

Sismik ve boyutsal parametrelerin istinat duvarlarının maliyetine etkisi

Münire FINDIK*¹

¹Süleyman Demirel Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, İnşaat Mühendisliği Bölümü, 32200 Isparta, Türkiye

(Alınış / Received: 01.09.2023, Kabul / Accepted: 30.01.2024, Online Yayınlanma / Published Online: 27.04.2024)

Anahtar Kelimeler

Konsol istinat duvarı
Zemin- yapı etkileşimi
Sonlu elemanlar yöntemi

Öz: Mühendislik yapılarının tasarımındaki temel amaç; yükler altında stabilite, yer değiştirme, , ekonomiklik vb. kriterlerin sağlanmasıdır. Uygulamada en çok tercih edilen dayanma yapısı olan betonarme konsol istinat duvarlarının statik ve dinamik toprak basınçları altındaki tasarımı karmaşık bir problemidir. Bu çalışmada Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018) dikkate alınarak 3 farklı yükseklikteki betonarme konsol istinat duvarının statik ve dinamik kuvvetler altında eşdeğer statik analizi gerçekleştirilmiştir. Sismik yükler hesaplanırken İzmir, Isparta ve Konya olmak üzere 3 farklı konumdaki spektral ivmeler belirlenerek analizler yapılmıştır. Sap 2000 sonlu elemanlar analiziyle yapısal davranış incelenmiş ve Sta4cad programıyla betonarme tasarım gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizler sonucunda sismik parametrelerin konumsal değişimi ve yükseklik artışının; gerilme dağılımı, yer değiştirmedeki etkisine bağlı olarak betonarme tasarımda birim alana düşen yapısal maliyetin arttığı belirlenmiştir.

Effect of seismic and dimensional parameters on the cost of retaining walls

Keywords

Cantilever retaining wall
Soil-structure interaction
Finite element method

Abstract: The main purpose in the design of engineering structures; stability under loads, displacement, force capacity, economy, etc. meeting the criteria. The design of reinforced concrete cantilever retaining walls, which is the most preferred bearing structure in practice, under static and dynamic earth pressures is a complex problem. In this study, equivalent static analysis of reinforced concrete cantilever retaining walls of 3 different heights under static and dynamic forces was carried out, taking into account the Turkish Building Earthquake Code (TBDY 2018). While calculating seismic loads, spectral accelerations in 3 different locations, İzmir, Isparta and Konya, were determined and analyzes were made. Structural behavior was examined with Sap 2000 finite element analysis and reinforced concrete design was realized with Sta4cad program. As a result of the analyzes made, the spatial variation of the seismic parameters and the elevation increase; It has been determined that the structural cost per unit area increases in reinforced concrete design depending on the effect of stress distribution on displacement.

1. Giriş

Zeminin iki farklı seviyede ve doğal şevlerden daha dik açılarda tutulması gerektiği yerlerde veya toprak kaymasını engellemek amacı ile imal edilen mühendislik yapıları dayanma yapıları olarak adlandırılır. Dayanma yapıları, yapıların çevre güvenliğinin sağlanması, düşey kazıların güvenliğinin uzun süreli ya da geçici olarak sağlanması ve toprak basıncının karşılanması amacıyla dizayn edilirler [1]. Zemin tutma yapıları içten ve dıştan stabilize

edilenler olarak ikiye ayrılmaktadır. İçten stabilize edilmiş sistemlerde duraylılığı sağlamak için zemin güçlendiriliren yaygın örnekleri donatılı zeminler ve zemin çivilemesidir. Dışarıdan stabilize edilenler zemin yüklerine kendi ağırlıkları ve rijitlikleri ile karşı koyabilen sistemlerdir [2]. Bunlarda yanal zemin itkileri karşısındaki davranışları bakımından; rijit ve esnek istinat duvarları olarak ikiye ayrılmaktadır. Rijit olan yerçekimi (ağırlık) duvarları statik dengeyi sağlamak için kendi ağırlıklarını kullanırken, esnek konsol istinat duvarları stabilite kuvvetlerinin ve

*İlgili yazar: mnr.dikmen@gmail.com

momentlerinin bir kısmını topuğun üzerindeki dolgu zemininden alır. Eğilme rijitlikleri fazla olan rijit dayanma yapıları çok küçük deplasmanlar yapar. Esnek dayanma yapıları ise eğilmeye karşı rijitlikleri az olduğu için, rijit dayanma yapılarına oranla daha fazla deformasyona uğrarlar. Betonarme istinat duvarları da davranışsal olarak rijit dayanma duvarlarına örnek gösterilebilir.

Tasarım prensiplerine göre, istinat duvarlarına etkiyen statik zemin basınçları hesaplanır bir güvenlik katsayısı ile bölünerek duvarın stabilite tahkikleri yapılmaktadır. Ama statik basınçları dikkate alarak tasarım yapmak güvenlik açısından her zaman yeterli değildir. Özellikle deprem bölgesindeki istinat duvarlarında aktif yer hareketinden dolayı duvara etkiyen dinamik basınçların etkileri statik basınçlardan farklı olacaktır. [3]. Dayanma yapılarından en çok tercih edilen betonarme konsol istinat duvarlarının deprem etkisindeki tasarımı karmaşık bir mühendislik problemidir. Depreme dayanıklı tasarımda hem statik hem dinamik basınçlar dikkate alınacaktır [4].

Tasarımı yapılan betonarme konsol istinat duvarları bütünüyle taşıma gücü, kayma ve devrilme açısından stabilite tahkiklerini sağlamalıdır. Ayrıca istinat duvarının gövde, ön ve arka ampatman kısmında oluşacak olan eğilme momentleri ve kesme kuvvetleri de emniyetli değerler sınırında kalmalıdır. Bunun için ön tasarım değerlerine göre parametreleri belirlenir. Yanal toprak basıncı teorisi dikkate alınarak duvara etkiyen tüm kuvvetler ve gerilmeler hesaplanmakta ve yapılan analizler sonucunda tasarım kriterlerinin statik ve dinamik açıdan sağlanıp sağlanmadığı kontrol edilmektedir.

Literatürde, statik ve dinamik zemin basınçlarını dikkate alarak tasarım yapan ve bu tasarımı etkileyen parametreleri inceleyen birçok çalışma mevcuttur. Maliyeti minimum olan betonarme istinat duvarı tasarımı; temel zemin özellikleri, duvar özellikleri, geri dolgu özellikleri gibi birçok parametreden etkilenmektedir.

Konsol bir istinat duvarının güvenli bir tasarım için gereken ideal duvar taban genişliğinin, istinat duvarının boyutsal parametreleri (yükseklik, genişliği ve temel yüksekliği) ve zeminin mühendislik özellikleri gibi parametreler ile değişimini araştırarak çalışmalar mevcuttur. Binici ve Öztürk devrilme, ve kaymaya karşı güvenli bir tasarım için gerekli taban genişliğinin; duvar yüksekliğinin artması ve artan dolgu birim hacim ağırlığı ile arttığını belirlemişlerdir. Taban boyutunun üzerinde, artan duvar kalınlığının ve artan temel yüksekliğinin etkisi az olduğunu görmüşlerdir. Ayrıca dolgunun içsel sürtünme açısının artışı, beklendiği üzere güvenli bir tasarım için gereken taban genişliğini azaltmıştır [5]. Yükseklik ve sürsarj yükü arttıkça duvar maliyeti artmış, içsel sürtünme açısı arttıkça duvar maliyeti azalmıştır [6].

Dağdeviren ve Kaymak, istinat duvarlarının maliyetinde geri dolgunun farklı içsel sürtünme açıları, sürsarj yükleri, duvar yüksekliklerine ilave olarak duvarın ön kısmında oluşacak pasif dirençlerin etkilerini incelemişlerdir. Duvar yüksekliği artışının duvar maliyetini arttırdığını belirlemişlerdir. Sürsarj yükünün her artışı duvar maliyetini artırırken, dolgunun içsel sürtünme açısındaki artış maliyeti azaltmıştır. Ayrıca, duvar önünde oluşan pasif direncin artışının duvar maliyeti üzerinde etkisinin olmadığını görmüşlerdir [7].

İstinat duvarının stabilitesini (devrilme, kayma ve zemin gerilme kapasitesini), eğilme kapasitesini ve betonarme tasarımını içeren analizler yapılmıştır. Temür ve Bektaş, duvar tasarımının L ve T kesitli olması durumları ve gövde kalınlıklarının sabit ve değişken olmasını incelemiş her ikisinde de T kesitlerinin daha ekonomik olduğunu görmüşlerdir. Deprem bölgelerinin değişken olması maliyet farkı oranları birbirine yakın olmuştur. Duvar yüksekliğinin artışı ile maliyetin arttığını gözlemlemişlerdir [8].

İstinat duvarının tasarımında; zemin koşullarının etkisi, dolgu zemin özelliklerinin etkisi ve duvar tipinin önemini incelemek için konsol ve ağırlık istinat duvarı modelleri ele alınmıştır. Gürsoy yaptığı analizler ışığında; zemin esneklikçe (Z1 sınıfından Z4 sınıfına ilerledikçe) her bir zemin sınıfı için aktif zemin etkilerinin %2,5~3 artırılmasının bu duvarların depreme göre tasarımı için daha güvenli olacağı sonucuna ulaşmışlardır [9].

Konsol istinat duvarının optimum tasarımını elde edebilmek için geri dolgu zeminin mukavemet parametrelerini ve duvar yüksekliğini değiştirerek analizler yapmış; mukavemet parametrelerinin ve duvar yüksekliğinin artışının maliyeti arttırdığını, ancak bu artışın doğrusal olmadığını belirlemişlerdir. Ayrıca topuk boyutunun istinat duvarının yükseklik artışı ile doğrusal bir ilişki gösterdiğini gözlemlemişlerdir. Burun kısmının boyut değişimi 7 m yüksekliğe kadar sabit kalmış sonrasında artmıştır. Ancak yüksekliğe bağlı burun boyutlarının değişimi, topuk kısmının boyut değişimine kıyasla düşük oranlarda gerçekleşmiştir [10].

Betonarme konsol istinat duvarlarının optimumtasarımı için statik aktif ve pasif kuvvetler dikkate alınmış, dinamik etkiler devre dışı bırakıldığında zeminin mukavemet parametrelerinin artışı güvenli tasarım için gerekli boyutları küçültmüş bu da duvar maliyetlerini %20 oranında azaltmıştır [11].

Bir yarı ağırlık duvarı ve ters T tipi konsol istinat duvarlarının göçme mekanizması ve yanal toprak basıncı dağılımını sayısal olarak incelenmişler ve sonucunda yanal toprak basıncının istinat tipine göre değiştiğini ve bunda da temas yüzeylerinin etkili olduğunu görmüşlerdir. Topuk boyutu ve duvar

yüzeyinin eğiminin değişmesi de yanal basınç gerilmelerinin değişiminde etkili olmuştur [12].

Bir istinat duvarının dinamik davranışını; zeminde bulunan yeraltı su seviyelerinin değişimine bağlı olarak incelemişlerdir. Zemin-yapı etkileşiminin istinat duvarlarının sismik davranışında çok önem arz ettiğini, yeraltı su seviyesindeki değişimlerin duvarın yatay hareketini artırdığını ve duvar üzerinde oluşan gerilmeleri önemli derecede etkilediğini belirtmişlerdir [13].

Statik yükler ve deprem yükleri altında betonarme konsol bir istinat duvarının tasarımı için optimizasyon metodu geliştirmiş ve farklı boyuttaki istinat duvarlarını analiz etmişlerdir. Geliştirilen bu optimizasyon yöntemi ile daha düşük inşaat maliyetleri elde edildiğini görmüşlerdir [14].

Farklı yükseklikteki ağırlık ve konsol istinat duvarları statik ve dinamik yükler altında Plaxis 2D ile analiz edilmiştir. Analizler sonucunda, 5 m ve 10 m yüksekliğindeki ağırlık ve konsol istinat duvarlarının 7.0 büyüklüğündeki bir depreme kadar yapımının statik ve dinamik açıdan uygun olduğunu ancak her iki duvar tipinde de 15 m yüksekliğindeki duvar imalatının güvenli olmadığını belirtmişlerdir [15].

Zeminlerin istinat duvarı ile karşılıklı etkileşimi, her ikisinin de dinamik etkilerdeki karakterlerini yönetmektedir. Bu etkileşim duvarın kütle ve rijitlik dağılımını etkilediğinden duvarın mod ve periyot şekilleri değişmektedir. Mod ve periyot ise sismik performanslarını ve depremde hasar alma şekillerinde önemli rol oynamaktadır. Zeminin rijitliği azaldıkça duvarın yatay yer değiştirmesi artmıştır. Duvar deplasmanlarının artmasıyla zemin içinde oluşan gerilmeler de artar. Gerilmeler sonucunda elastik olan davranış elastik durumdan elasto-plastik duruma ve nihai olarak göçme limit durumuna ulaşmaktadır. Bu sebeple duvarda oluşan

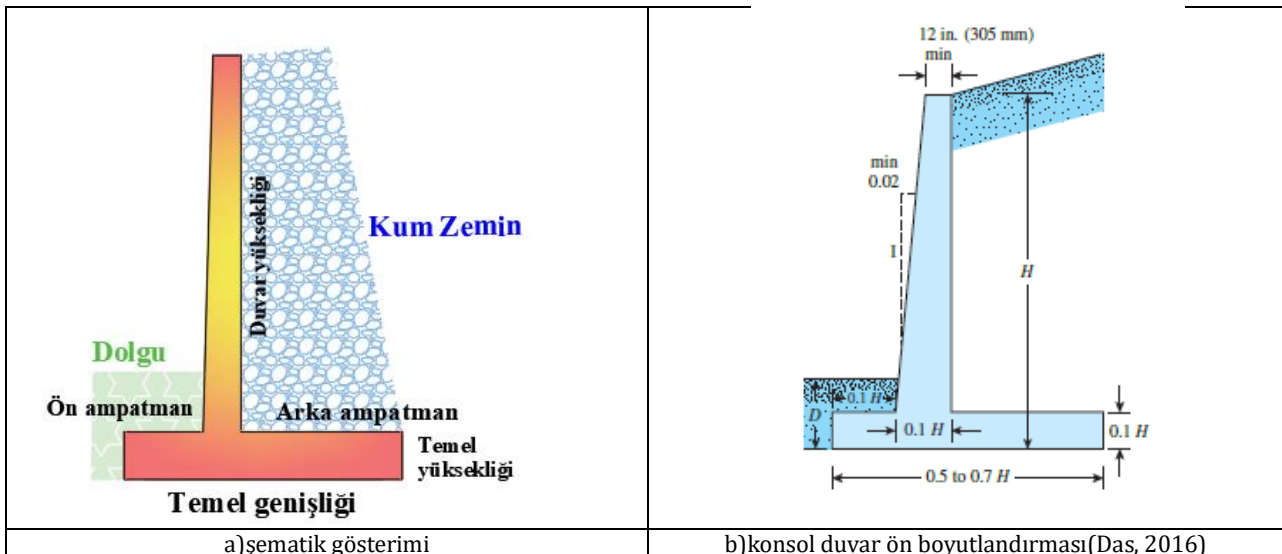
basınçlarının büyüklüğü ve dağılımı hareket modlarından etkilenmektedir [16].

Literatürde en çok tercih edilen konsol istinat duvarları için yapılmış parametrik, maliyet analizi, optimizasyon çalışmaları mevcuttur. Bu çalışmada ise ülkemize 01.01.2019 yılında ülkemizde yürürlüğe giren Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği [17] dikkate alınarak 3 farklı yükseklikteki betonarme konsol istinat duvarının statik ve dinamik kuvvetler altında eşdeğer statik analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan analizlerde dayanma yapısının altında kum zemin olduğu varsayılmıştır. Kum zemin için yapı yüksekliğine bağlı olarak dayanma yapısına gelen yükler hesaplanmıştır. Sismik yükler hesaplanırken İzmir, Isparta ve Konya olmak üzere 3 farklı konumdaki spektral ivmeler belirlenerek analizler yapılmıştır. Analizler sonucunda yapı yüksekliğinin maliyete etkisi birim alanda gerekli olan donatı metrajıyla belirlenmiştir. Çalışma kapsamında yapısal davranışın değerlendirilmesinde istinat yapılarına etkiyen yükler altında gerilme dağılımı, tepe deplasmanları sunulmuştur.

2. Materyal ve Metot

Bu çalışmada kapsamında yapı-zemin etkileşimi ve değişken duvar yükseklikleri dikkate alınarak, bu etkileşimin ve yükseklik değişiminin konsol betonarme istinat duvarlarının statik ve sismik davranışı üzerindeki etkileri sonlu elemanlar yöntemiyle irdelenmiştir. İki farklı yapısal analiz programı olan SAP 2000 ve STA4CAD'den yararlanılarak sonlu elemanlar modelleri oluşturulmuş ve çözümlenmeleri yapılmıştır.

Literatürde belirtilen ön boyutlandırma değerleri dikkate alınarak tasarım boyutları belirlenmiştir. Tasarlanan konsol istinat duvarı geometrisi ve ön boyutlandırma kuralları Şekil 1'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Konsol istinat duvarının geometrisi

Konsol istinat duvarları 8 metre civarındaki yükseklikler için ekonomik sonuçlar vermiştir. Bunun nedeni konsol duvarın radye ile birleşimindeki mukavemetin bu yükseklikten sonra sağlanamamasıdır [18,19]. Bu amaçla literatürdeki ön boyut tasarımı dikkate alınarak analizi yapılacak konsol istinat duvarlarının toplam yükseklikleri 3,2, 6

ve 7.6 metre olarak seçilmiş, duvar ve temel boyutları Tablo 1'de detaylıca sunulmuştur. Toplam duvar yüksekliği 3.2 m olan model İST 3, 6 m olan model İST 6, 7.6 m olan model İST 7.5 kodlamasıyla temsil edilmiştir. Analizlerde ve sonuçların yorumlanmasında bu kodlama kullanılmıştır.

Tablo 1. Konsol istinat duvarının ölçüleri

Kodlama	Toplam yükseklik	Duvar yüksekliği	Temel yüksekliği	Duvar üst genişliği	Ön ampatman	Arka ampatman	Temel genişliği
İST- 3	3.2 m	2.8	0.4	0.4	0.6	1.2	2.2
İST- 6	6 m	5.4	0.6	0.4	1.2	2.7	4.5
İST-7.5	7.6 m	6.9	0.7	0.6	1.8	3.1	5.5

Zemin-yapı etkileşimini değerlendirebilmek amacıyla dikkate alınan temel zemini, dolgu zemin, beton ve yapı çeliğinin parametreleri Tablo 2'de sunulmuştur. Sonlu elemanlar çözümlerinde betonarme istinat duvarına ait Poisson oranı 0.20, birim hacim ağırlık 30 kN/m³, elastisite modülü 30000 MPa, olarak dikkate alınmıştır. Çalışma kapsamında da sürtünme açısı 0.66* ϕ olarak tercih edilmiştir. Çünkü duvar-zemin sürtünme açısının en fazla katkı sağladığı aralığı bulmak amacıyla farklı kayma direnci (ϕ) açıları kullanarak analizler yapmışlar ve duvar sürtünme açısının (2/3* ϕ) değerinden sonra olumlu etkisinin azaldığını görmüşlerdir [20].

İstinat duvarının perde ve temel bölümü Sap2000 de kabuk (Shell- thin) malzeme olarak tanımlanmıştır.

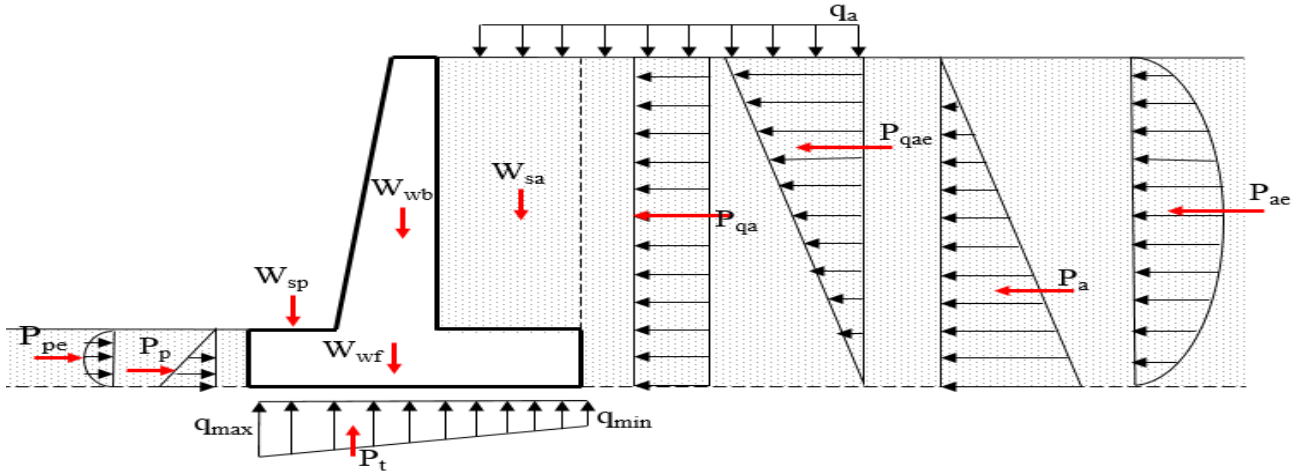
Tablo 1 de verilen geometrilerde çizilerek malzeme atamaları yapılmıştır. Analizlerde yapı zemin etkileşimi Shell elemanlara yay sabiti tanımlanarak sağlanmıştır. Yay sabiti kum zemin için 120000 Kn7m hesaplanmış ve programa tanıtılmıştır. Duvar üzerindeki sürsarj yükü 10 kPa kabul edilmiştir. Ön ampatman üzerine 1 metrelik zemin yükü ve arka ampatman üzerine duvar yüksekliği kadar zemin yükü tanımlanmıştır. Yatay zemin itkiside aktif zemin basıncı dikkate alınarak yatayda artan kesitle basınç olarak tanımlanmıştır. Ölü yük (G), hareketli yük (Q) zemin yanal itkisi (Yİ), ve sürsarj (S), durumu için yük tanımlamaları yapılmıştır. Analizlerde sonuçların gözlemlenebilmesi için kombinasyonlar; 1.4G+1.6Q (Comb1), G+Q (Comb2), G+Q+S+Yİ (Comb3) olarak tanımlandı.

Tablo 2. Malzeme parametreleri

Adı	Birim Hacim ağırlık (kN/m ³)	Elastisite Modülü (MPa)	Poisson oranı	İçsel sürtünme açısı
Kum	19	105	0,3	35
Dolgu	18	50	0,3	30
C30/37	30	30000	0.2	-
S420	77	200000	0.3	

Dünyadaki tüm mühendislik yapıları statik ve dinamik yüklere maruz kalırlar ve bu yükler dahilince tasarlanmaktadır. Statik durumda yapının kendi ağırlığı ve hizmet ettiği işe bağlı olarak yapıya etki eden statik yükleri taşıyacak şekilde hesap yapılırken, dinamik durumda bölgenin deprem geçmişi ve mevcuttaki deprem bölgesi güvenlik katsayıları dikkate alınarak etkiyen yükler hesaba dahil

edilmektedir. Dinamik yüklerin büyüklüğü ve etki süresinin statik yükler gibi tahmin edilmesi mümkün olmadığından; özellikle yapılarda bu kuvvetlerin mevcut kesitlerde hasar oluşturacak yerlerinin belirlenmesi ve buralarda taşıma kapasitesinin belirlenip sünekliğin sağlanması ciddi önem arz etmektedir [21].



Şekil 2. Konsol istinat duvarına etki eden yükler [22]

Şekil 2’de konsol bir istinat duvarı ve bu duvara etkileyen yükler gösterilmiştir. W_{wb} istinat duvarı ağırlığını, W_{wf} temel ağırlığını, W_{sp} ön ampatmana etki eden zemin ağırlığını, W_{sa} arka ampatmana etki eden zemin ağırlığını, q_a sürşarj yükünü, P_{qa} sürşarj yükünden kaynaklı aktif toprak basıncını, P_{qae} sürşarj yükünden kaynaklı depremlı durumdaki aktif toprak basıncını, P_a aktif toprak basıncını, P_{ae} depremlı durumdaki aktif toprak basıncını, P_p pasif toprak basıncını, P_{pe} depremlı durumdaki pasif toprak basıncını, P_t temel altında oluşan taban kesme kuvvetini ifade etmektedir.

Dinamik basıncın etkidiği nokta ile ilgili birçok teori mevcuttur. Prakash ve Saran [23] dinamik aktif itkinin duvar tabanından itibaren 0.5 H yükseklikte etkimiş olduğunu belirlemişler. Prakash ve Basavanna [24] aktif itkinin sismik bileşenin duvar altından 2H/3 kadar üstte etkimesi gerektiğini göstermişlerdir. Whitman [25] dinamik aktif basıncın duvar tabanından 0.6H yukarıda etkidiğini belirtmiştir. Mononobe-Okabe [26,27] deneysel bulgularla, dinamik itkinin duvar dibinden itibaren yaklaşık H/3 kadar yukarıda etki etmekte olduğunu ifade ederken sonlu elemanlar yöntemi ile elde edilen analizlerde 0.4H-0.5H aralığında olduğu tahmin edilmekte ve

TBDY 2018 [17]’de dinamik toprak basınçlarının 0.5 H yükseklikte etki etmesi gerektiğini ifade edilmiştir.

Aktif ve pasif toprak basınçlarının hesabında sırasıyla yatay ve düşey statik-eşdeğer deprem katsayısı olan k_h ve k_v kullanılmaktadır. Buradaki r katsayısı konsol istinat duvarlarının statik çözümü için 1.5 seçilmiştir.

$$k_h = (0.4 * S_{DS})/r \quad (1)$$

$$k_v = 0.5 k_h \quad (2)$$

Türkiye Deprem Tehlike Haritası’ndan elde edilen S_s değeri kullanılarak kısa periyot tasarım spektral ivme katsayısı değeri olan S_{DS} Denklem 3’e göre hesaplanmaktadır. S_{DS} değeri zemin sınıfına göre değişkenlik göstermektedir.

$$S_{DS} = S_s * F_s \quad (3)$$

Denklem 3’deki S_s değeri Türkiye Deprem Tehlike Haritası’ndan (TDTH 2018)[28] elde edilen harita spektral ivme katsayısı, F_s ise kısa periyot bölgesi için yerel zemin etki katsayısıdır. F_s değerleri yerel zemin sınıfı ve S_s değerlerine bağlı olarak Tablo 3’de verilmiştir.

Tablo 3. Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayıları (TBDY 2018)

Yerel Zemin Sınıfı	Kısa periyot bölgesi için Yerel Zemin Etki Katsayısı F_s					
	$S_s \leq 0.25$	$S_s = 0.50$	$S_s = 0.75$	$S_s = 1.00$	$S_s = 1.25$	$S_s \geq 1.50$
ZA	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8	0.8
ZB	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
ZC	1.3	1.3	1.2	1.2	1.2	1.2
ZD	1.6	1.4	1.2	1.1	1.0	1.0
ZE	2.4	1.7	1.3	1.1	0.9	0.8
ZF	Sahaya özel zemin davranış analizi yapılacaktır					

Bu çalışma kapsamında deprem tehlike haritasında farklı iller seçilerek dinamik etkinin istinat duvarındaki yansımaları belirlemek için farklı

ivmelere sahip İzmir, Isparta ve Konya ili seçilerek Şekil 4 üzerinde işaretlenmiş, elde edilen analizlerde kullanılan veriler Tablo 4' de sunulmuştur.



Şekil 4. Türkiye deprem tehlike haritasında işaretlenen illerin belirtilmesi (<https://www.afad.gov.tr/turkiye-deprem-tehlike-haritasi>)

Tablo 4. TDTH 2018' den elde edilen parametreler

Konum	PGA (g)	PGV (cm/sn)	S _{DS}
İZMİR	0.480	28.613	1.402
İSPARTA	0.315	16.405	0.896
KONYA	0.135	6.764	0.481

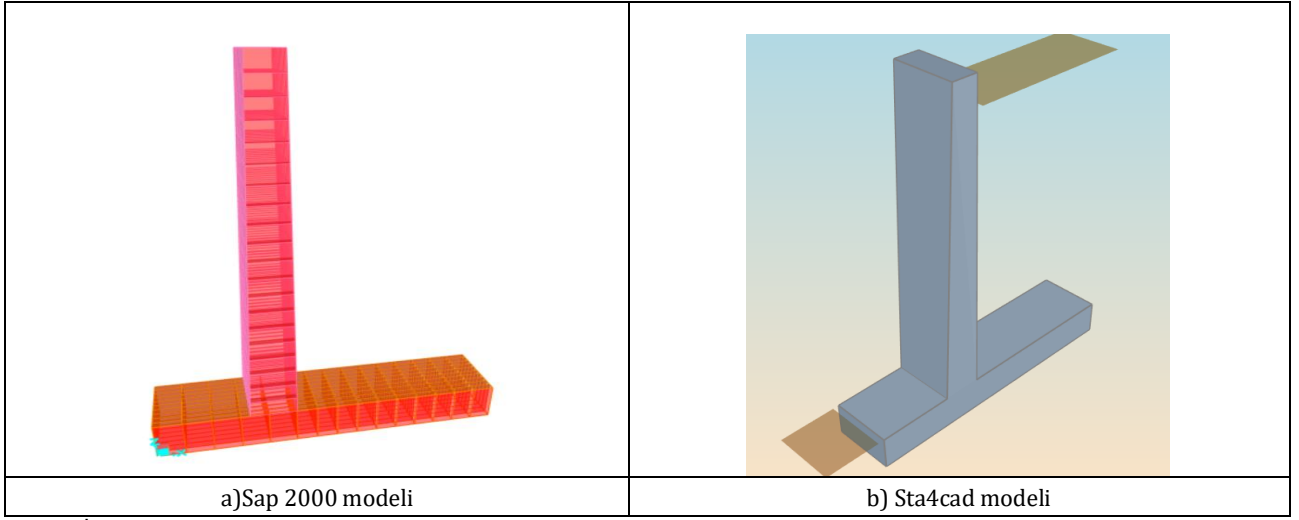
İstinat duvarlarının boyutlandırılması yapılırken; kayma, derilme ve taşıma gücü tahkikleri statik ve dinamik durum için yapılmaktadır. Statik durum için güvenlik katsayısı 1,5; depremlilik durumda güvenlik katsayısı 1,3 alınmıştır. Ön boyutlandırma değerleri için tahkikler yapılarak boyutların yeterliliği kontrol edilmiştir.

3. Bulgular

Dayanma yapıları duvar ve temel olmak üzere iki ana parçadan oluşmaktadır. Etkiyen yükler altında kayma, devrilme, taban basıncı yeterliliği kontrolleri sağlanır. Bu amaçla kaymaya karşı direnen kuvvetler, istinat duvarının kendi ağırlığı ile duvar tabanı üzerindeki zemin ve sürşarj ağırlığından oluşan düşey kuvvetlerin duvar tabanı ile zemin arasındaki sürtünme açısıyla çarpılması ile elde edilir. Kaymaya neden olan kuvvetler, istinat duvarı arkasında tutulan zemin kütesinden ve yüzeydeki yüklemelerden

kaynaklanan aktif itkiler ile su basınçlarından oluşmaktadır. Kayma tahkikine benzer olarak, devrilmeye karşı koyan momentler, istinat duvarının ağırlığı ve tabanı üzerindeki zemin ve sürşarj ağırlığından kaynaklanmaktadır. Devrilmeye neden olan momentler ise istinat duvarı arkasında tutulan zemin kütesinden kaynaklanan aktif itkiler ve su basınçlarından kaynaklanmaktadır. Üzerindeki kuvvet sisteminin etkisiyle, istinat duvarı temelinde oluşan en büyük basınç gerilmesi, zemin emin taşıma gücünden küçük olmalıdır.

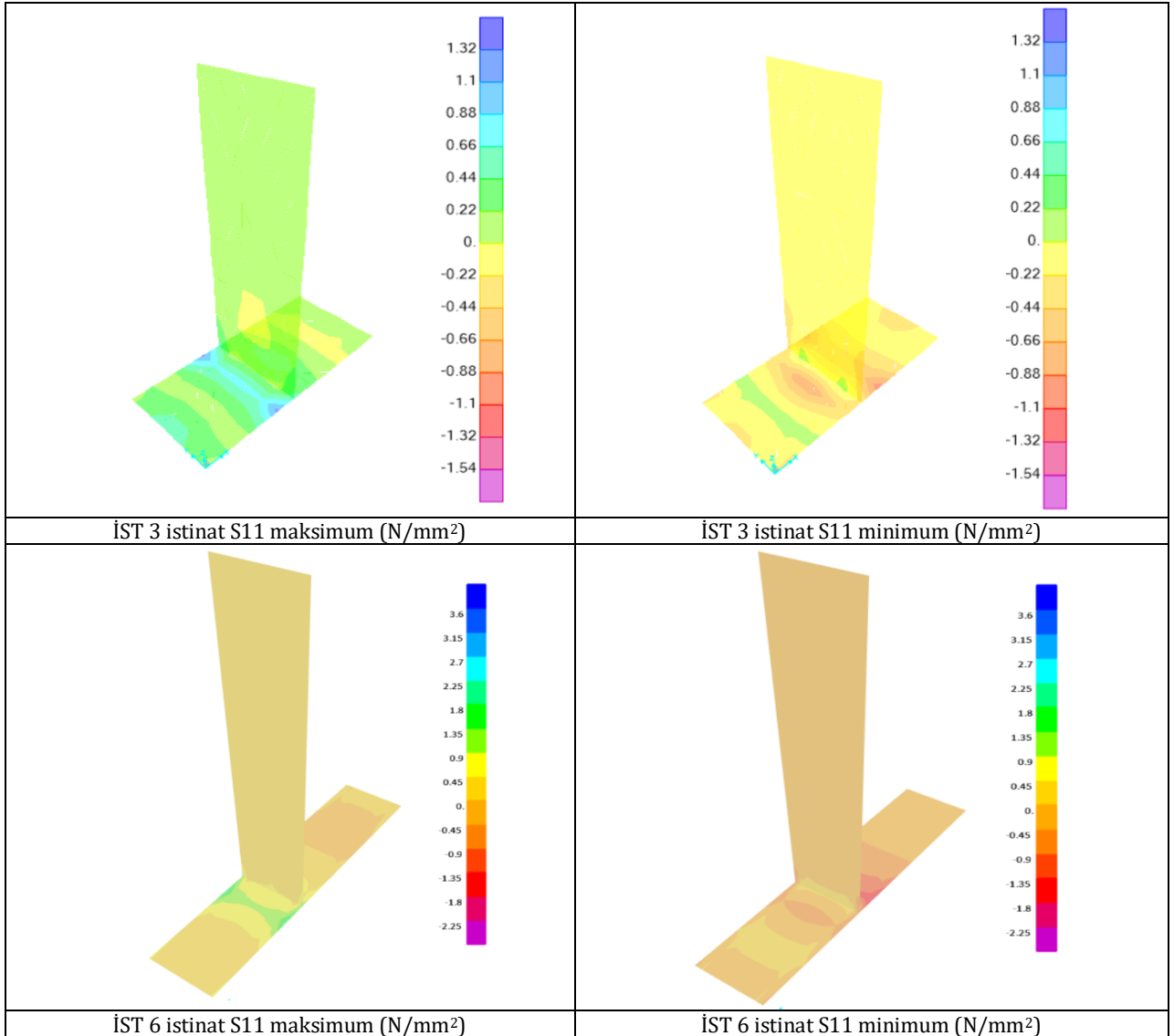
Bu çalışma kapsamında 3 farklı konsol istinat duvarı yüksekliği ve 3 farklı konum için eş değer statik analizler gerçekleştirilmiştir. Çalışma kapsamında Sta4cad sonlu elemanlar analiziyle 3 farklı yükseklikteki istinat duvarının etkin yükler altındaki betonarme tasarımı yapılmıştır. Sap 2000 sonlu elemanlar programında mevcut yükler altındaki yapısal davranış incelenmiştir. Her iki programda analiz edilen istinat duvarı görselleri Şekil 5 de verilmiştir

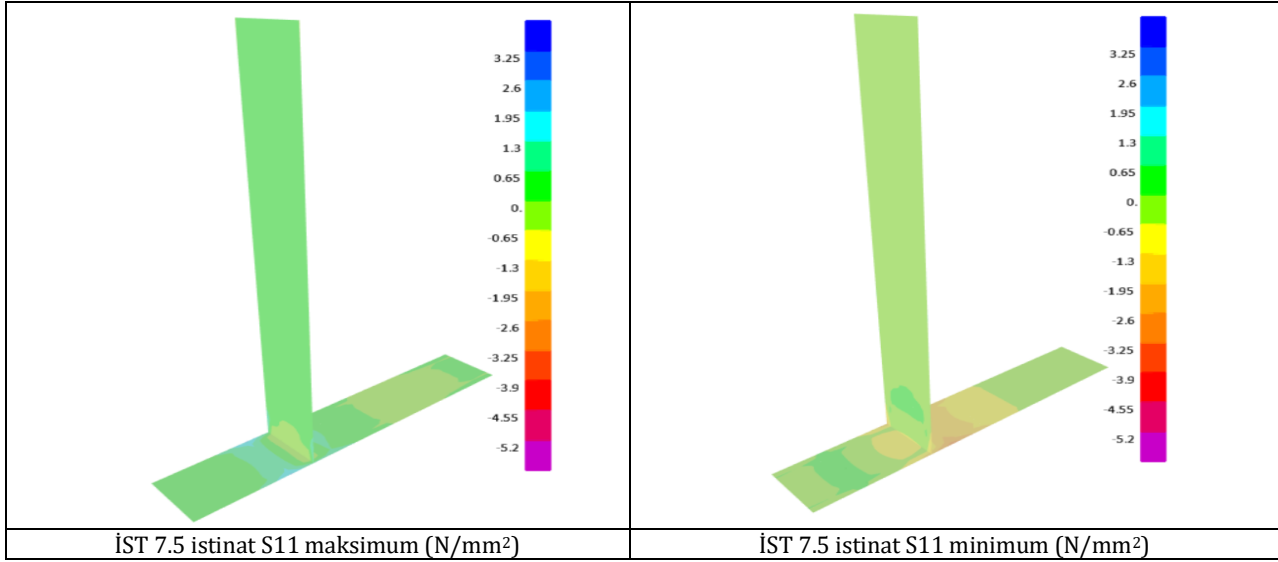


Şekil 5. İstinat duvarı model görselleri

Yatay ve düşey yüklerin etkisi ile duvar ve temel sistemi optimum boyutlarda seçilerek boyutsal parametrelerin değişmesinin yapısal davranışın sonuçlarına etkisini yorumlamak için analizlerde elde

edilen gerilmeler Şekil 6 da sunulmuştur. Tüm boyutlar için yapılan analizlerde en kritik durum olan kombinasyon 3 ele alınarak görseller otomatik renkli kontur aralığı ile verilmiştir.





Şekil 7. Tüm boylar için gerilme sonuçları

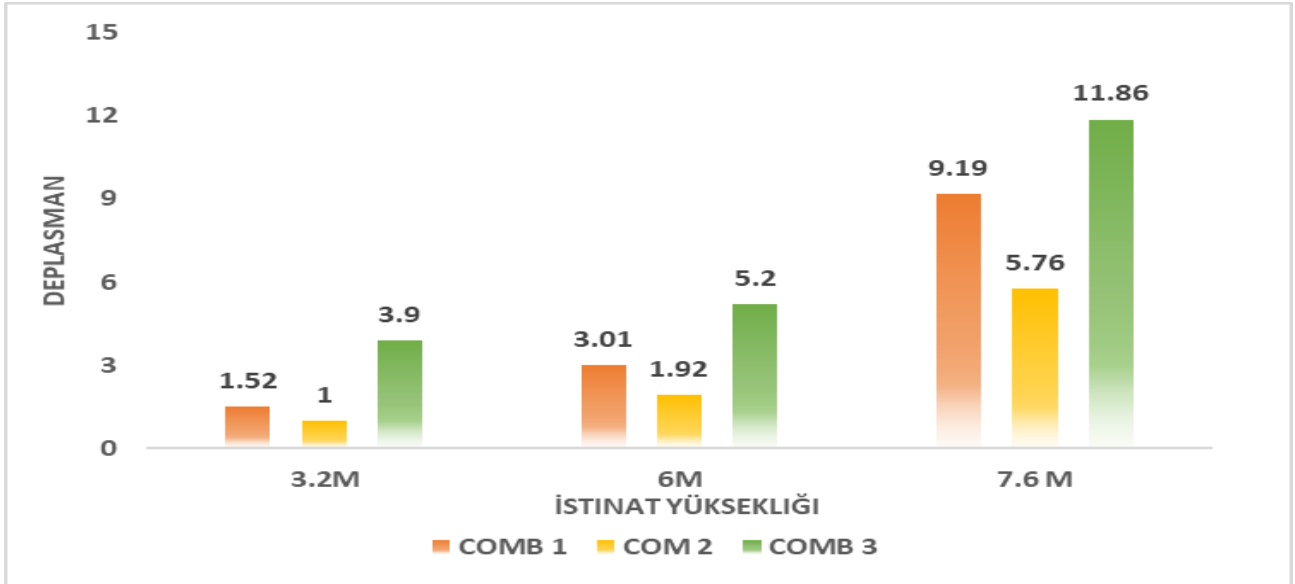
Şekil 7'de 3 farklı yükseklikteki istinat yapılarının maksimum ve minimum S11(1-1 ekseninde) gerilme değişimleri görülmektedir. Şekiller incelendiğinde tüm yüksekliklerde gerilme dağılımının belirleyici özelliği, yoğunlaşmanın temel ve duvar birleşim bölgesinde olmasıdır. 3.2 metrelik yapı için bakıldığında hesaplanan temel boyutu için ortaya çıkan gerilme dağılımı tüm temel sistemi tarafından karşılanmıştır. Ancak 6 m ve 7.6 m olan dayanma yapılarında benzerlik gösteren davranış gerilme yığılmalarının temel ile duvar birleşim bölgesinde kalması bunun dışında kalan taban bloğunun büyük bir kısmının gerilme kaynaklı değil de devrilme momentinin karşılamak için oluşturulduğunu yorumuna varılmaktadır. Konsol duvarlarda artan yüksekliğe bağlı olarak deprem sırasında duvara etkileyen eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve aksel kuvvetlerde doğrusal bir artış meydana gelmektedir [29]. Dayanma yapıları için gerilme

dağılımları incelendiğinde yükseklik arttıkça gerilmelerin arttığı ancak temel ile olan birleşim bölgesinde yığıldığı görülmüştür. Yükseklik azaldıkça gerilme duvar üzerinde de yayılırken, yükseklik arttıkça gerilmenin yığıldığı alan ile duvar alanı arasında azalan bir oran olduğu belirlenmiştir.

Çalışmada Sap 2000 sonlu elemanlar programı analizlerindeki istinat duvarlarının tepe deplasmanları hesaplanmıştır. Analizler sonucunda yükleme durumları ve kombinasyonlar için tüm boylarda elde edilen istinat duvarı tepe deplasmanları Tablo 5'de ve Şekil 8 de çubuk diyagram olarak sunulmuştur. Elde edilen sonuçlar incelendiğinde 3.2 ve 6 metrenin deplasmanlarının birbirine daha yakın mertebelerde seyrettiği ancak 7.6 metre yüksekliğine çıktığında tepe deplasmanlarının özellikle kombinasyon 3 için 2.5-4 kat daha artış sağlamıştır.

Tablo 5. İstinat duvarı tepe deplasmanları

Yüklemeler	Deplasmanlar (mm)		
	İST 3	İST 6	İST 7.5
Sürsarj yükü etkisi	2.9	3.29	6.09
Zemin itkisi	6.08	1.69	5.58
Comb 1	1.52	3.01	9.19
Comb 2	1.0	1.92	5.76
Comb 3	3.9	5.20	11.86



Şekil 8. Deplasman ve istinat yüksekliğinin ilişkisinin grafiksel gösterimi

Son deprem yönetmeliği TBDY 2018 ile birlikte, deprem tehlike haritası, tasarım ivme spektrumları, eşdeğer deprem katsayıları, zemin basıncı katsayıları ve zemin dinamik etkilerinin hesaplarının değiştiği görülmüştür [30]. TBDY 2018'e göre ZD sınıfında olan kum zeminde elde edilen PGA ve PGV değeri, 3 farklı konum için değişkenlik göstermektedir. Ama bu konumda DBYBHY 2007'de tek bir değer elde edilmekteydi. Bu durum aynı yerel zemin sınıfının farklı bölgelerde dinamik etkinin tasarıma ve maliyete nasıl yansıtıldığı incelenmiştir. Çalışmanın son bölümünde Sta4cad programı kullanılarak 3 farklı

yükseklik ve 3 farklı konum için elde edilen donatı talepleri, Sap2000 de yapılan analizlerde elde edilen gerilme ve yerdeğiştirme sonuçlarıyla paralellik göstermiştir. Tüm istinat duvarlarında 1 metrelik kesit için donatılandırma yapılmıştır. Yüksekliklere göre incelendiğinde; 3.2 metrelik duvar için tüm konumlarda 100-145 kg/m, 6 metrelik duvar için 275-325 kg/m ve 7.6 metrelik duvar için 400-490 kg/m donatı metrajı elde edilmiştir. Bu sonuçlar detaylı olarak Tablo 6'da sunulmuştur.

Tablo 6. Analiz sonucu elde edilen donatı tablosu

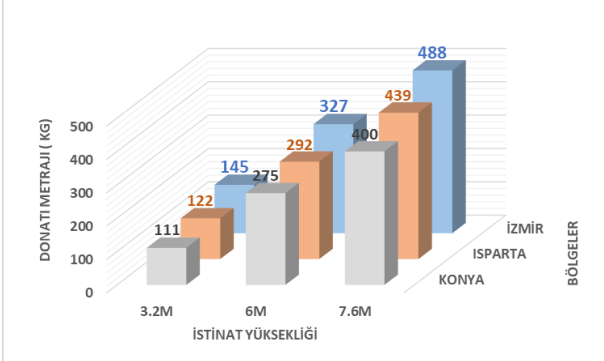
Konum	İstinat Duvarı	Perde Donatı		Temel Donatı		Ağırlık (kg)
İZMİR	İST 3	ön	7φ12/15	üst	7φ14/15	145
		arka	7φ14/15	alt	7φ14/15	
	İST 6	ön	7φ12/15	üst	7φ16/15	327
		arka	7φ16/15	alt	7φ16/15	
	İST 7.5	ön	9φ12/12	üst	7φ18/15	488
		arka	7φ18/15	alt	7φ18/15	
ISPARTA	İST 3	ön	9φ10/12	üst	7φ12/15	122
		arka	7φ12/15	alt	7φ12/15	
	İST 6	ön	7φ12/15	üst	7φ14/15	291
		arka	8φ14/14	alt	7φ14/15	
	İST 7.5	ön	9φ12/12	üst	7φ16/15	439
		arka	8φ16/15	alt	7φ16/15	
KONYA	İST 3	ön	8φ10/13	üst	6φ12/18	111
		arka	6φ12/19	alt	6φ12/18	
	İST 6	ön	7φ12/15	üst	7φ14/15	275
		arka	8φ14/14	alt	5φ14/20	
	İST 7.5	ön	9φ12/12	üst	8φ14/14	400
		arka	6φ14/18	alt	7φ14/15	

3.1. Deprem bölgelerinin maliyete etkisi

Yukarıdaki Tablo 6 ve Şekil 9 incelendiğinde 3.2 metrelik duvar dikkate alındığında İzmir ilinde konumlanan istinat duvarı Isparta iline göre % 19, Konya iline göre % 30 daha fazla donatıya sahiptir. 6 metrelik duvar İzmir ilinde konumlandığında Isparta

iline göre % 12, Konya iline göre % 19 daha fazla donatı metrajına sahip olmuştur. 7.6 metrelik duvar incelendiğinde İzmir- Isparta kıyaslandığında % 12 lik, Konya kıyaslandığında % 22 lik donatı fazlalığı dikkat çekmiştir. Sonuç olarak dinamik etki tasarıma dahil olduğunda ivme değişimine göre aynı zemin türü dahi olsa maliyetlerin arttığı ve her istinat boyu için bu

değerin ortalama %10-30 aralığında değiştiğini belirlenmiştir. Bu sonuçta bize deprem parametrelerinin tasarımda ihmal edilmemesi gerekliliğini ve stabilite problemlerinin oluşmaması için dikkatle incelenmesi gerektiği sonucuna varmamızı sağlamıştır.



Şekil 9. Maliyet grafiği

3.2. Duvar yüksekliğinin maliyete etkisi

Çalışma kapsamında diğer bir araştırma konusu olan duvar yüksekliği artışının maliyete etkisi incelendiğinde T kesitli, sabit ve değişen kalınlığa sahip duvarlar incelendiğinde 3.2 m'lik istinat duvarı referans alınarak kıyaslamalar yapılmıştır. Tüm bölgeler dikkate alınarak incelendiğinde 6 metre konsol istinat duvarında 2.25-2.47 oranında donatı metrajı artmıştır. 7.6 metre konsol istinat duvarı dikkate alındığında 3.36-3.60 oranında donatı metrajı artmıştır. 7.6 metrelik konsol istinat duvarı 6 metrelik konsol istinat duvarı ile kıyaslandığında bu oran 1.5 kat çıkmıştır. Sonuç olarak istinat duvarı yüksekliği arttıkça, duvarın imalat maliyetinin de parabolik olarak arttığı görülmüştür.

Konsol istinat duvarları temele ankastre olarak bağlandığı için, duvarın yüksekliği arttıkça temel ile duvarın birleşim noktasında ciddi eğilme momentleri oluşmaktadır. Duvar yüksekliğinin artışıyla güvenlik kriterlerini sağlayabilmek adına kayma ve devrilme tahkiklerinde temel yüksekliğinin artırmaktansa istinat duvarı taban plağının uzatılması daha doğru sonuçlar vermiştir. Böylelikle duvar tabanına etki eden dolgu ağırlığından dolayı eksenel kuvvette oluşan artış, kaymaya direnen sürtünme kuvvetinin de artmasını sağlayacaktır (Gülden, 2014). Ayrıca çalışma kapsamındaki tüm analizlerde duvar yüksekliği ile duvar taban plağı arasında 0,73-0,75 oranında bir katsayı elde edilmiştir. Statik durumda bu oranlar azalabilse de aktif deprem kuşağında bulunan ülkemizde tasarımlar statik koşullara göre de yapılmaktadır.

Genel değerlendirme yapıldığında konsol istinat duvarlarının 6 m yüksekliğe kadar ekonomik sonuçlar verdiği görülmüştür. Yapılan analizlerde göstermiştir ki 6 metreden sonraki yüksekliklerde hem gerilme dağılımında, hem yataydaki yer değiştirmelerde hem

de birim alana düşen donatı taleplerindeki artışlar dikkate alındığında paralelinde artan maliyetlerden dolayı payandalı istinat duvarına ya da alternatif bir dayana yapısına geçiş yapılması önerilmektedir.

4. Tartışma ve Sonuç

Bu makale kapsamında, TBDY 2018'e göre konsol istinat duvarlarının tasarımında dikkat edilmesi gereken kriterler dikkate alınmıştır. Sta4cad paket programında istinat duvarının temel kalınlığı ve ön-arka ampatman uzunlukları için optimum boyutlar elde edilmiştir. SAP 2000 programında yapısal analiz; Sta4cad programında ise betonarme tasarım yapılmıştır. Kurgulanan tasarımlarda farklı bölgelerde ve farklı yüksekliklerde vaka analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan sonlu elemanlar analizleri neticesinde elde edilen veriler değişken parametrelerin katkıları ve kıyaslamaları değerlendirilerek sırasıyla maddeler şeklinde sunulmuştur.

- İstinat duvarının depreme dayanıklı tasarımında, duvar yüksekliğinin değişimi tasarım boyutlarını etkileyen en belirgin parametre olmuştur. Kazı derinliğinin artışı ile duvar yüzeyine etki eden aktif basınçlar artmakta ve duvar stabilitesinin sağlanması amacıyla optimum boyutlandırma, en etkili duvar temelinin genişliğinin artırılması ile elde edilebilmiştir.
- İstinat duvar yüksekliği ile duvar taban plağı arasında 0,73-0,75 oranında bir katsayı elde edilmiştir. Ön boyutlandırmada bu değer 0,5-0,7H olarak belirtilse de: statik durumda yeterli olan 0,5 H değeri sismik etkiler ile birlikte ortalama 0,75H civarında sonuçlanmıştır.
- Betonarme konsol istinat duvarlarında artan yüksekliğe bağlı olarak deprem sırasında gelişen eğilme momentleri, kesme kuvvetleri ve eksenel kuvvetlerde artış meydana gelmektedir. Böylelikle dinamik etki tasarıma dahil olduğunda ivme değişimi oranıyla maliyet artışı doğrusal orantılı artmıştır, ancak spektral ivme katsayısı dikkate alındığında ise maliyet parabolik olarak artmıştır.
- Gerilmelerin belli bir yükseklikten sonra duvar temel etkileşim noktasında yığıldığını, artan boy ile gerilmenin yığıldığı alanın temele yaklaşmasına bağlı olarak ters orantılı ilerlediğini ancak temel boyutlarının da devrilme momentlerinin sağlanması için artırıldığı görülmüştür.
- Çalışma kapsamında 6 metreden sonraki yüksekliklerde gerilme, yerdeğiştirme ve

donatı metrajındaki artış sebebiyle stabilize ve ekonomiklik kriterleri sağlanamamaktadır. Bu nedenle payandalı istinat sistemine geçilmesi önerilir.

Etik Beyanı/Declaration of Ethical Code

Bu çalışmada, "Yükseköğretim Kurumları Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiği Yönergesi" kapsamında uyulması gerekli tüm kurallara uyulduğunu, bahsi geçen yönergenin "Bilimsel Araştırma ve Yayın Etiğine Aykırı Eylemler" başlığı altında belirtilen eylemlerden hiçbirinin gerçekleştirilmediğini taahhüt ederiz.

Kaynakça

- [1] Genç, D., 2008. Zemin Mekaniği ve Temeller, TMMOB Jeoloji Mühendisleri Odası Yayını, Ankara
- [2] Coduto, D.P. 2001. Temel Tasarımı: İlke ve Uygulamalar. 2. Baskı, Prentice Hall, Upper Saddle River.
- [3] Gürsoy, S., 2006. Betonarme İstinat Duvarlarının, Zemin Etkileşimini de Dikkate Almak Suretiyle, Deprem Yüklerine Göre Doğrusal ve Doğrusal Olmayan Davranışlarının incelenmesi", Doktora Tezi, KTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü.
- [4] Arslan Ö., Keskin İ., Ateş A., 2018. Farklı Deprem Yüklerinin Betonarme Konsol Bir İstinat Duvarının Maliyetine Etkisinin Analizi, Eskişehir Teknik Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi B-Teorik Bilimler 6, 28-35.
- [5] Binici, E., Öztürk, Ş. 2019. Konsol İstinat Duvar Tasarımı Üzerine Parametrik Bir Çalışma. Journal of the Institute of Science and Technology , 9 (1) , 203-210 . DOI: 10.21597/jist.448933
- [6] Yıldırım E., 2019. Betonarme konsol istinat duvarları ile geogrid donatılı istinat duvarlarının teknik ve ekonomik yönden araştırılması. Konya teknik üniversitesi, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 174 s
- [7] Dağdeviren, U., Kaymak, B. 2018. Yapay Arı Koloni Algoritması Kullanılarak Betonarme İstinat Duvarlarının Optimum Maliyet Tasarımını Etkileyen Parametrelerin İncelenmesi . Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Dergisi, 33 (1) , 0-0 . DOI: 10.17341/gazimmfd.406796.
- [8] Temür, R. & Bekdaş, G. 2018. Betonarme Konsol İstinat Duvarlarının Optimum Tasarımı . Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,24(6), 1043-1050 . <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/40976/498366>
- [9] Gürsoy, Ş. 2013. İstinat Duvarlarına Etkiyen Aktif Zemin İtkilerinin Eurocode-8 Ve Türkiye Deprem Yönetmeliğine Göre Karşılaştırılması. Gazi University Journal of Science Part C: Design and Technology, 1(4) , 153-160 .Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/gujsc/issue/7461/98245>
- [10] Uzundurukan, S. & Saplıoğlu, K. 2020. Konsol İstinat Duvarlarında Yükseklik Maliyet İlişkisinin Parçacık Sürü Algoritması İle İncelenmesi. Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 8 (4) , 2544-2554 . Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/dubited/issue/57598/752589>
- [11] Kayhan, A. H. & Demir, A. 2016. Betonarme konsol istinat duvarlarının parçacık sürü optimizasyonu ile optimum tasarımı. Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi,22 (3), 129-135. Retrieved from <https://dergipark.org.tr/tr/pub/pajes/issue/24687/261049?publisher=pamukkale>
- [12] Kamiloğlu H.A., Şadoğlu E., Yılmaz F.,2019. Numerical Analysis of Active Earth Pressures on Various Types of Retaining Walls. Erzincan University Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi Journal of Science and Technology 2019, 12(3), 1666-1677 2019, 12(3), 1666-1677 ISSN: 1307-9085, e-ISSN: 2149-4584.DOI: 10.18185/erzifbed.649503
- [13] Köktan, U. , Demir, G. & Ertek, M. 2019. Bir Konsol İstinat Duvarının Sismik Davranışına Yeraltı Su Seviyesindeki Değişimlerin Etkisinin İncelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 9(2), 307-317. DOI: 10.17714/gumusfenbil.398875
- [14] Kayabekir, A. E., Bekdaş, G., Nigdeli, S. M., Temür, R., 2017. Statik ve Dinamik Yükler Altındaki İstinat Duvarlarının Optimum Tasarımı. Engineering Sciences, 12(1), 46-56
- [15] Yavan O. 2015. Suya Doygun Kil Zeminlere İnşa Edilen İstinat Duvarlarının Dinamik Yükler Altında Davranışı. Anadolu Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 116s
- [16] Öztürk K.F. 2015. Zemin-Yapı Etkileşimi Ve Farklı Duvar Geometrilere Dikkate Alınarak Konsol İstinat Duvarlarının Sismik Davranışının İncelenmesi. Gümüşhane Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstisüsü, Yüksek Lisans Tezi, 85 s
- [17] TBDY, 2018. Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği, Afet ve Acil Durum Yönetimi Başkanlığı, Ankara. Erişim adresi: <http://www.resmigazete.gov.tr/eskiler/2018/03/20180318M1.pdf>
- [18] Hool, A.G., Kinne B.S., 1944. Reinforced Concrete An Mosonry Structure, McGraw-Hill inc.,USA
- [19] Özbey k. 2003. İstinat Duvar Analizleri. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 129s

- [20] Gülден N. 2014. İstinat Duvarlarının Farklı Yükleme Ve Koşullar Altında Analizi. İstanbul Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 131s
- [21] Celep, Z., 2017. Deprem Mühendisliğine Giriş, Beta Basım Yayım Dağıtım A.Ş., İstanbul,739 s
- [22] Dalyan, İ. , Akın, M. S., Akbay Arama, Z. 2020. Betonarme İstinat Duvarlarının Geoteknik Tasarımında Etkili Parametrelerin 2018 Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği'ne Göre Değerlendirilmesi. Türk Deprem Araştırma Dergisi, 2 (2) , 176-192. DOI: 10.46464/tdad.804289.
- [23] Prakash, S., ve Saran S., 1996. Static and dynamic earth pressures behind retaining walls. Proceedings of the Third Symposium on Earthquake Engineering, University of Roorkee, India, Vol. 1.
- [24] Prakash, S., Basavanna, B. M., 1969. Effect of Size and Shape of Foundations on Elastic Coefficients of Layered Soil Mass.", Proceedings of the Fourth World Conference on Earthquake Engineering
- [25] Whitman, R. V., 1990. Seismic design and behavior of gravity retaining walls. Proc. of ASCE Specialty Conference on Design and Performance of Earth Retaining Structures
- [26] Mononobe, N., ve Matsuo. H., 1929. On the determination of earth pressure during earthquakes: Proceedings of the World Engineering Congress., 177-185,
- [27] Okabe, S., 1926. General theory of earth pressure", Journal of Japanese Society of Civil Engineering, 12(1)
- [28] TDTH, 2018. Türkiye Deprem Tehlike Haritaları İnteraktif Web Uygulaması, Ankara. Erişim adresi: <https://tdth.afad.gov.tr/TDTH/main.xhtml>
- [29] Yenidoğan H.C. 2006. İstinat Duvarlarının Deprem Sırasında Davranışı. Yıldız Teknik Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 127s
- [30] Tuğrul A.T. 2019. İstinat Yapılarının Depreme Dayanıklı Tasarımı. Pamukkale Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, 184s.
- [31] AFAD (Afet ve Acil Durum Yönetim Başkanlığı <https://www.afad.gov.tr/kurumlar/afad.gov.tr/24212/pics/image-52f6087989850.png?c=7596> (Erişim Tarihi: 30.08.2023)