, tüm analiz setleri için Şekil 5' te verilmiştir. Edinilen deterministik sonuçlar ve ilgili çıktı dağılımının ortalamaları birlikte sunulmuştur. Normal gerilme sonuçları, tahmin edilen E_c dağılımını doğrular nitelikte Gauss (Normal) dağılımına uymuştur. Sonuçlar açıkça, Tablo 1' de verilen deterministik gerilme değerlerinden sapan dağılım ortalamalarını ortaya koymaktadır. Kiriş çökmesi ve temel oturmalarının PDF' leri Şekil 6' da birlikte verilmiştir. Tüm deformasyon çıktıları, tanımlanan zemin değişkenliğine benzer şekilde lognormal dağılıma uymuştur. Deformasyon dağılımlarının ortalamaları, düşük tahmin edilmiş deterministik çözümde belirgin bir şekilde sapmıştır. Ayrıca, tüm çıktılarda artan zemin ve beton değişkenliği ile dağılımların değişkenlikleri artmıştır.



Şekil 5. Bileşik normal gerilme PDF' leri

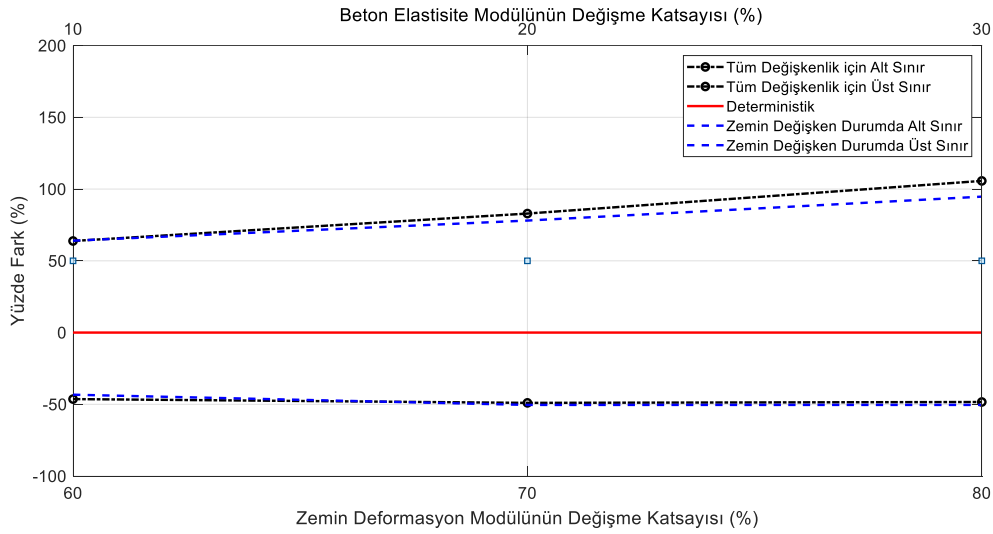


Şekil 6. a) En büyük kiriş çökmesi ve b) temellerdeki en büyük oturma PDF' leri

Çalışmanın son adımındaki sonuçlar hem zemin hem yapısal değişkenliğin SSI analizlerinde kullanımını doğrulamıştır. Çözüm setleri, sadece zemin değişkenliğini göz önüne alınarak aynı COD değerleri ile tekrardan çözülmüştür. Tüm değişken durumdakine benzer şekilde bir analiz seti oluşturulmuş ve zemin değişken durumunda:

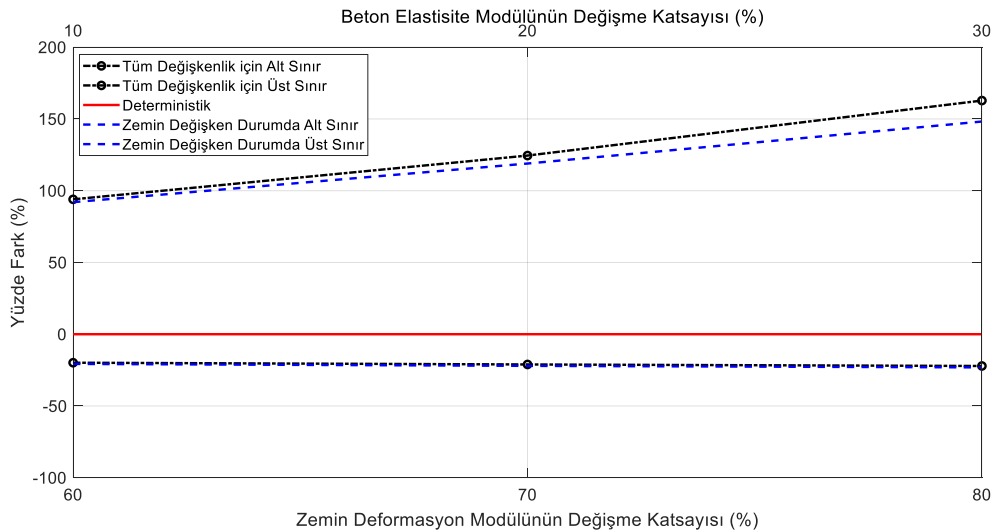
$-COV_{Es}=0.60$: SET1, $COV_{Es}=0.70$: SET2, $COV_{Es}=0.80$: SET3 olarak belirlenmiştir.

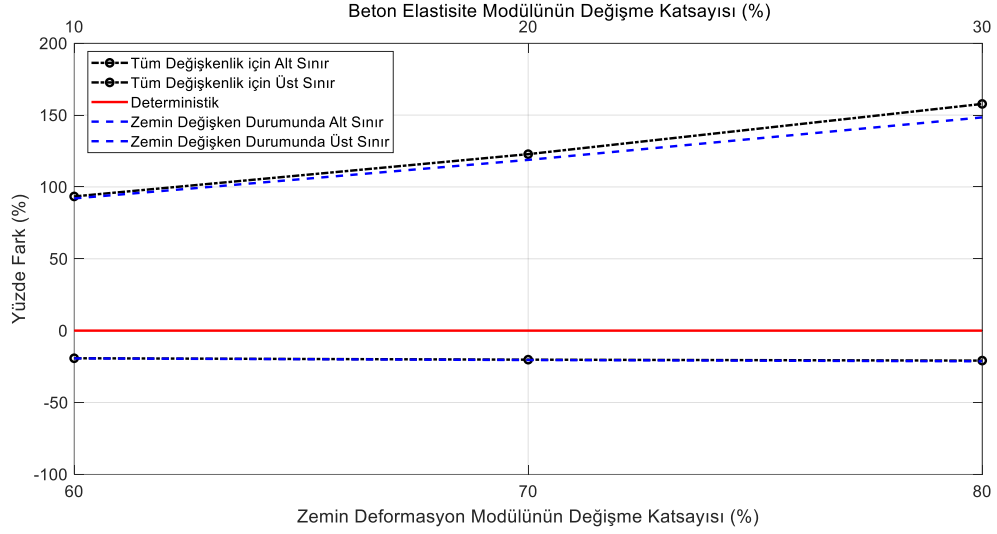
Tüm değişken ve zemin değişken durum çıktıları karşılaştırılmıştır. RFEM çözümlerindeki maksimum ve minimum değerler, deterministik sonucun yüzde farkı şeklinde karşılaştırılmıştır. Sınır değerlerin yüzde farkları, COV değerleri yönünden birer alt ve üst limit oluşturmuştur. Şekil 7, bileşik normal gerilme için tüm ve zemin değişken durumları için yüzde farkları vermektedir.



Şekil 7. Bileşik normal gerilmenin deterministik duruma göre yüzde farkı

Maksimum bileşik normal gerilme değerleri hem tüm değişken hem de zemin değişken durumlar için deterministik sonuçların oldukça üzerinde kalmıştır. Bunun yanı sıra tüm değişken durumdaki üst sınır, artan COV değerlerine göre zemin değişken durumdaki üst sınırdan belirgin şekilde ayrılmaktadır. Benzer figürler ayrıca kiriş çökme değerleri (Şekil 8a) ve temel oturmaları (Şekil 8b) için oluşturulmuştur.





Şekil 8. a) Kiriş çökmesi ve (b) temeldeki maksimum oturmanın deterministik değerlere göre yüzde farkı

Tüm değişken ve zemin değişken durumlarındaki çerçeve ve zemin deformasyonları için üst sınır değerleri, deterministik sonuçlardan %100 farkın üzerinde sapmaktadır. Kiriş çökmesi ve temel oturma değerlerinin üst sınırı, tüm değişkenlik durumu için görünür derecede zemin değişken durumdan sapmaktadır. Bu durum, SSI hesaplarında hem zemin hem de yapısal değişkenliğin göz önüne alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Buna ilave olarak, kiriş çökmesi ve temel oturmalarının üst sınırları zemin değişken durumda, tüm değişken duruma kıyasla birbirine oldukça yakın bulunmuştur. Başka bir ifadeyle, zemin değişkenliğine ilave olarak yapısal değişkenliğin hesaba katılması, çerçeve ve zemindeki deformasyonların birbirinden ayrılmasını sağlamıştır. Böylece, SSI değerlendirmesinde tüm değişkenlik durumunun kullanımı ile sistemdeki deformasyon ve gerilmelerin düşük tahmin edilmesinin önüne geçilebilmektedir.

5. SONUÇ

Çalışmadaki kapsamlı analiz setleri ile hem zemin hem de yapısal değişkenliğin zemin-yapı etkileşiminde kullanılması gerekliliği ortaya koyulmuştur. Tüm değişken durumda bütün analiz çıktıları için yüzde farklar, sadece zemin değişken durumuna göre %9-15 daha yüksek bulunmuştur.

RFEM modellerinden edinilen PDF' ler, normal gerilme dağılımının E_c rastgele alanın olasılık dağılımından; kiriş ve temeldeki deformasyonların ise E_s alanın olasılık dağılımından etkilendiğini göstermiştir. Ayrıca tüm durumlarda PDF' lerin ortalama değerleri, deterministik sonuçların düşük tahminde bulunabileceğini doğrulamıştır. Bu nedenle, tüm mühendislik tasarımlarında boşluksal değişkenliğin göz önüne alınması önerilmektedir.

Zemin ve beton rijitliklerindeki değişkenliğin ayrı olarak göz önüne alınması, yapısal elemanlardaki gerilme veya zemin-yapı sistemindeki deformasyonların olduğundan daha düşük tahmin edilmesine yol açabilmektedir. Tüm değişken ve zemin değişken durumlarındaki sonuçların birbirine yakın olmasına karşın çalışmadaki değerlendirmeler, sadece zemin değişkenliğinin göz önüne alınması durumunda kiriş çökmesi ve temel

oturmalarının birbirinden ayırt edilemediğini göstermiştir. SSI sistemlerinde verimli bir RFEM hesaplaması için hem zemin hem yapısal değişkenliğin göz önüne alınması önerilmektedir.

TEŞEKKÜR

Çalışmanın bir kısmı BAP2022 kodlu bilimsel araştırma projesi kapsamında gerçekleştirilmiştir. Bu çerçevede yazarlar, İstanbul Kültür Üniversitesi' ne proje desteği için teşekkürlerini sunar. Bu konferansa katılım [ULEP-2022-60253] ile İstanbul Kültür Üniversitesi tarafından desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- Ahmed, A., ve Soubra, A. H. (2012). Probabilistic analysis of strip footings resting on a spatially random soil using subset simulation approach. *Georisk*, 6(3), 188–201. <https://doi.org/10.1080/17499518.2012.678775>
- Ahmed, A., ve Soubra, A. H. (2014). Probabilistic analysis at the serviceability limit state of two neighboring strip footings resting on a spatially random soil. *Structural Safety*, 49, 2–9. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2013.08.001>
- Beacher, G. B., ve Ingra, T. S. (1981). Stochastic Fem in Settlement Predictions. *Journal of the Geotechnical Engineering Division*, 107(4), 449–463. <https://doi.org/10.1061/ajgeb6.0001119>
- Bonfigli, M. F., Materazzi, A. L., ve Brecolotti, M. (2017). Influence of spatial correlation of core strength measurements on the assessment of in situ concrete strength. *Structural Safety*, 68, 43–53. <https://doi.org/10.1016/j.strusafe.2017.05.005>
- Constantine, P. G. (2020). *Random Field Simulation* (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27613-random-field-simulation>). MATLAB Central File Exchange.
- De Stefano, M., Tanganelli, M., ve Viti, S. (2014). Variability in concrete mechanical properties as a source of in-plan irregularity for existing RC framed structures. *Engineering Structures*, 59, 161–172. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2013.10.027>
- Der Kiureghian, A., ve Ke, J. Bin. (1988). The stochastic finite element method in structural reliability. *Probabilistic Engineering Mechanics*, 3(2), 83–91. [https://doi.org/10.1016/0266-8920\(88\)90019-7](https://doi.org/10.1016/0266-8920(88)90019-7)
- EN-1990:2002. (2002). *Eurocode. Basis of Strucrual Design*. CEN European Committee for Standardization.
- Fenton, G. A., ve Griffiths, D. V. (2005). Three-dimensional probabilistic foundation settlement. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 131(2), 232–239. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2005\)131:2\(232\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2005)131:2(232))
- Fenton, G. A., ve Griffiths, D. V. (2008). Risk Assessment in Geotechnical Engineering. In *Risk Assessment in Geotechnical Engineering*. John Wiley & Sons, Inc. <https://doi.org/10.1002/9780470284704>
- Ghanem, R. G., ve Spanos, P. D. (1991). Spectral stochastic finite-element formulation for reliability analysis. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(10), 2351–2372. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1991\)117:10\(2351\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:10(2351))
- Gomes, H. M., ve Awruch, A. M. (2002). Reliability of reinforced concrete structures using stochastic finite elements. *Engineering Computations (Swansea, Wales)*, 19(7–8), 764–786. <https://doi.org/10.1108/02644400210444311>
- Griffiths, D. V., ve Fenton, G. A. (2009). Probabilistic settlement analysis by stochastic and random finite-element methods. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*,

- 135(11), 1629–1637. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0000126](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0000126)
- Griffiths, D. V., Fenton, G. A., ve Manoharan, N. (2002). Bearing capacity of rough rigid strip footing on cohesive soil: Probabilistic study. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 128(9), 743–755. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)1090-0241\(2002\)128:9\(743\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)1090-0241(2002)128:9(743))
- Li, C. C., ve Der Kiureghian, A. (1993). Optimal discretization of random fields. *Journal of Engineering Mechanics*, 119(6), 1136–1154. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1993\)119:6\(1136\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1993)119:6(1136))
- Liu, P. L., ve Der Kiureghian, A. (1991). Finite element reliability of geometrically nonlinear uncertain structures. *Journal of Engineering Mechanics*, 117(8), 1806–1825. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1991\)117:8\(1806\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1991)117:8(1806))
- Luo, Z., Kim, M., ve Hwang, S. (2021). Effect of Soil Spatial Variability on the Structural Reliability of a Statically Indeterminate Frame. *ASCE-ASME Journal of Risk and Uncertainty in Engineering Systems, Part A: Civil Engineering*, 7(1), 04020048. <https://doi.org/10.1061/ajrua6.0001098>
- Mirfendereski, D. (1990). *On series representation of random fields and their application in stochastic finite element analysis*.
- Paice, G. M., Griffiths, D. V., ve Fenton, G. A. (1996). Finite element modeling of settlements on spatially random soil. *Journal of Geotechnical Engineering*, 122(9), 777–779. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9410\(1996\)122:9\(777\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9410(1996)122:9(777))
- Sosso, B., Andrade, S. da S., Vieira, L. C. M., ve Berke, P. Z. (2020). Probabilistic modelling of the robustness of reinforced concrete frames accounting for material property variability using a layered beam finite element approach. *Engineering Failure Analysis*, 118, 104789. <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2020.104789>
- Vanmarcke, E. H. (2010). *Random Fields: Analysis and Synthesis*. World Scientific. <https://doi.org/https://doi.org/10.1142/5807>
- Vanmarcke, E. H., ve Grigoriu, M. (1983). Stochastic finite element analysis of simple beams. *Journal of Engineering Mechanics*, 109(5), 1203–1214. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9399\(1983\)109:5\(1203\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9399(1983)109:5(1203))
- Xu, T., ve Li, J. (2018). Assessing the spatial variability of the concrete by the rebound hammer test and compression test of drilled cores. *Construction and Building Materials*, 188, 820–832. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.08.138>
- Zhang, J., ve Ellingwood, B. (1996). SFEM for Reliability of Structures with Material Nonlinearities. *Journal of Structural Engineering*, 122(6), 701–704. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)0733-9445\(1996\)122:6\(701\)](https://doi.org/10.1061/(asce)0733-9445(1996)122:6(701))

SEMBOL LİSTESİ

Sembol	Açıklama	Sembol	Açıklama
E_s	Zemin deformasyon modülü	θ_y	Düşey korelasyon uzunluğu
E_c	Beton elastisite modülü	ξ	Standart normal değişken
μ	Ortalama	λ	Özdeğer
σ	Standart sapma	Ω	Tanım kümesi
ρ	Korelasyon fonksiyonu	μ_{IN}	Eşdeğer normal dağılım ortalaması
τ	Rastgele değişken arası mesafe	σ_{IN}	Eşdeğer normal dağılım standart sapması
θ	Korelasyon uzunluğu	ϕ	Zemin kayma direnci açısı
θ_x	Yatay korelasyon uzunluğu		