

YAPI ZEMİN ETKİLEŞİMİNİN BETONARME YAPILARIN TASARIMINA ETKİSİ

(SOIL-STRUCTURE INTERACTION EFFECT ON DESIGN OF REINFORCED CONCRETE STRUCTURES)

Korhan ÖZGAN¹, Saffet KILIÇER², Ayşe T.DALOĞLU³, Ali İ.KARAKAŞ⁴

ÖZ

Betonarme yapıların tasarımı sırasında genellikle temel zemini rijit bir ortam olarak dikkate alınarak tabanda kolonların ankastre olduğu kabulü ile yapı-zemin etkileşimi ihmal edilmektedir. Oysaki zemin, üst yapıdan aktarılan yükler altında şekil değiştiren, gerilmelere maruz kalan ve maruz kaldığı etkilere karşı tepki oluşturan bir ortamdır. Bu nedenle zemin etkileri dikkate alınmadan yapılan bir üst yapı tasarımının eksik kalabileceği söylenebilir. Bu çalışmada, yapı-zemin etkileşiminin betonarme yapıların tasarımına etkisi incelenmektedir. Bu amaçla daha önce literatürde incelenmiş olan 8 katlı bir yapı örneği dikkate alınmıştır. Yapının oturduğu zemin, rijit yapı-zemin kabulünün yanında Winkler ve Geliştirilmiş Vlasov Modelleri de kullanılarak modellenmiştir. Sayısal sonuçlar SAP2000 paket programı ile MATLAB'te kodlanan bir yazılımın eş zamanlı kullanılmasıyla elde edilmiştir. Bu sayede SAP2000 paket programına kendi içerisinde var olmayan Geliştirilmiş Vlasov Modeli ile çözüm yapma kabiliyeti kazandırılmıştır. Çözümde elde edilen periyot, taban kesme kuvveti, kolon normal kuvvetleri, kolon eğilme momentleri ve kolonların boyuna donatı oranları her bir zemin modeli için karşılaştırılmıştır. Çalışmanın sonunda yapı-zemin etkileşiminin betonarme yapıların tasarımına etkisinin ihmal edilemeyecek düzeyde olduğu görülmüştür.

Anahtar Kelimeler: Betonarme yapı tasarımı, Elastik zemin, OAPI, Yapı-zemin etkileşimi

ABSTRACT

During the design of reinforced concrete structures, soil-structure interaction is neglected with the assumption of fixed base columns usually considering the subsoil as a rigid medium. However, subsoil is a medium that deforms under load from the structure, exposed to stress and generates a reaction against the effects suffered. In this study, effects of soil-structure interaction on design of reinforced concrete structures are investigated. For this purpose, an 8-storey frame previously examined in the literature is considered. The effect of subsoil under the structure is considered using Winkler and Modified Vlasov Model in addition to rigid soil-structure assumption. An interface is developed by authors to use SAP2000 software with MATLAB simultaneously for the analysis. In this way, SAP2000 software gains the ability of the analysis of mat foundation using Modified Vlasov model. Periods, base shear forces, column axial forces, column bending moments and column longitudinal reinforcement ratios are compared for rigid soil-structure, Winkler and Modified Vlasov Models. In the end of study, it is observed that soil-structure interaction has a significant effect on the structural design of reinforced concrete structures.

Keywords: Design of reinforced concrete structures, Elastic foundation, OAPI, Soil-structure interaction

¹ Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, TRABZON, kozgan@ktu.edu.tr (Sorumlu Yazar)

² Artvin Çoruh Üniversitesi, Çevre Mühendisliği Bölümü, ARTVİN, kilicer@artvin.edu.tr

³ Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, TRABZON, aysed@ktu.edu.tr

⁴ Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 61080, TRABZON

1. GİRİŞ

Betonarme yapılar tasarlanırken genellikle üstyapı ve temel sistemi birbirinden bağımsız düşünülerek boyutlandırılmakta ve donatılmaktadır. Bu durumda temel sisteminin hesabında zemin etkileri dikkate alınmış olurken üstyapının hesabında ise yapının tabanda ankastre olduğu varsayımıyla zemin etkileri ihmal edilmiş olmaktadır. Oysaki zemin etkisinin sadece temel sisteminde değil tüm yapıda davranışı değiştirmesi ve en önemli tasarım parametrelerinden biri olması beklenmektedir. Dolayısıyla tüm yapı sistemini zemin ile etkileşimli dikkate almak güvenilir bir analiz için önem arz etmektedir. Diğer taraftan yapı-zemin etkileşimini gerçekçi bir şekilde ortaya koyacak zemin modellerine ihtiyaç vardır. Zira güvenilir bir projelendirme için yapının davranışının yanı sıra zeminin davranışını ve aralarındaki ilişkiyi de mümkün olduğunca doğru belirlemek gerekir. Özellikle son yıllarda daha gerçekçi ve daha güvenilir zemin modelleri üzerinde yapılan araştırmalar giderek artmıştır. Sıklıkla kullanılan yarı-sonsuz zemin modelleri genel olarak üç kategoride toplanabilir. Bunlardan ilki Winkler Modeli adıyla da bilinen bir parametrelili modeldir. Winkler Modeli'nde zeminin birbirine sonsuz yakın, lineer ve elastik yaylardan meydana geldiği ve yayların sadece doğrudan doğruya yüklendiklerinde şekil değiştirdikleri ve bir karşı tepki oluşturdıkları ancak her yayın komşu yayın yüklenme durumundan etkilenmediği kabul edilmektedir. Bunun sonucunda zemin tamamen süreksiz bir ortam şeklinde dikkate alınmış olmaktadır. Bu modelde zemin ile ilgili bilinmesi gereken tek bir parametre vardır ve bu parametre yatak katsayısı olarak adlandırılan yay sabitidir. Parametrenin ne alınacağı konusunda kesin bir fikir birliği yoktur ancak zemin deneylerinden ya da çeşitli kitaplardaki tablolardan yararlanılmaktadır. Günümüzde kullanılan ticari yazılımlar bu yaklaşımı kullanmakta ve yaylar arasındaki etkileşimi, diğer bir ifadeyle zeminde oluşacak kayma etkilerini ihmal etmektedir. Bir diğer zemin modeli iki parametrelili modeller olarak gruplandırılabilir. Pasternak Modeli, Hetenyi Modeli ve Vlasov Modeli iki parametrelili modellere örnek olarak verilebilir. Bu modellerin ortak yanı matematiksel ifadelerinde zemin tabakasındaki kayma şekil değiştirmelerini dikkate alan ikinci bir parametre sunmuş olmalarıdır. Ancak bu parametrelerin ne alınacağı konusunda da kesin bir ifade yoktur. Sonuncusu ise zemin parametrelerinin zeminin malzeme özelliklerinden hesaplanması esasına dayanan üç parametrelili modellerdir. Geliştirilmiş Vlasov Modeli olarak adlandırılan bu modelde zemin yatak katsayısı ve kayma parametresi üst yapıdan aktarılan yükler ve zeminin malzeme özelliklerinden faydalanarak belirlenen üçüncü bir parametreye bağlı olarak hesaplanmaktadır. Bu yöntem ile yapı-zemin etkileşimi daha gerçekçi bir şekilde elde edilebilmektedir [1].

Nadjai ve Johnson zemini düşey ve dönel yaylar ile modelleyerek 16 katlı boşluklu perdeli bir yapıyı incelemişlerdir [2]. Mısır vd., Winkler Modeli ve Vlasov Modeline bir yaklaşım olan Eşdeğer Winkler Yatak katsayısı yöntemini kullanarak yapı davranışına etkilerini araştırmışlardır [3]. Rashed elastik zemine oturak plaklar için geliştirdiği yeni bir sınır eleman metodunu yapı-temel-zemin problemine uygulamıştır [4]. Kahraman vd. farklı yöntemlerle elde edilmiş yatak katsayılarını kullanarak radye temelli ve 4 katlı çerçeve sistemli yapıyı incelemişlerdir [5]. Yatak katsayılarının hesabında, sabit yatak katsayısı yaklaşımı, Eşdeğer Winkler yatak katsayısı yaklaşımı, zonlama yöntemi ve Bowles yaklaşımını kullanılmışlardır. Çalışmanın sonunda yapı davranışının Eşdeğer Winkler yatak katsayısı yaklaşımı ile daha gerçekçi bir şekilde modellenebildiğini sonucuna ulaşmışlardır. Karabörk çalışmasında, aynı plan ve rijitliğe sahip 3, 6 ve 10 katlı yapı modellerinin yumuşak ve sert olmak üzere iki farklı zemin türü için, üç farklı deprem yükü altındaki davranışlarını incelemiştir [6]. Çalışmanın sonunda farklı modeller için elde ettiği yer değiştirme, iç kuvvet ve periyot değerlerini

karşılaştırmıştır. Korkmaz ve Demir farklı rijitlikte doğrusal olmayan yay modelleri kullanarak zemin türü ve özelliklerinin yapı davranışını nasıl etkilediğini araştırmışlardır [7]. Hamarat vd. iki parametrelili zemine oturan yapıların dinamik davranışlarını SAP2000 OAPI fonksiyonlarını kullanarak incelemişlerdir [8]. Thangaraj ve Ilamparuthi yapı-zemin etkileşimi problemini lineer olmayan zemin davranışı etkisi altında incelemişlerdir [9]. Derdiman çalışmasında 7 farklı elastisite modülüne sahip zemin üzerinde 5, 10 ve 15 katlı betonarme çerçeve yapı modellerini dikkate alarak zeminin yüksek yapılara etkisi araştırmıştır [10]. Frydrysek vd. çalışmalarında Ansys paket programını kullanarak elastik zemine oturan kiriş, çerçeve ve üç boyutlu yapıları incelemişlerdir [11]. Ionescu vd. Boussinesq zemin modelini kullanarak bir bina örneği dikkate almışlar ve yapı-zemin dinamik etkileşimi üzerine çalışmışlardır [12]. Ahmed vd. elastik zemini tabakalı şekilde dikkate alarak çok katlı bir yapıyı temel ve zemin sistemini ile birlikte incelemişlerdir [13]. Avcıoğlu ve Orakdöğen geliştirdikleri bir bilgisayar yazılımı aracılığı ile zemin parametrelerinin zaman tanım alanında yapılan analizlerde ne şekilde değiştiğini ve komşu binaların deprem etkileri altında birbirleri ile olan etkileşimlerini araştırmışlardır [14].

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin betonarme yapıların tasarımına etkisi araştırılmıştır. 8 katlı bir betonarme yapı için üç farklı zemin modeli dikkate alınarak analizler yapılmıştır. Bunlardan ilki yapının düşey taşıyıcı elemanlarının tabanda ankastre olduğu varsayımına dayanan rijit yapı-zemin modelidir. İkinci çözümde yapı ile birlikte temel sistemi de dikkate alınmış ve zeminin ayırık yaylar vasıtası ile temsil edildiği Winkler Modeli kullanılmıştır. Üçüncü varsayımda ise yaylar arasındaki etkileşimin de dikkate alındığı ve zemin parametrelerinin üst yapıdan aktarılan yükler ve zeminin malzeme özelliklerine bağlı olarak hesaplandığı Geliştirilmiş Vlasov Modeli kullanılmıştır. Bilindiği gibi zemin ortamı SAP2000 paket programı ile Winkler Yöntemine göre modellenenbilmektedir [15]. Ancak Geliştirilmiş Vlasov Modeli seçeneği SAP2000 programı içerisinde yer almamaktadır. Dolayısıyla Geliştirilmiş Vlasov Modeli'ni kullanarak sayısal sonuçlar elde edebilmek için MATLAB'da geliştirilen bir arayüz SAP2000-V15 paket programı ile eş zamanlı kullanılmıştır [16]. Her üç zemin modeli için elde edilen periyotlar, taban kesme kuvvetleri, kolon normal kuvvetleri, kolon eğilme momentleri ve kolon boyuna donatı oranları karşılaştırmalı olarak sunulmuştur. Ayrıca radye temelin orta eksenine boyunca oluşan düşey yerdeğiştirmelerin farklı zemin modellerine göre değişimi de incelenmiştir.

2. PROBLEMİN MATEMATİK MODELİ

Üç parametrelili elastik zemine oturan bir radye temele alt zeminin etkisi, plağın düşey yer değiştirmelerine (w) bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$q_z = -2t\nabla^2 w + kw \quad (1)$$

Bu ifadedeki, zeminin birinci parametresi olarak da adlandırılan, yatak katsayısı k ,

$$k = \int_0^H \frac{E_s(1-\nu_s)}{(1+\nu_s)(1-2\nu_s)} \left(\frac{\partial \phi(z)}{\partial z} \right)^2 dz \quad (2)$$

ifadesinden ve zeminin ikinci parametresi olarak bilinen, zemin kayma parametresi $2t$,

$$2t = \int_0^H G_s \phi(z)^2 dz \quad (3)$$

ifadesinden hesaplanmaktadır. Yukarıdaki ifadelerde H zemin derinliğini, ν_s zeminin Poisson oranını ve G_s ise zeminin kayma modülünü göstermektedir. Eşitlik 1’de $2t$ parametresi sıfıra eşitlendiğinde Winkler tipi elastik zemine oturan radye temele ait zemin tepkisi elde edilmektedir. Zeminin düşey yer değiştirmesinin değişimini gösteren $\phi(z)$ fonksiyonu,

$$\phi(z) = \frac{\sinh \gamma \left(1 - \frac{z}{H}\right)}{\sinh \gamma} \quad (4)$$

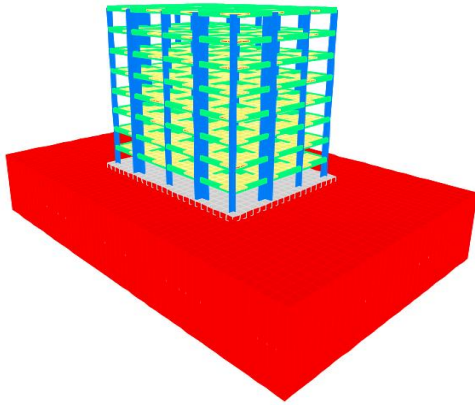
olmak üzere zemin yüzey parametresi diye adlandırılan γ boyutsuz katsayısı,

$$\left(\frac{\gamma}{H}\right)^2 = \frac{(1-2\nu_s)}{2(1-\nu_s)} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} (\nabla w)^2 dx dy}{\int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} w^2 dx dy} \quad (5)$$

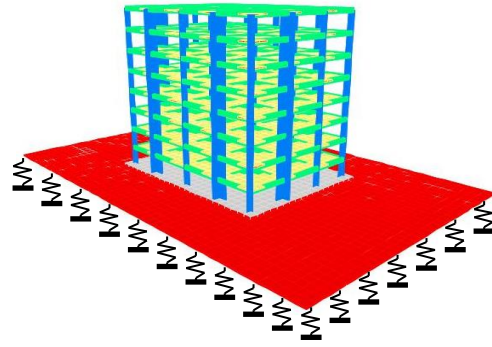
ifadesiyle verilmektedir. $\phi(z)$ fonksiyonu $z=0$ için $\phi(z)=1$ ve $z=H$ için $\phi(z)=0$ değerini almaktadır. Yani H derinliğinde zeminin düşey yer değiştirmesi sıfır iken zeminin yüzeyindeki düşey yer değiştirmesi plağın düşey yer değiştirmesine eşit olmaktadır.

Eşitlik 2 ve Eşitlik 3’den görüldüğü gibi k ve $2t$ parametreleri zeminin malzeme özelliklerine, zeminin derinliğine ve $\phi(z)$ fonksiyonuna bağlıdır. $\phi(z)$ fonksiyonu ise zemin derinliğine ve γ parametresine bağlı olarak hesaplanabilmektedir. γ parametresinin değeri ise dış yüklere maruz plağın yer değiştirmelerine, zeminin Poisson oranına ve zemin derinliğine bağlı olarak değişmektedir. Zemin parametreleri hesabında var olan karmaşık ilişki nedeniyle bir ardışık yaklaşım işlemine gerek duyulmaktadır [17].

Problemin çözümü için SAP2000 paket programı kullanılmıştır. Bilindiği gibi SAP2000 programı içerisinde alan yayları ile Winkler tipi elastik zemin temsil edilebilmektedir. Ancak yaylar arasındaki etkileşim dikkate alınmamakta ve her bir yay birbirinden bağımsız davranmaktadır. Yaylar arasındaki etkileşimi dikkate alan Geliştirilmiş Vlasov Modeli’ni kullanabilmek için yaylar ile plak elaman arasına birim kalınlıkta Shell-Layered/Nonlinear elaman tanımlanmıştır. Bu elemana sadece düşey yönde yer değiştirme serbestliği ve plak elamana ise düşey yönde yer değiştirme ve diğer iki yönde dönme serbestliği tanımlanmıştır. SAP2000-V15 içerisinde bulunan Açık Uygulama Programlama Arayüzü (Open Application Programming Interface) (AUPA) özelliği sayesinde geliştirici ara programlarla iki yönlü veri alış verişi yapılabilmektedir. Bu özellikten faydalanarak üç parametrelili zemine ait γ parametresinin ardışık yaklaşım yoluyla hesabı için bir MATLAB arayüzü geliştirilmiştir. Bu arayüz ile SAP2000 programında oluşturulan model çağrılmakta, MATLAB arayüzü yardımıyla hesaplanan zemin parametreleri modele girdi olarak verilmekte ve modelden çıktı olarak alınan yer değiştirmeler ile yeni zemin parametreleri (k ve $2t$) hesaplanmaktadır. γ parametresi önceden belirlenen bir hassasiyetle yakınsayana kadar bu ardışık işlem devam etmektedir [18]. Geliştirilmiş Vlasov tipi elastik zemin için SAP2000’de oluşturulan yapı modeli Şekil 1’de ve hesaplamalarda izlenen akış Şekil 2’de verilmektedir. Yöntemin güvenilirliği ve literatürdeki diğer çalışmalar ile uyumluluğu daha önce Kılıçer vd tarafından bir elastik zemine oturan plak problemi için doğrulanmıştır [19].

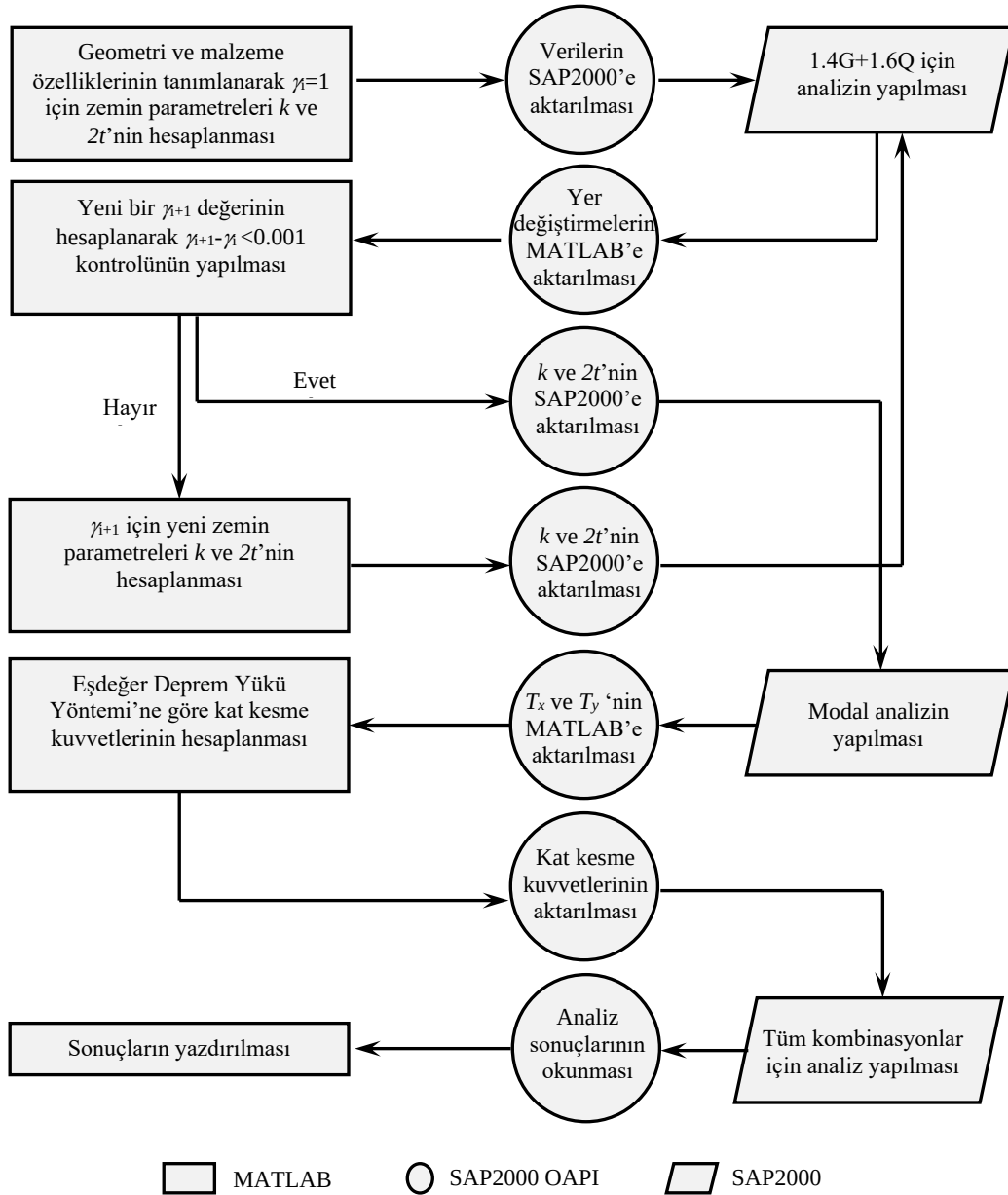


a) 3 Boyutlu çok katlı çerçeve



b) Matematik modeli

Şekil 1. Üç parametrelili zemine oturan bir yapı modeli

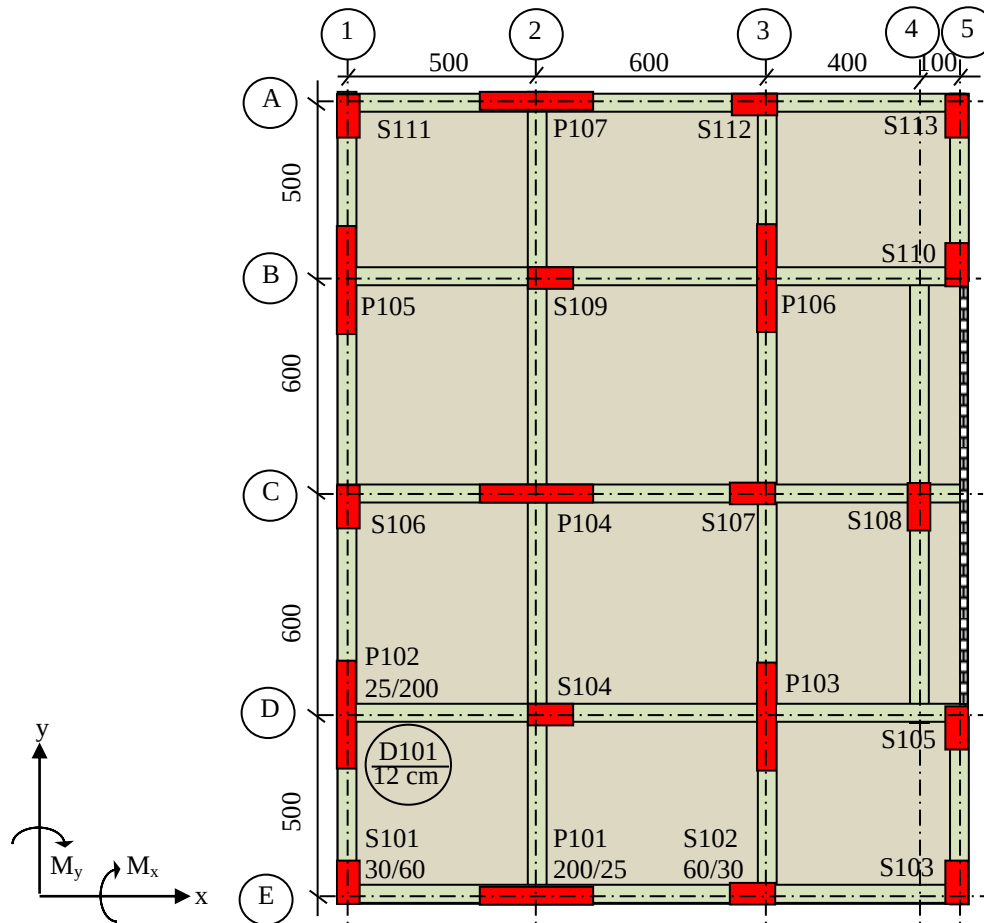


Şekil 2. Akış diyagramı

3. SAYISAL ÖRNEK

Sayısal uygulama olarak daha önce Girgin vd. tarafından incelenen 8 katlı betonarme bir yapı örneği dikkate alınmıştır [20]. Yapının temeli 18 m x 24 m boyutlarına ve 75 cm kalınlığa sahip radye plaklıdır. Kat yüksekliği 3 m dir. Betonun elastisite modülü 28 GPa, Poisson oranı 0.2 ve birim hacim ağırlığı 25 kN/m³ tür. Zeminin elastisite modülü 35000 kN/m² ve Poisson oranı 0.25 olarak alınmıştır. Zemin derinliği ise 20 m kabul edilmiştir. Yapının oturduğu zeminin sınıfı Z4'tür. Zemin yatak katsayısı 6300 kN/m³ olarak dikkate alınmıştır. Tüm kirişler 25×60 cm² kesitine sahiptir. Düşey taşıyıcı elemanlar 30×60 cm² kolonlardan ve 25×200 cm² betonarme perdelerden oluşmaktadır.

Girgin vd. tarafından yapılan çalışmada verilmeyen diğer değişkenler için şu kabuller yapılmıştır; Son kat hariç tüm dış kirişlerin üzerinde 20 cm ve tüm iç kirişlerin üzerinde 10 cm kalınlığında gazbeton duvarlar mevcuttur [20]. Gazbeton duvar malzemesinin birim hacim ağırlığı 5 kN/m³ alınmıştır. Döşeme kalınlıkları normal döşemelerde 12 cm, balkon döşemesinde 15 cm olup hareketli yük 2 kN/m² dir. Deprem hesabında Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi kullanılmıştır. Bilindiği gibi ülkemizde yürürlükte olan Türk Deprem Şartnamesi “Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik” burulma düzensizliğinin bulunmadığı ve toplam yüksekliği 25 m’yi aşmayan binalarda bu yöntemin kullanılmasına izin vermektedir [21]. Yapının 1. derece deprem kuşağında bulunduğu varsayılmıştır. Deprem Yönetmeliği gereği 1. derece deprem kuşağında yer alan yapılar için etkin yer ivmesi katsayısı $A_0=0.4$ alınmaktadır. Yapı önem katsayısı $I=1$ ve taşıyıcı sistem davranış katsayısı $R=4$ alınmıştır. Yapının kat kalıp planı Şekil 3’de görülmektedir.



Şekil 3. Yapı örneğinin kalıp planı

Programda taşıyıcı sistem oluşturulurken taşıyıcı olmayan duvarlar yapının kütle hesabında dikkate alınabilmesi için alan eleman olarak modellenmiştir. Bu elemanda, duvarların yapının yatay rijitliğini etkilememesi adına, sadece birim hacim ağırlığı ve kütlesi tanımlanmış elastisite modülü ve Poisson oranı gibi diğer değişkenler sıfır alınmıştır.

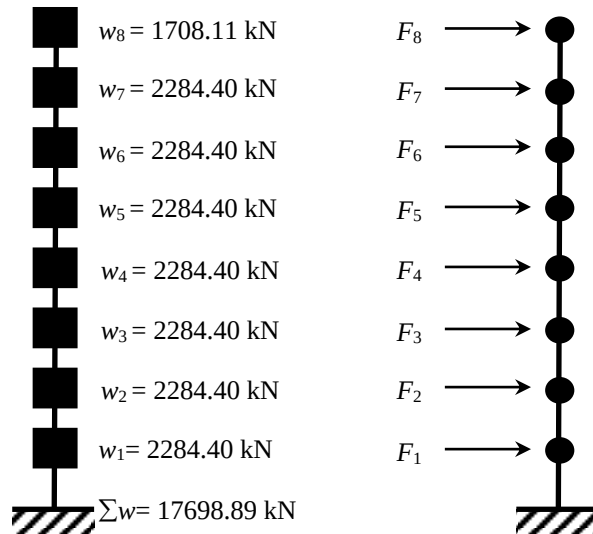
Söz konusu sayısal örnek rijit yapı-zemin kabulü, Winkler Modeli ve Geliştirilmiş Vlasov Modeli dikkate alınarak çözülmüştür. Yapının üç farklı zemin modeline ait periyot değerleri, kolonların tasarım normal kuvvetleri, kolonların tasarım eğilme momentleri ve bu normal kuvvet ile eğilme momentine göre TS500'e uygun olarak hesaplanan kolon boyuna donatı oranları karşılaştırılmıştır [22].

Yapının deprem hesabında, Türk Deprem Yönetmeliğin'de önerilen yöntemlerden biri olan Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi kullanılmıştır. ± 0.05 ek dışmerkezlik göz önünde bulundurularak $1.4G+1.6Q$ temel yük birleşimi dışında $G+Q\pm E_x$ ve $G+Q\pm E_y$ yük birleşimleri de hesaba katılmıştır. Bu birleşimlerdeki G , Q ve E simgeleri sırasıyla sabit yükü, hareketli yükü ve deprem yükünü göstermektedir. Her bir yapı-zemin modeli için yapının hesaplanan doğal titreşim periyotları ve taban kesme kuvvetleri Çizelge 1'de verilmektedir. Çizelgeden görüldüğü gibi rijit yapı-zemin modeli en küçük periyotları, Geliştirilmiş Vlasov Modeli ise en büyük periyotları vermiştir. Rijit bir temel sisteminden daha esnek bir temel sistemine geçişte periyotların artması beklenen bir sonuçtur. Rijit yapı-zemin ve Winkler Modeli'nde her iki doğrultudaki taban kesme kuvvetleri değişmezken Geliştirilmiş Vlasov Modeli'nde elde edilen taban kesme kuvvetleri diğer yapı-zemin modellerine göre daha küçük olmuştur.

Çizelge 1. Yapının doğal titreşim periyotları ve taban kesme kuvvetleri

Yapı-Zemin Modelleri	T_x (sn)	T_y (sn)	V_{tx} (kN)	V_{ty} (kN)
Rijit Yapı-Zemin Modeli	0.691	0.670	4424.722	4424.722
Winkler Modeli	0.892	0.830	4424.722	4424.722
Geliştirilmiş Vlasov Modeli	1.053	0.933	3901.667	4298.883

Çizelge 1'de verilen yapı doğal titreşim periyotları kullanılarak Eşdeğer Deprem Yüğü Yöntemi'ne göre hesaplanan ve Şekil 4'te gösterilen kat seviyelerine etkiyen eşdeğer deprem yükleri Çizelge 2'de verilmektedir.



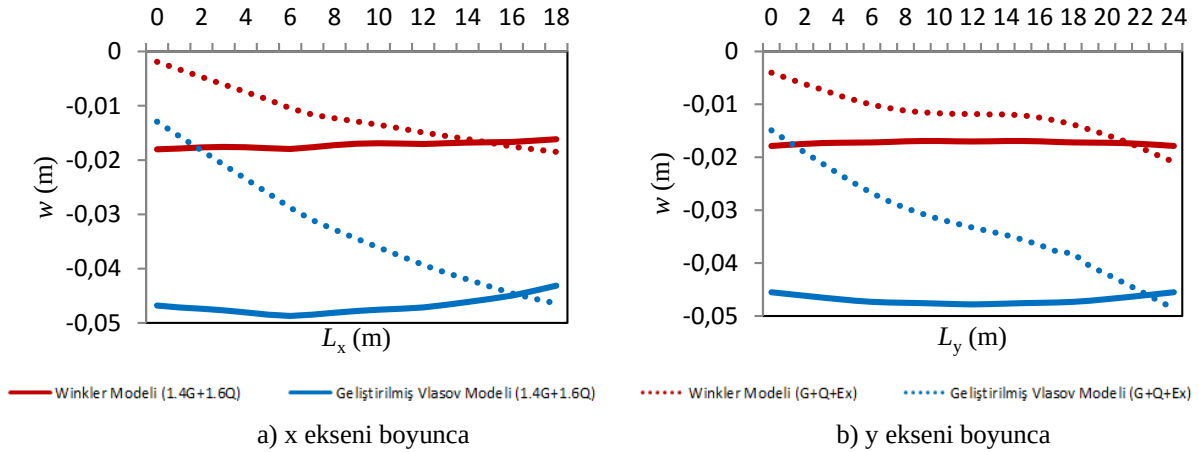
Şekil 4. Kat ağırlıkları ve kat seviyelerine etkiyen eşdeğer deprem yükleri

Çizelge 2. Kat seviyelerine etkiyen eşdeğer deprem yükleri

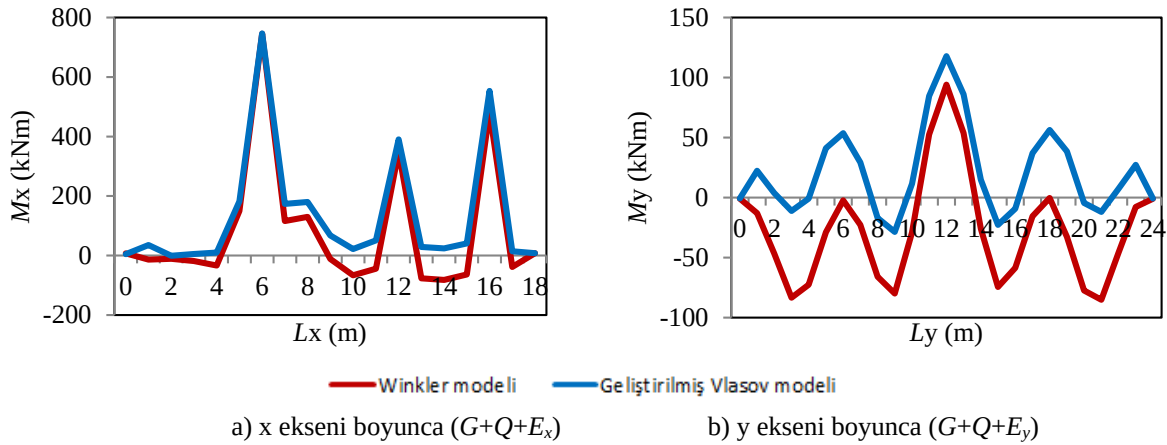
KAT	Rijit Yapı-Zemin Modeli		Winkler Modeli		Geliştirilmiş Vlasov Modeli	
	$F_{ix}(kN)$	$F_{iy}(kN)$	$F_{ix}(kN)$	$F_{iy}(kN)$	$F_{ix}(kN)$	$F_{iy}(kN)$
8	998	998	998	998	880	969
7	857	857	857	857	755	832
6	734	734	734	734	648	713
5	612	612	612	612	540	595
4	490	490	490	490	432	476
3	367	367	367	367	324	357
2	245	245	245	245	216	238
1	122	122	122	122	108	119

İlk iki zemin modelinde yapının doğal titreşim periyotları $Z4$ yerel zemin sınıfı için Türk Deprem Yönetmeliği'nde verilen spektrum karakteristik periyotları $T_A=0.2$ s ve $T_B=0.9$ s arasında kaldığından spektrum katsayısı $S(T)=2.5$ ($T_A < T \leq T_B$ için) alınmaktadır. Dolayısıyla hem taban kesme kuvvetleri hem de kat seviyelerine etkiyen eşdeğer deprem yükleri bu iki model için aynıdır. Ancak Geliştirilmiş Vlasov Modeli ile çözümde yapının doğal titreşim periyodu artmış ve $T_B < T$ olduğundan spektrum katsayısı $S(T)=2.5 \times (T_B/T)^{0.8}$ bağıntısından hesaplanmıştır. Bu durumda hesaplanan taban kesme kuvveti ve kat seviyelerine etkiyen eşdeğer deprem yükleri ilk iki modelden farklı olmuştur.

Kısa ve uzun kenar doğrultularında radye temelin orta eksenini boyunca düşey yer değiştirme ve eğilme momenti değişimleri ayrı ayrı incelenmiştir. Kısa kenar doğrultusunda (C-C eksenini boyunca) ve uzun kenar doğrultusunda (2-2 ve 3-3 eksenleri arası) radye temel boyunca oluşan düşey yer değiştirmelerin farklı zemin modellerine göre değişimi Şekil 5'de, eğilme momentlerinin farklı zemin modellerine göre değişimi ise Şekil 6'de verilmektedir.



Şekil 5. Farklı zemin modelleri için düşey yer değiştirmelerin radye temel boyunca değişimi



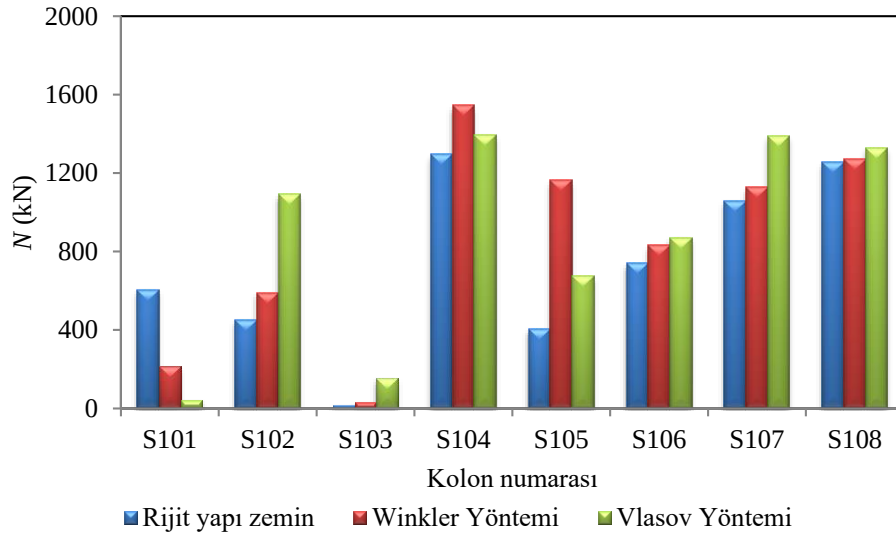
Şekil 6. Farklı zemin modelleri için eğilme momentlerinin radye temel boyunca değişimi

Winkler Modeli ile yapılan çözümde daha önce de bahsedildiği gibi yatak katsayısı 6300 kN/m^3 olarak kullanılmıştır. Geliştirilmiş Vlasov Modeli kullanılarak yapılan çözümde ise zemin parametreleri üst yapıdan aktarılan yüklere ve zeminin malzeme özelliklerine bağlı olarak detayı yukarıda anlatılan ardışık bir yöntemle belirlenmiştir. Bu şekilde belirlenen yatak katsayısı $k = 2100.227 \text{ kN/m}^3$ ve zemin kayma parametresi $2t = 92467.608 \text{ kN/m}^2$ olarak hesaplanmıştır.

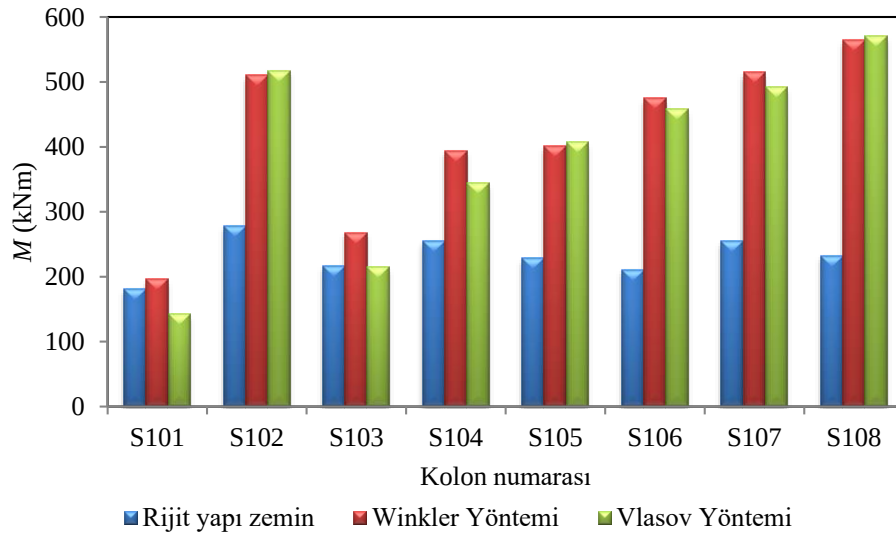
Her bir yük bileşimi için yapının en alt kolonlarında hesaplanan kolon eksenel kuvvetleri ve eğilme momentleri arasından en elverişsiz donatı oranını veren yük birleşimine göre belirlenen hesap kesit tesirleri Çizelge 3'te sunulmaktadır. Burada N kolon eksenel kuvvetini, M_x ve M_y ise sırasıyla x ve y eksenlerine göre kolon eğilme momentlerini göstermektedir. Çizelge incelendiğinde kolonlarda oluşan kesit etkilerinin C-C aksına göre simetrik çıktığı görülmektedir. Yani S101, S102, S103, S104 ve S105 kolonlarında elde edilen eksenel kuvvet ve eğilme momenti değerleri sırasıyla S111, S112, S113, S109 ve S110 kolonlarında elde edilenlerle aynıdır. Dolayısıyla kolonlardaki kesit tesirlerinin yapı-zemin modeli ile değişimini gösteren Şekil 7 ve Şekil 8 grafikleri sadece S101-S108 kolonları için çizilmiştir. Ayrıca Şekil 8'de sunulan grafik her iki doğrultuda elde edilen moment değerlerinin büyük olanı dikkate alınarak oluşturulmuştur.

Çizelge 3. Kolonlar için en elverişsiz boyuna donatı oranını veren N-M değerleri

Kolon No	Rijit Yapı-Zemin Modeli			Winkler Modeli			Geliştirilmiş Vlasov Modeli		
	N (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	N (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)	N (kN)	M_x (kNm)	M_y (kNm)
S101 ve S111	605.95	3.01	182.00	214.74	28.74	195.91	41.25	33.01	142.65
S102 ve S112	453.17	278.35	13.79	591.66	511.06	27.73	1091.95	517.60	10.66
S103 ve S113	17.54	19.81	217.51	32.56	21.61	268.13	154.00	34.52	214.72
S104 ve S109	1295.80	255.48	2.76	1545.77	394.36	4.13	1395.18	344.31	9.60
S105 ve S110	407.07	12.54	228.60	1164.26	9.32	401.16	675.79	46.18	407.12
S106	741.25	8.82	210.70	831.60	9.97	475.03	871.24	26.41	458.03
S107	1059.62	254.40	4.35	1127.24	514.72	8.79	1391.60	492.52	8.41
S108	1254.97	4.27	232.25	1274.21	5.13	565.21	1329.41	31.02	570.93



Şekil 7. Kolon eksenel kuvvetlerinin yapı-zemin modeli ile değişimi



Şekil 8. Kolon eğilme momentlerinin yapı-zemin modeli ile değişimi

Grafiklerden görüldüğü gibi rijit yapı-zemin modeli yerine elastik bir zemin modeli kullanmak S101 kolonu hariç kolon eksenel kuvvetlerinde artışa neden olmuştur. S104 ve S105 kolonlarında Winkler Modeli ile elde edilen eksenel kuvvetler diğer kolonlarda ise Geliştirilmiş Vlasov Modeli ile elde edilen eksenel kuvvetler en büyük değeri almıştır. Benzer şekilde elastik zemin modeli ile yapılan çözümler rijit yapı-zemin modeline göre daha büyük eğilme momenti değerleri vermiştir. Ancak farklı zemin elastisite modülü ve farklı yatak katsayısı değerleri için her iki zemin modelinde elde edilen kesit tesirlerinin değişebileceği unutulmamalıdır.

Çizelge 3'te verilen kesit tesirleri kullanılarak belirlenen kolon donatı oranları Çizelge 4'te sunulmaktadır. İki doğrultuda bileşik eğilme etkisindeki kolonların tasarımı için yaygın olarak üç farklı yaklaşım kullanılmaktadır. Bu yaklaşımlar; Bressler Yöntemini kullanmak, bir doğrultuda bileşik eğilmeye indirmek ve iki doğrultuda bileşik eğilme diyagramlarını kullanmak olarak sıralanabilir. Burada kolon boyuna donatı oranları hesaplanırken diğer doğrultudaki eğilme momentleri oldukça küçük olduğundan bir doğrultuda bileşik eğilmeye

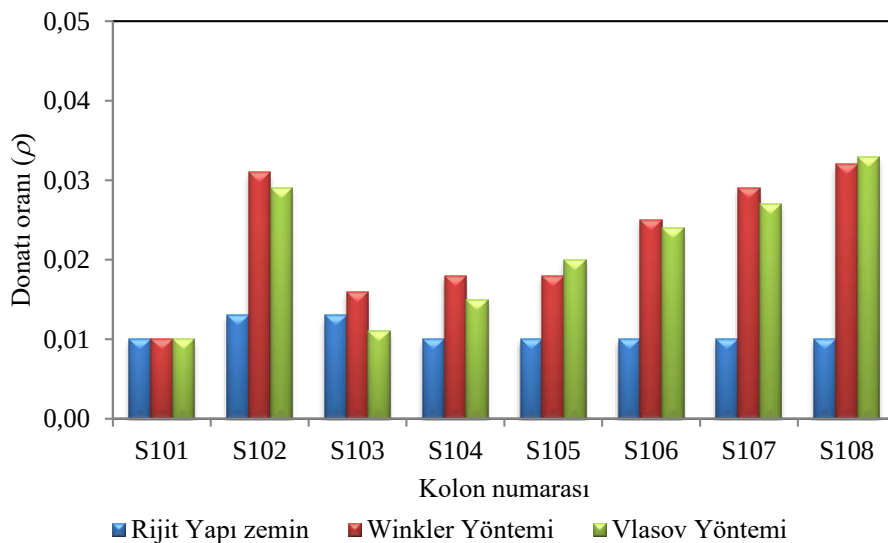
indirgeyerek hesap yapılmıştır. Bu yaklaşımla ilgili detaylı bilgi Doğangün'ün çalışmasında bulunabilir [23].

Çizelge 4. Kolon boyuna donatı oranlarının farklı zemin modellerine göre değerleri

Kolon No	Donatı Oranları (ρ)		
	Rijit Yapı Zemin Modeli	Winkler Modeli	Geliştirilmiş Vlasov Modeli
S101	0.010	0.010	0.010
S102	0.013	0.031	0.029
S103	0.013	0.016	0.011
S104	0.010	0.018	0.015
S105	0.010	0.018	0.020
S106	0.010	0.025	0.024
S107	0.010	0.029	0.027
S108	0.010	0.032	0.033
S109	0.010	0.018	0.015
S110	0.010	0.018	0.020
S111	0.010	0.010	0.010
S112	0.013	0.031	0.029
S113	0.013	0.016	0.011

Burada da elde edilen kolon boyuna donatı oranlarının üç zemin modeli ile değişimi ilk 8 kolon için Şekil 9'da verilmektedir. S101 kolonu için her üç zemin modelinde de minimum donatı oranı yeterli olmaktadır. Diğer kolonlarda ise rijit yapı-zemin kabulü yerine zeminin elastik bir modelle dikkate alınması boyuna donatı oranlarında artışa neden olmaktadır.

Genel olarak Winkler ve Geliştirilmiş Vlasov Modeli ile elde edilen kesit tesirlerinin ya da boyuna donatı oranlarının birbirleriyle karşılaştırılması uygun olmamaktadır. Zira Winkler Modeli için zemin yatak katsayısının değişmesi ya da Geliştirilmiş Vlasov Modeli için zemin özelliklerinin değişmesi iki sonuç arasındaki ilişkiyi de değiştirecektir.



Şekil 9. Kolon boyuna donatı oranlarının yapı-zemin modeli ile değişimi

4. SONUÇLAR

Bu çalışmada yapı-zemin etkileşiminin betonarme yapıların tasarımına etkisi araştırılmıştır. Seçilen 8 katlı bir betonarme yapı için rijit yapı-zemin, Winkler ve Geliştirilmiş Vlasov Modelleri kullanılarak SAP2000 paket programı yardımıyla çözülmüştür. Ancak program içerisinde daha gerçekçi bir model olan Geliştirilmiş Vlasov Modeli'ni tanımlayabilmek amacıyla MATLAB'te geliştirilen bir arayüz SAP2000 V15 ile eş zamanlı olarak kullanılmıştır. Bu sayede SAP2000 paket programına kendi içerisinde var olmayan Geliştirilmiş Vlasov Yöntemi ile çözüm yapma kabiliyeti kazandırılmıştır. Bu yöntem ile üst yapıdan aktarılan yükler ve zeminin elastik özelliklerinden faydalanarak zemin parametrelerinin belirlenmesi suretiyle yapı-zemin etkileşimi daha gerçekçi bir şekilde modellenebilmektedir.

Zemin etkilerinin üst yapı tasarımında dikkate alınması incelenen yapıda kolonların kesit tesirleri ve boyuna donatı oranları üzerinde önemli değişimlere neden olmuştur. Elde edilen sonuçlar yapı-zemin etkileşiminin sadece temel tasarımında dikkate alınması gereken bir unsur olmadığını aynı zamanda üst yapıda da önemli etkilere sahip olduğunu göstermiştir. Çalışmanın sonunda üst yapı taşıyıcı elemanlarının tasarımında zemin etkilerinin dikkate alınması gerektiği sonucuna varılmaktadır.

Elde edilen sonuçlar yapının geometrisine, zemin özelliklerine ve zemin modellerine bağlı olarak değişkenlik gösterebilir.

KAYNAKLAR

- [1] Selvadurai APS. *Elastic Analysis of Soil-Foundation Interaction*, Amsterdam: Elsevier Scientific Publishing Company, 1979.
- [2] Nadjai A, Johnson D. Elastic Analysis Of Spatial Shear Wall Systems with Flexible Bases, *The Structural Design of Tall Buildings*, Cilt. 5, 1996, s.55-72.
- [3] Mısır İS, Özden G, Kahraman S. Temel-Zemin Yaylarının Alansal Etkileşimi ve Yapı Davranışına Etkisi, *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 2005, s.1064-1073.
- [4] Rashed YF. A Boundary/Domain Element Method for Analysis of Building Raft Foundations, *Engineering Analysis with Boundary Elements*, Cilt. 29, 2005, s.859-877.
- [5] Kahraman S, Mısır İS, Özden G. Sabit ve Değişken Yatak Katsayısı Yaklaşımlarının Yapı Davranışına Etkisi, *Altıncı Ulusal Deprem Konferansı*, İstanbul, Türkiye, 2007, s.217-228.
- [6] Karabörk T. Yapı-Zemin Etkileşimi Dikkate Alınarak Betonarme Yapıların Doğrusal Olmayan 3 Boyutlu Dinamik Analizi, *Yapı Teknolojileri Elektronik Dergisi*, Cilt. 5, No. 1, 2009, s.25-36.
- [7] Korkmaz KA, Demir F. Yapı-Zemin Etkileşiminin Yapıların Deprem Davranışına Etkileri, *Mehmet Akif Ersoy Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, cilt. 3, No. 1, 2012, s.12-17.
- [8] Hamarat MA, Çalık KÜH, Orakdöğen E. Seismic Analysis of Structures Resting on Two Parameter Elastic Foundation, *15 WCEE*, Lizbon, 2012.
- [9] Thangaraj DD, Ilamparuthi K. Interaction Analysis of MAT Foundation and Space Frame for Non Linear Behaviour of the Soil, *Bonfring International Journal of Industrial Engineering and Management Science*, Cilt. 2, No. 4, 2012, s.33-40.

- [10] Derdiman MK. Farklı Özelliklere Sahip Zeminlerin Betonarme Yüksek Yapılarda Yapı Salınım Periyoduna Etkisi, *Afyon Kocatepe Üniversitesi Fen ve Mühendislik Bilimleri Dergisi*, cilt. 13, 2013, s.9-15.
- [11] Frydrysek K, Janco R, Gondek H. Solution of Beams, Frames and 3D Structures on Elastic Foundation Using FEM, *International Journal of Mechanics*, Cilt. 4, No. 7, 2013, s.362-369.
- [12] Ionescu A, Calbureanu M, Negru M. Boussinesq Method in Seism Analysis of a Building Structure Using ANSYS Program, *WSEAS International Conference*, Vouliagmeni, Atina, Yunanistan, 2013, s.198-201.
- [13] Ahmed M, Mohamed MH, Mallick J, Hasan MA. 3D-Analysis of Soil-Foundation-Structure Interaction in Layered Soil, *Open Journal of Civil Engineering*, cilt. 4, 2014, s.373-385.
- [14] Avcıoğlu O, Orakdöğen E. Vlasov Zeminine Oturan Yapıların Zaman Tanım Alanında Analizi, *Pamukkale Üni. Müh Bilim Dergisi*, Cilt. 21, No. 3, 2015, s103-108.
- [15] SAP2000. *Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures*, Berkeley: Computers and Structures, Inc., 2008.
- [16] MATLAB. *The Language of Technical Computing*, Natick: The Mathworks, 2009.
- [17] Özgan K. Geliştirilmiş Vlasov Modelini Kullanarak Elastik Zemin Oturan Kalın Plakların Sonlu Elemanlar Yöntemiyle Analizi ve Etkin Zemin Derinliğinin Belirlenmesi, Doktora Tezi, Trabzon: Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2007.
- [18] Hamarat MA. İki Parametrelili Zemin Üzerine Oturan Yapı Sistemlerinin Dinamik Analizi, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul: İstanbul Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 2012.
- [19] Kılıçer S, Özgan K, Daloğlu AT. Radye Temellerin Vlasov Yöntemiyle Modellenmesi, *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği 2.Özel Konulu Sempozyumu: Teori ve Uygulamada Zemin-Yapı Etkileşimi*, Antalya, Türkiye, 24-25 Nisan, 2014, s.151-156.
- [20] Girgin SC, Mısırlı S, Özden G, Kahraman S. Yapı Zemin Etkileşiminin Yapısal Tasarımdaki Rolü, *DEÜ Mühendislik Fakültesi Fen ve Mühendislik Dergisi*, Cilt. 10, No. 1, 2008, s.27-37.
- [21] DY-2007. *Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik*, Ankara: Bayındırlık ve İskan Bakanlığı, 2007.
- [22] TS500-2000. *Betonarme Yapıların Tasarım ve Yapım Kuralları*, Türk Standartları Enstitüsü, 2000.
- [23] Doğangün A. *Betonarme Yapıların Hesap ve Tasarımı*, 10. baskı İstanbul: Birsan Yayınevi, 2013.

ÖZGEÇMİŞ/CV

Korhan ÖZGAN; Doç. Dr. (Assoc. Prof.)

Lisans derecesini 1997 yılında, Yüksek Lisans derecesini 2000 yılında ve Doktora derecesini 2007 yılında Trabzon Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümün'den aldı. 2000-2011 yılları arasında özel sektörde çeşitli firmalarda meslek hayatını sürdürdü. 2011 yılından beri Karadeniz Teknik Üniversitesi, İnşaat Mühendisliği Bölümün'de öğretim üyesi olarak çalışmaktadır. Temel çalışma alanları Betonarme, Çelik ve Ahşap Yapılar, Yapı-Zemin Etkileşimi üzerinedir.

He got his bachelors' degree, master degree and PhD degree in the Civil Engineering Department at Karadeniz Technical University, Trabzon/Turkey in 1997, 2000 and 2007 respectively. Between 2000-2011 years, he continued his career in the private sector. He is an academic member of the Civil Engineering Department at Karadeniz Technical University since 2011. His major areas of interests are: Reinforced-concrete, Steel and

Timber Structures, Soil-Structure Interaction.

Saffet KILIÇER; Araş. Gör. (Research Assist.)

Lisans derecesini 2010'da Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden aldı. 2012 yılında başladığı yüksek lisans öğrenimine Karadeniz Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde devam etmektedir. Necmettin Erbakan Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nde 2011-2013 yılları arasında araştırma görevlisi olarak görev almış. 2013'de başladığı Artvin Çoruh Üniversitesi Çevre Mühendisliği Bölümü'nde araştırma görevlisi olarak görevine hala devam etmektedir. Temel çalışma alanı: Yapı Anabilim Dalı üzerinedir.

He got his bachelors' degree in the Civil Engineering Department at Karadeniz Technical University, Trabzon/Turkey in 2010. His master degree is still in the Civil Engineering Department at Karadeniz Technical University, Trabzon/Turkey since 2012. He worked as a researcher assistant for Necmettin Erbakan University between 2011-2013 dates. He is still a researcher assistant of the Environmental Engineering Department at Artvin Coruh University. His major area of interests is: Department of Construction.

Ayşe T. DALOĞLU; Prof. Dr. (Prof.)

Ayşe Turhan Daloğlu KTÜ İnşaat Mühendisliği Bölümünden 1983 yılında mezun oldu ve aynı bölümden 1985 yılında yüksek lisans derecesini aldı. 1992 yılında Texas Tech Üniversitesinde doktora derecesiyle mezun oldu. 1993-99 yılları arasında KTÜ İnşaat Müh. Bölümünde Yardımcı Doçent olarak görev yaptı. 1998-2000 yılları arasında Texas Tech Üniversitesi Mühendislik Teknolojileri bölümünde misafir öğretim üyesi olarak ders verdi. 1999 yılında Doçent 2005 yılında Profesör oldu. 1993 yılından beri öğretim üyesi olduğu KTÜ Mühendislik Fakültesi'nde 2001-2004 yılları arasında Dekan Yardımcısı, 2008-2010 yılları arasında İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı olarak görev yaptı. 2014-2015 Bahar yarıyılında Doğu Akdeniz Üniversitesi İnşaat Mühendisliği bölümünde ders verdi. Uzmanlık alanı Yapı mühendisliği olan Daloğlu yapı-zemin etkileşimi, çelik yapılar, yapıların optimum tasarımı ve çelik çatılarda kar yükleri alanlarında araştırmalar yapmaktadır.

Ayşe Turhan Daloğlu is graduated from Civil Engineering Department at Karadeniz Technical University in 1983. She took McS degree in structural engineering area from the same university in 1985. She earned her PhD degree from Civil Engineering Department at Texas Tech University, USA, at the end of 1992. She worked as Assist. Prof. in Civil Engineering Department at Karadeniz Technical University between 1993-1999. She spent two years in the Department of Engineering Technology at Texas Tech University as visiting scholar between 1998-2000. She became Assoc. Prof. in 1999, and full Prof. in 2005. She has been working as faculty member at Karadeniz Technical University since 1993. She served as Vice Dean in Faculty of Engineering at the Karadeniz Technical University between 2001-2004, and Department Chair of Civil Engineering at Karadeniz Technical University between 2008-2010. She served as an adjunct professor in Civil Engineering Departments of Karadeniz Technical and Eastern Mediteranian Universities in the spring semester of 2015. She is specializing in Structural Engineering. Her areas of research are soil-structure interaction, steel structural design, optimum design of structures, snow loads on steel roofs.

Ali İ. KARAKAŞ; Araştırma Görevlisi (Research Assist.)

İnşaat Mühendisliği Lisans eğitimini 2009 yılında Boğaziçi Üniversitesinde tamamladı. Yüksek Lisans derecesini ise 2012 yılında Karadeniz Teknik Üniversitesinden alarak aynı üniversitede halen Doktora eğitimine araştırma görevlisi olarak devam etmektedir. Eksenel Simetrik Yapılar, Sonlu Eleman Yöntemi, Çelik Yapılar ve Yapı-Zemin Etkileşimi üzerine çalışmalarını sürdürmektedir.

He is graduated from Civil Engineering Department at Boğaziçi University in 2009. He got his master degree at Karadeniz Technical University in 2012 and continues his PhD degree at the same university as a research assistant. He has been studying on Axisymmetric Structures, Finite Element Method, Steel Structures and Soil-Structure Interaction Problems.