Pamukkale Univ Muh Bilim Derg, 22(6), 433-441, 2016

Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi

Pamukkale University Journal of Engineering Sciences

Hiperbolik soğutma kulelerinin deprem analizi

Earthquake analysis of hyperbolic cooling towers

Korhan ÖZGAN[1], Ali İhsan KARAKAŞ[1], Ayşe Turhan DALOĞLU[1]*

[1]İnşaat Mühendisliği Bölümü, Mühendislik Fakültesi, Karadeniz Teknik Üniversitesi, Trabzon, Türkiye.
kozgan@ktu.edu.tr, aliihsan.karakas@ktu.edu.tr, aysed@ktu.edu.tr

Geliş Tarihi/Received: 21.05.2015, Kabul Tarihi/Accepted: 17.11.2015 doi: 10.5505/pajes.2015.71601
* Yazışılan yazar/Corresponding author Araştırma Makalesi/Research Article

Öz

Bu çalışmada farklı geometrik özelliklere sahip hiperbolik soğutma kulelerinin deprem etkisindeki dinamik davranışları incelenmiştir. Kule davranışına etkileri araştırılan geometrik özellikler kabuk eğriliği, kabuk kalınlığı, kule narinliği ve boyun seviyesinin yüksekliğidir. Bu parametrelerin çeşitli oranlarda değiştirilmesi sonucu elde edilen maksimum yatay yer değiştirmeler, meridyonel kuvvet ve momentler karşılaştırılarak kulenin davranışına etkileri incelenmiştir. Sayısal çözümler MATLAB ve SAP2000 yapısal analiz paket programını eş zamanlı olarak kullanımına olanak sağlayan ve Matlab programlama dili ile kodlanan bir yazılımın kullanılmasıyla gerçekleştirilmiştir.

Anahtar kelimeler: Hiperbolik soğutma kulesi, Dinamik analiz, Deprem

Abstract

In this study the dynamic behavior of hyperbolic cooling towers with various geometric properties under earthquake effect is examined. Various cooling tower samples with different geometric dimensions are analyzed and the effects of curvature, slenderness, thickness and throat level on the dynamic behavior of hyperbolic cooling towers are investigated. The influences of these parameters on the behavior of cooling tower are investigated by comparing lateral displacement, meridional forces and moments. Numerical analysis are performed using a software coded in Matlab programming language which makes possible to use MATLAB and SAP2000 structural analysis software package simultaneously.

Keywords: Hyperbolic cooling tower, Dynamic analysis, Earthquake

1 Giriş

Soğutma kuleleri oldukça yüksek ve kabuk kalınlığı az olan büyük çaplı yapılardır. Yüksek ve narin yapıya sahip olmalarından dolayı deprem ve rüzgâr gibi zamana bağlı yükler karşısında olağandışı davranış gösterirler. Petrol rafinerileri, enerji santralleri ve nükleer santraller gibi endüstriyel tesislerde sistemde dolaşan soğutma suyunun sistemden aldığı ısıyı uzaklaştırmak için kullanılırlar. Soğutma kulelerinin çalışma prensibi, suyun hava ile karşılaşma şekline göre değişmekle beraber kule içerisinden geçen suyun hava ile teması sağlanıp soğutulması esasına dayanır. Suyun bir kısmı da buharlaşarak kule çıkışından atmosfere bırakılır. Bu nedenle yeterli yüksekliğe sahip olmaları gerekir. Yaygın olarak dikdörtgen ya da dairesel kolonlara oturan ince bir kabuktan oluşan betonarme taşıyıcı sistemlerden oluşurlar. Boyutlarının belirlenmesinde elbette bulundukları arazinin coğrafyası ve meteorolojik şartlar etkili olduğu gibi ihtiyaç duyulan çekim kapasitesi de önemli rol oynamaktadır. Kayar kalıp tekniği kullanılarak parça parça inşa edilirler. Kendi ağırlıklarının yanı sıra özellikle deprem ve rüzgâr, boyutlarını belirleyen en önemli yüklerdir. Özellikle deprem kuşağında inşa edilen soğutma kuleleri için zamanla değişen yükler altında yapıda oluşacak en büyük yer değiştirmeler ve iç kuvvetler deprem yükleri altında oluşmaktadır. Dolayısıyla deprem yükleri altında bir soğutma kulesinin göstereceği davranış tasarım süreci için çok önemlidir.

Literatürde soğutma kuleleri ile ilgili birçok araştırma yer almaktadır. Çalışmaların bir kısmında kabuk alt kısmından mesnetlendiği [1]-[2], bir kısmında da ankastre kolonlara oturduğu varsayımıyla modellenmiştir [3]-[5]. S. Kulkarni ve AV. Kulkarni [6] kabuk taban kısmından mesnetlenmiş soğutma kulelerinin statik ve dinamik analizini gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında lineer davranış spektrum metodunu kullanarak deprem yüklerini dikkate almışlardır. Weng ve diğ. [7] lineer olmayan zaman tanım alanında X tipi kolonlara oturan soğutma kulelerinin sismik performansını araştırmışlardır.

Ülkemizde soğutma kuleleri gibi yüksek ve narin yapılar ile ilgili yapılan çalışmalar yok denecek kadar azdır [8]-[10]. Soğutma kulelerinin deprem davranışları hakkında tasarımcıya yol gösterecek herhangi bir parametrik çalışmaya da rastlanmamaktadır. Bu nedenle bu çalışmada, çeşitli geometrik parametreler değiştirilerek hiperbolik soğutma kulelerinin dinamik davranışları kapsamlı bir incelemeye tabi tutulmuştur. Sayısal çözümler Matlab programlama dili ile kodlanan bir yazılım yardımıyla MATLAB ve SAP2000 yapısal analiz paket programı eş zamanlı kullanılarak yapılmıştır. Deprem etkisinde farklı geometrilere sahip hiperbolik soğutma kulelerinin dinamik analizlerinden elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır.

2 Kullanılan yöntem

Bilindiği gibi deprem yüküne maruz bir yapının genel hareket denklemi aşağıdaki gibi olmaktadır.

$$[M]\{\ddot{u}\}+[C]\{\dot{u}\}+[K]\{u\}=-[M]\{\ddot{u}_g\} \quad (1)$$

Burada $[K]$ sistemin rijitlik matrisi, $[C]$ sönüm matrisi ve $[M]$ ise sistemin kütle matrisidir. $\ddot{u}$, $\dot{u}$ ve u sırasıyla yapının ivmesini, yatay yer değiştirmenin zamana göre birinci türevini ve yatay yer değiştirmesini göstermektedir. $\ddot{u}_g$ ise deprem ivmesidir.

Lineer olmayan dinamik analizlerde sıklıkla kullanılan sönüm yöntemi kütle ve rijitlikle orantılı olan Rayleigh yöntemidir. Sönüm matrisi kütle ve rijitlik matrislerinin belirlenen oranlarda birleşimiyle aşağıdaki gibi elde edilmektedir.

$$C=\eta M+\delta K \quad (2)$$

Burada η kütleyle orantılı sönüm katsayısı ve δ ise rijitlikle orantılı sönüm katsayısıdır. Diklik dönüşümleri yapılarak aşağıdaki denklem elde edilebilir.

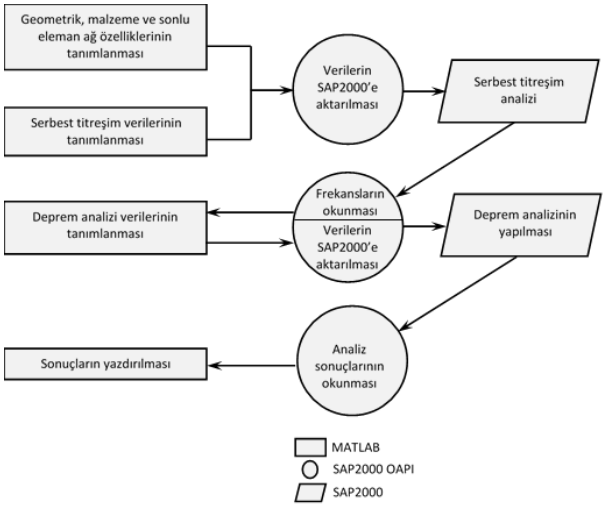
$$\xi_n = \frac{1}{2\omega_n}\eta + \frac{\omega_n}{2}\delta \tag{3}$$

Burada ξ_n kritik sönüm oranını ve ω_n doğal frekansı ($\omega_n = 2\pi f_n$) göstermektedir. Burada η ve δ katsayıları bilinen iki frekans (ω_i ve ω_j) ve karşılık gelen sönüm oranlarıyla ($\xi_i$ve ξ_j) aşağıdaki gibi bulunmaktadır.

$$\begin{bmatrix}\xi_i \\ \xi_j\end{bmatrix} = \frac{1}{2}\begin{bmatrix}\frac{1}{\omega_i} & \omega_i \\ \frac{1}{\omega_j} & \omega_j\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\eta \\ \delta\end{bmatrix} \tag{4}$$

SAP2000 kullanıcıya iki farklı periyot (saniye) değeri ve karşılık gelen kritik sönüm oranıyla bu katsayıları elde etme imkanı vermektedir. Bu çalışmada da deprem analizi yapılacak her kule için serbest titreşim analizi yapılıp ilk iki eğilme modu için periyot değerleri elde edilmiş ve her iki mod için %5 sönüm oranı kabulü yapılmıştır.

Rijitlikleri ve kütleleri yükseklik boyunca yayılı olan bu tip kule problemlerinde sistemin özelliklerini yeterli hassasiyette yansıtabilecek uygun bir taşıyıcı sistem modellemesi son derece önemlidir. Bu çalışmada problemin modelinin oluşturulması ve denklem (1) takımının çözümü SAP2000 [11] yapısal analiz paket programı yardımıyla yapılmaktadır. SAP2000 paket programının MATLAB [12] dahil bir çok programlama dillerini destekleyen OAPI (Open Application Programming Interface) özelliği sayesinde içerisinde tanımlanmış olan fonksiyonlar kullanılarak çözümün bir çok aşamasına müdahale edilebilmektedir. Bu sayede kullanıcı açısından iki yönlü veri alış verişi sağlanıp yapının modellenmesi ve sonuçların alınması daha kolay hale gelmektedir. Dolayısıyla modellenmesi oldukça karmaşık olan ve uzun süre alan bu tür yapıların parametrik çalışması SAP2000 programının bu özelliğinden yararlanılarak Matlab programlama dili ile kodlanan bir yazılım yardımıyla kolayca yapılabilmektedir. Çözüm Şekil 1'de verilen akış şemasına uygun olarak yapılmaktadır.



Şekil 1: Akış şeması.

Bu çalışmada daha önce Viladkar ve diğ. [13] ve Noorzaei ve diğ. [14] tarafından çözülen ve Şekil 2 ile Tablo 1'de geometrik özellikleri verilen bir soğutma kulesi örneği dikkate alınmıştır. Kule gövdesi açısal doğrultuda 88 ve meridyonel yönde 75 adet dört düğüm noktalı kabuk eleman ile modellenmiştir. Soğutma kulesi gövdesi iki düğüm noktalı altı serbestlik dereceli dairesel kolonlara oturmaktadır. Kolon alt uçları ankastre kabul edilmektedir. Kolon ve kabuk betonunun elastisite modülü 28.5 GPa ve Poisson oranı 0.18 alınmıştır.

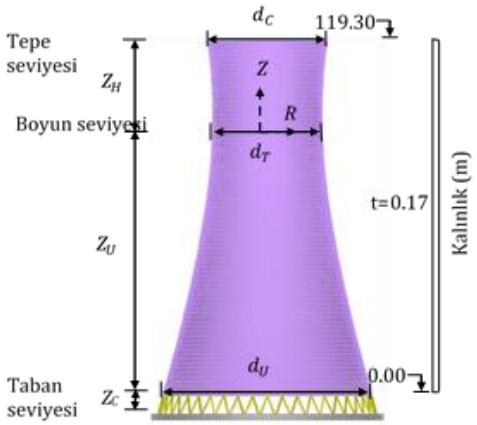
Kule kabuğun orta eksen geometrisi aşağıda verilen hiperbolik denklem ile elde edilmiştir.

$$R^2/a^2 - Z^2/b^2 = 1 \tag{5}$$

Burada R kabuk yarıçapını, a boyun yarıçapını ve b ise kabuk eğriliğini etkileyen geometrik bir parametreyi göstermektedir. Kabuğun eğriliğini gösteren şekil parametresi κ aşağıdaki gibi ifade edilmektedir.

$$\kappa = 1 + a^2/b^2 \tag{6}$$

Yapıların deprem analizinde 1999-Düzce-Merkez istasyonunda kaydedilen Düzce depreminin doğu-batı yönündeki ivme kaydı esas alınmıştır. İvme kaydının tamamının kullanılması dinamik analizde oldukça uzun süre alacağından yapılacak olan parametrik çalışmada Şekil 3'te verilen ivme kaydının en büyük değerlerinin bulunduğu 5 ile 10 s arası dikkate alınmış ve 0.01 zaman artımında yapılar analiz edilmiştir. Söz konusu ivme aralığı farklı yüksekliklere, eğriliklere, kalınlıklara ve boyun seviyesine sahip 20 farklı soğutma kulesi modeline uygulanmış ve elde edilen sonuçlar karşılaştırılmalı olarak sunulmuştur.



Şekil 2: Hiperbolik soğutma kulesi [13],[14].

Tablo 1: Modellenen soğutma kulesinin geometrik özellikleri [13], [14].

Tanım	Sembol	Değer (m)
Boyun üst yüksekliği	Z_H	24.090
Boyun alt yüksekliği	Z_U	91.260
Üst çap	d_C	55.070
Boyun çapı	d_T	50.608
Taban çapı	d_U	96.582
Kolon çapı	-	0.7
Kolon çifti sayısı	-	44
Kolon yüksekliği	Z_C	6.95



Şekil 3: 1999-Düzce depremi ivme kaydı.

3 Analiz Sonuçları

Hiperbolik soğutma kulelerinin deprem etkisindeki dinamik davranışlarını parametrik olarak incelemek amacıyla farklı geometrik ölçüler kullanılarak modellenen kule örnekleri analiz edilmiş ve kule gövdesinin eğriliği, narinliği, kalınlığı ve boyun seviyesinin yüksekliği gibi parametrelerin kulenin davranışına etkileri araştırılmıştır.

Öncelikle eğrilik etkisini dikkate almak amacıyla taban çapı (d_U) 96.582 m olarak sabit tutularak kule taban çapının boyun çapına oranı (d_U/d_T) 1.75, 2.00, 2.25, 2.50 ve 2.75 olacak şekilde boyun çapı (d_T) belirlenmiş ve beş farklı çözüm yapılmıştır. Burada d_U/d_T oranının artması eğriliğin artması anlamına gelmektedir.

Daha sonra aynı soğutma kulesi narinlik açısından incelenmiştir. Burada boyun çapı (d_T) 50.608 m olarak sabit tutularak kule yüksekliğinin boyun çapına oranı (H/d_T) 2.0, 2.5, 3.0, 3.5 ve 4.0 olacak şekilde kule yüksekliği (H) hesaplanmış ve beş farklı analiz yapılmıştır. Artan H/d_T oranı narinliğin artması anlamına gelmektedir.

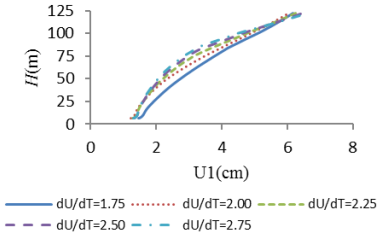
Üçüncü aşamada kabuk kalınlığının kule davranışına etkisi irdelenmiştir. Bu amaçla kabuk yarıçapı (R) sabit tutularak kabuk yarıçapının kabuk kalınlığına oranı (R/t) 50, 75, 100, 125 ve 150 olacak şekilde kule boyunca lineer değişen kabuk kalınlığı (t) hesaplanmış ve beş farklı analiz gerçekleştirilmiştir. Görüldüğü gibi R/t oranının artmasıyla kabuk kalınlığı azalmaktadır.

Son olarak kule yüksekliği H ($Z_U + Z_H$) sabit tutulmuş ve boyun alt yüksekliğinin boyun üst yüksekliğine oranı (Z_U/Z_H) 0, 1, 2, 3 ve 4 olacak şekilde çözümler yapılarak boyun seviyesinin kule davranışına etkisi araştırılmıştır. (Z_U/Z_H) oranı için sırasıyla 1, 2, 3, 4 ve 0 değerleri boyun seviyesinin tabandan yüksekliğinin giderek artmasını ifade etmektedir. (Z_U/Z_H) oranı sıfır için boyun seviyesi tepe seviyesine ulaşmıştır.

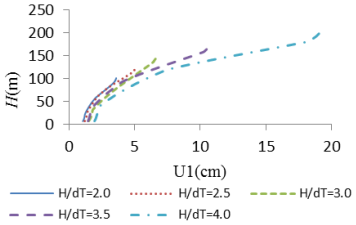
Elde edilen maksimum değerler değişen parametreler için karşılaştırılmaktadır.

Tüm bu analizlerden elde edilen 0⁰'deki yatay yer değiştirmelerin kule yüksekliği boyunca değişimi Şekil 4'te verilmektedir.

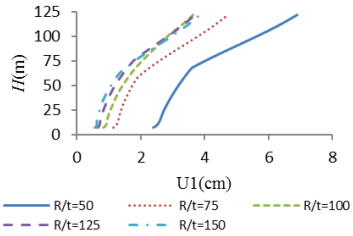
Şekillerden görüldüğü maksimum yatay yer değiştirmeler beklendiği gibi tepe seviyesinde oluşmaktadır. d_U/d_T oranı arttıkça kule tepe noktasındaki yer değiştirmeler d_U/d_T=2.00 hariç artmaktadır. Elde edilen maksimum yer değiştirmeler sırasıyla 6.18, 6.05, 6.26, 6.45 ve 6.62 cm'dir. En küçük ve en büyük değer karşılaştırıldığında yer değiştirmeler yaklaşık %9.5 oranında artmıştır. Boyun çapı azaldıkça kulenin rijitliğinin azalacağı düşünüldüğünde yatay yer değiştirmelerin artması beklenen bir durumdur. Artan H/d_T oranına bağlı olarak ise tepe noktasındaki maksimum yatay yer değiştirmeler, sırasıyla 3.58, 5.10, 6.73, 10.81 ve 19.16 cm olmak üzere, artmıştır. Kule yüksekliğinin artması sonucunda en büyük ve en küçük değerler arasında %435 oranında bir değişim olmuştur. Kule yüksekliğinin artması narinliğin büyümesi anlamına geldiğinden yatay yer değiştirmelerin artmasına da beklenen bir durumdur. R/t oranının artışı ise en büyük yatay yer değiştirmelerde R/t=100 oranına kadar azalmaya ve bu orandan sonra ise artmaya neden olmuştur. Elde edilen değerler sırasıyla 6.88, 4.73, 3.63, 3.69 ve 3.84 cm şeklindedir. En küçük ve en büyük değerler dikkate alındığında meydana gelen değişim yaklaşık %90 civarındadır. (Z_U/Z_H) oranındaki artış yani boyun seviyesinin yüksekliğinin giderek artması ise (Z_U/Z_H)=1.0 oranından sonra maksimum yatay yer değiştirmelerde azalmaya neden olmuştur. Burada elde edilen maksimum yer değiştirmeler sırasıyla 6.03, 4.15, 6.17, 6.13 ve 6.13 cm'dir. Burada yine en büyük ve en küçük değer arasındaki değişim yaklaşık %49 mertebesindedir. Dikkat edildiğinde yatay yer değiştirmeler üzerinde kule yüksekliğinin ve kabuk kalınlığının diğer değişkenlere göre daha baskın ve belirleyici olduğu görülmektedir.



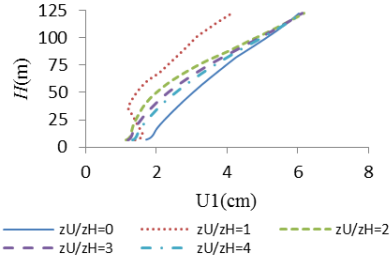
(a): Eğrilik etkisi.



(b): Narinlik etkisi.



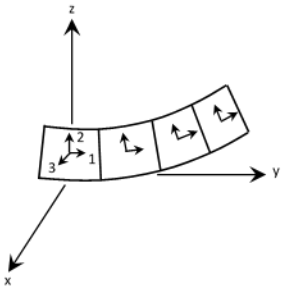
(c): Kalınlık etkisi.



(d): Boyun seviyesi etkisi.

Şekil 4: Yatay yer değiştirmelerin yükseklik boyunca değişimi.

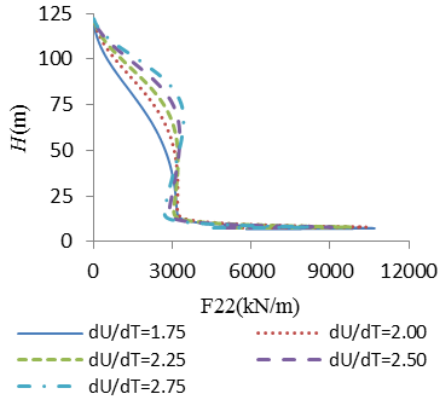
SAP2000 yazılımında iç kuvvetler ve momentler elaman lokal eksenlerine göre adlandırılmaktadır. Lokal eksenler 1, 2, 3 diye numaralandırılmakta olup 1 ekseni açısal doğrultudaki, 2 ekseni meridyonel doğrultudaki ve 3 ekseni de elemana dik doğrultudaki eksenlerdir. Bu durumda aşağıdaki tablo ve grafiklerde verilen F22 kuvveti 2 ekseni yönünde elemanın birim uzunluğa etkiyen meridyonel kuvvetti, M11 momenti ise 2 ekseni etrafında elemanın birim uzunluğunda oluşan momenti göstermektedir (Şekil 5).



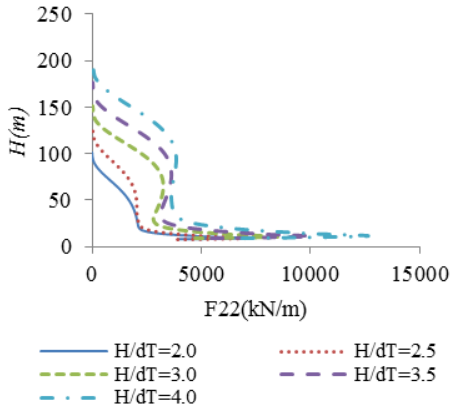
Şekil 5: Lokal eksen takımının yerleşimi.

0^0'deki meridyonel kuvvetlerin kule boyunca değişimi Şekil 6'da verilmektedir. Dikkate alınan tüm çözümler için en büyük meridyonel kuvvetler kule tabanında oluşmaktadır. Eğrilik arttıkça meridyonel kuvvetler de azalmaktadır. Kalınlık için tersi davranış gözlenmektedir, yani azalan kalınlıkla birlikte meridyonel kuvvetler azalmaktadır. En büyük ve en küçük meridyonel kuvvetler dikkate alındığında eğrilik için %22, kalınlık için %73 mertebesinde bir azalma söz konusudur. Narinlik arttıkça meridyonel kuvvetlerde artmaktadır. En büyük artış miktarı %76 civarındadır. Boyun seviyesinin değişimi ise (Z_U/Z_H)=1.0 oranından itibaren düzenli artmaktadır. Meridyonel kuvvetler üzerinde kalınlık ve narinlik etkisi daha belirleyici olmuştur. Elde edilen en büyük meridyonel kuvvetler aşağıda Tablo 2'de sunulmuştur.

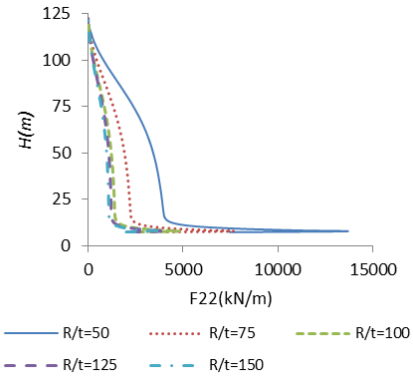
Meridyonel momentlerin kule boyunca değişimi Şekil 7'de verilmektedir. Maksimum meridyonel momentler meridyonel kuvvetlerde olduğu gibi kule tabanında oluşmaktadır. Kalınlık azaldıkça meridyonel momentler azalmaktadır. Dikkate alınan oranlar için kalınlık etkisinden meydana gelen azalma %68.5 civarındadır. Boyun yüksekliğinin artması (Z_U/Z_H)= 1 oranı hariç meridyonel momentlerde önemli bir değişime sebep olamamıştır. Narinliğin artması ise meridyonel momentlerin artmasına neden olmuştur. En büyük değişim %129 oranındadır. Eğrilik arttıkça d_U/d_T=1.75 oranı hariç meridyonel momentlerde azalma gözlenmiştir. En büyük azalma yaklaşık %9 civarındadır. Meridyonel momentler üzerinde de narinlik ve kalınlık etkisi daha baskın ve belirleyici olmuştur. Elde edilen en büyük meridyonel momentler aşağıda Tablo 3'te sunulmaktadır.



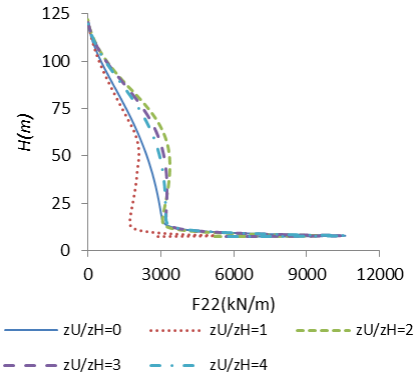
(a): Eğrilik etkisi.



(b): Narinlik etkisi.



(c): Kalınlık etkisi.



(d): Boyun seviyesi etkisi.

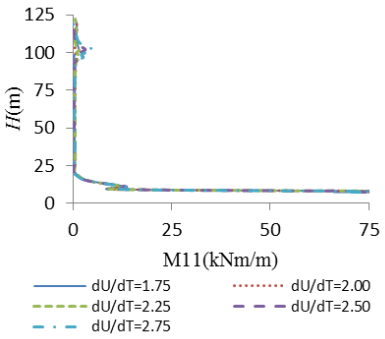
Şekil 6: Meridyonel kuvvetlerin yükseklik boyunca değişimi.

Tablo 2: 0^0'deki maksimum meridyonel kuvvetler.

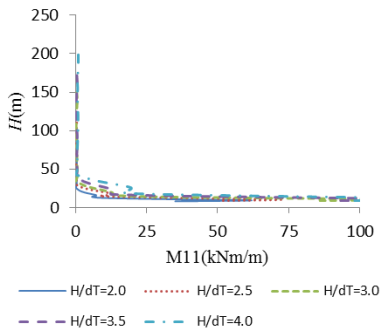
F22 (kN/m)				
$d_U/d_T = 1.75$	$d_U/d_T = 2.00$	$d_U/d_T = 2.25$	$d_U/d_T = 2.50$	$d_U/d_T = 2.75$
10616	10337	9691	8995	8311
$H/d_T = 2.0$	$H/d_T = 2.5$	$H/d_T = 3.0$	$H/d_T = 3.5$	$H/d_T = 4.0$
7141	7161	8556	9944	12559
$R/t = 50$	$R/t = 75$	$R/t = 100$	$R/t = 125$	$R/t = 150$
13597	7652	4759	4104	3662
$Z_U/Z_H = 0$	$Z_U/Z_H = 1$	$Z_U/Z_H = 2$	$Z_U/Z_H = 3$	$Z_U/Z_H = 4$
10500	5239	9476	10333	10543

Tablo 3: 0^0'deki maksimum meridyonel momentler.

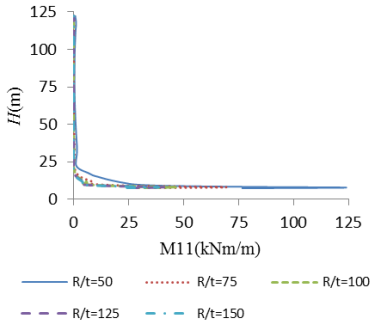
M11 (kNm/m)				
$d_U/d_T = 1.75$	$d_U/d_T = 2.00$	$d_U/d_T = 2.25$	$d_U/d_T = 2.50$	$d_U/d_T = 2.75$
103	106	104	100	96
$H/d_T = 2.0$	$H/d_T = 2.5$	$H/d_T = 3.0$	$H/d_T = 3.5$	$H/d_T = 4.0$
62	72	114	128	142
$R/t = 50$	$R/t = 75$	$R/t = 100$	$R/t = 125$	$R/t = 150$
124	70	46	42	39
$Z_U/Z_H = 0$	$Z_U/Z_H = 1$	$Z_U/Z_H = 2$	$Z_U/Z_H = 3$	$Z_U/Z_H = 4$
103	45	100	105	106



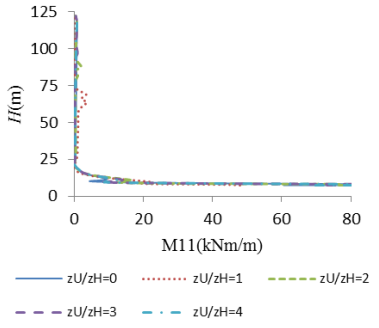
(a): Eğrilik etkisi.



(b): Narinlik etkisi.



(c): Kalınlık etkisi.



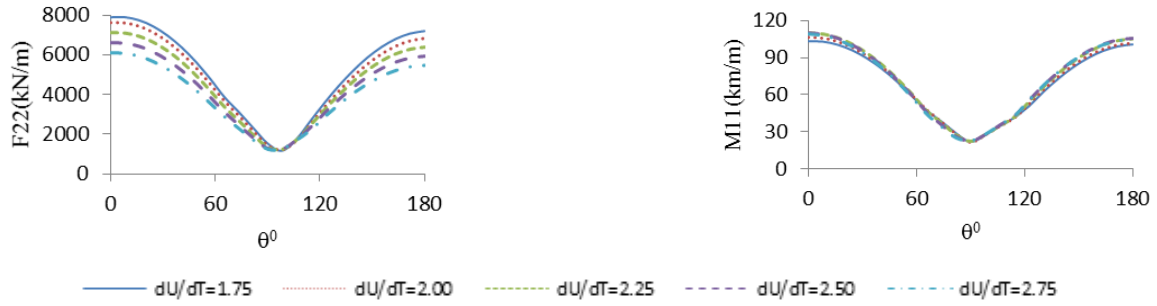
(d): Boyun seviyesi etkisi.

Şekil 7: Meridyonel momentlerin yükseklik boyunca değişimi.

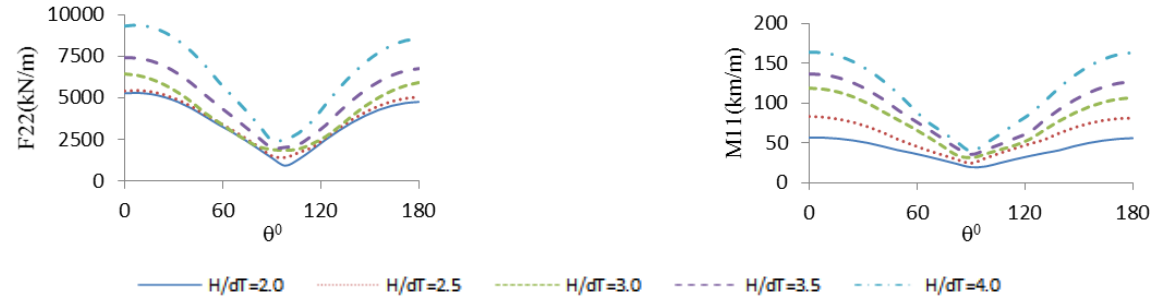
Kule tabanında elde edilen meridyonel kuvvetlerin ve momentlerin açısal değişimi Şekil 8'de verilmektedir. Kule tabanındaki maksimum meridyonel kuvvet ve momentler daha önce yorumlandığından burada tekrar edilmemiş, sadece 0^0 ile 180^0 arasında açısal doğrultuda değişimini gösteren grafikler sunulmuştur. 180^0 ile 360^0 arasındaki dağılım da burada verilen dağılım ile aynıdır. Şekillerden de görüldüğü gibi açısal değişimler incelendiğinde meridyonel kuvvetler ve momentler 0^0 ve 180^0'de büyük değerlere ulaşmaktadır.

Boyun seviyesinde elde edilen meridyonel kuvvetlerin açısal değişimi Şekil 9'da verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi eğrilik arttıkça boyun seviyesindeki meridyonel kuvvetler artmaktadır. En büyük ve en küçük meridyonel kuvvetlere bakıldığında artış miktarı %185 civarındadır. Kalınlık azaldıkça ise boyun seviyesindeki meridyonel kuvvetler de azalmaktadır ve en büyük azalma miktarı %71 mertebesindedir. Boyun seviyesinin yüksekliği arttıkça boyun seviyesindeki meridyonel kuvvetler azalmaktadır. Burada da

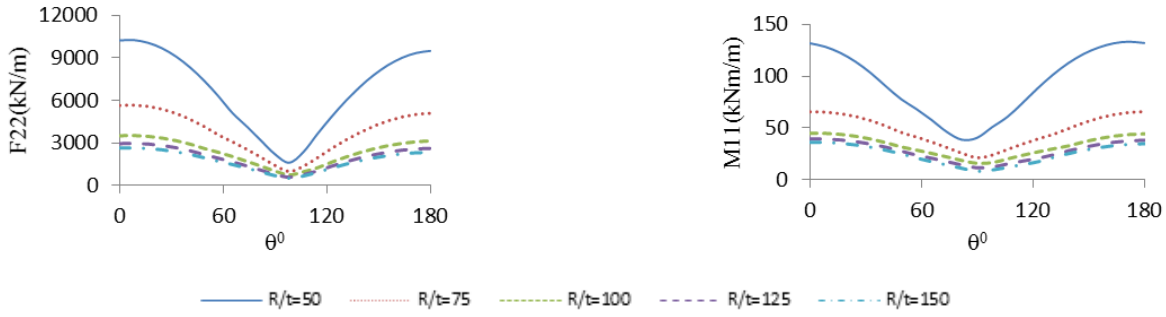
azalma oranı yaklaşık olarak %99'dur. Narinlik arttıkça boyun seviyesindeki meridyonel kuvvetler artmıştır. En büyük değişim %177 oranındadır. Genel olarak bakıldığında tüm değişkenler için boyun seviyesinde elde edilen meridyonel kuvvetlerde önemli değişimler olduğu söylenebilir. Elde edilen en büyük meridyonel kuvvetler aşağıda Tablo 4'te sunulmuştur. Kule tepesinde elde edilen meridyonel kuvvetlerin açısal değişimi Şekil 10'da verilmektedir. Şekillerden görüldüğü gibi eğrilik artarken tepe seviyesindeki meridyonel kuvvetler artmaktadır. En büyük artış miktarı sırasıyla %80 civarındadır. Kalınlık azaldıkça ise tepe seviyesindeki meridyonel kuvvetler de azalmıştır. En büyük azalma %71 oranındadır. Narinlik ve boyun seviyesi değişimi kule tepesinde elde edilen meridyonel kuvvetlerde bazen artmaya bazen de azalmaya sebep olmuştur. Tepe seviyesinde elde edilen meridyonel kuvvetler üzerinde kalınlık ve eğrilik etkisi daha baskın ve belirleyici olmuştur. Elde edilen en büyük meridyonel kuvvetler aşağıda Tablo 5'te sunulmuştur.



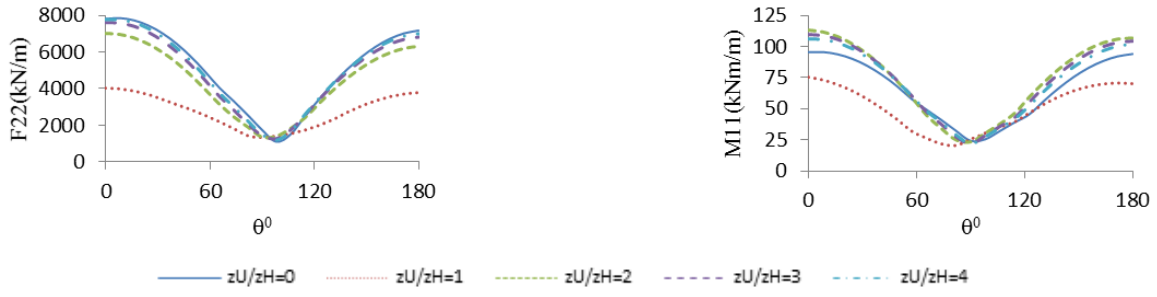
(a): Eğrilik etkisi.



(b): Narinlik etkisi.



(c): Kalınlık etkisi.



(d): Boyun seviyesi etkisi.

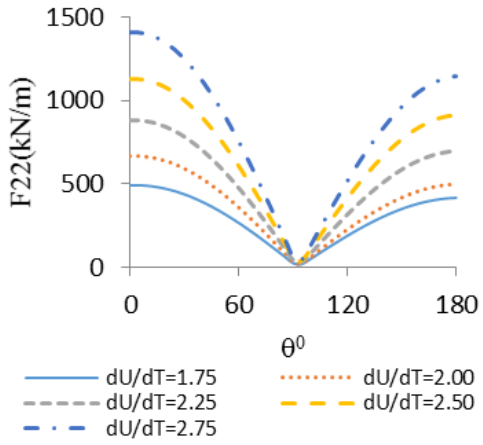
Şekil 8: Kule tabanındaki meridyonel kuvvetlerin ve momentlerin açısal değişimi.

Tablo 4: Boyun seviyesinde oluşan maksimum meridyonel kuvvetler.

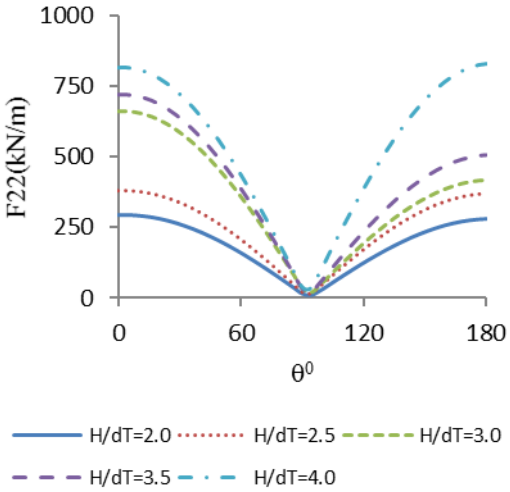
F22 (kN/m)				
$d_U/d_T = 1.75$	$d_U/d_T = 2.00$	$d_U/d_T = 2.25$	$d_U/d_T = 2.50$	$d_U/d_T = 2.75$
494	669	880	1128	1407
$H/d_T = 2.0$	$H/d_T = 2.5$	$H/d_T = 3.0$	$H/d_T = 3.5$	$H/d_T = 4.0$
294	381	661	719	814
$R/t = 50$	$R/t = 75$	$R/t = 100$	$R/t = 125$	$R/t = 150$
673	366	236	216	194
$Z_U/Z_H = 0$	$Z_U/Z_H = 1$	$Z_U/Z_H = 2$	$Z_U/Z_H = 3$	$Z_U/Z_H = 4$
4.20	1905	1711	993	520

Tablo 5: Tepe seviyesinde oluşan maksimum meridyonel kuvvetler.

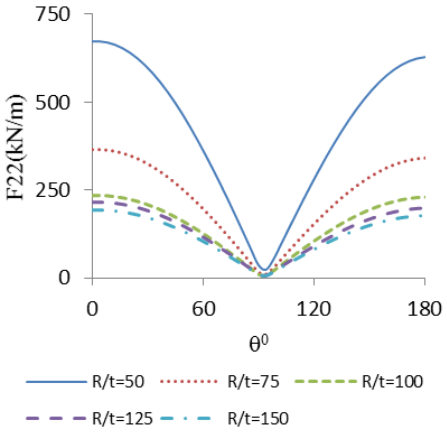
F22 (kN/m)				
$d_U/d_T = 1.75$	$d_U/d_T = 2.00$	$d_U/d_T = 2.25$	$d_U/d_T = 2.50$	$d_U/d_T = 2.75$
4.80	5.93	6.87	7.77	8.63
$H/d_T = 2.0$	$H/d_T = 2.5$	$H/d_T = 3.0$	$H/d_T = 3.5$	$H/d_T = 4.0$
3.86	3.51	4.73	4.16	3.99
$R/t = 50$	$R/t = 75$	$R/t = 100$	$R/t = 125$	$R/t = 150$
6.53	3.55	2.28	2.08	1.87
$Z_U/Z_H = 0$	$Z_U/Z_H = 1$	$Z_U/Z_H = 2$	$Z_U/Z_H = 3$	$Z_U/Z_H = 4$
4.20	3.37	5.77	5.66	5.51



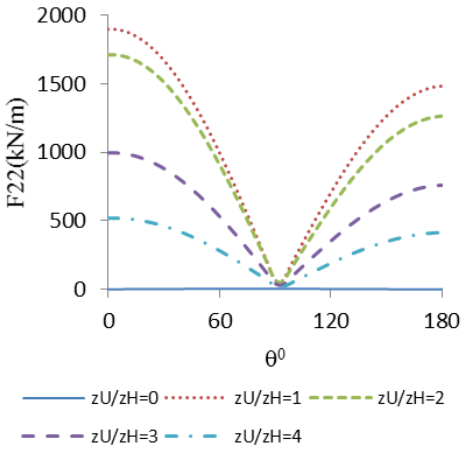
(a): Eğrilik etkisi.



(b): Narinlik etkisi.

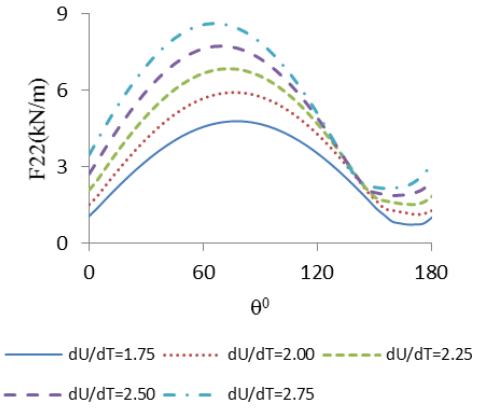


(c): Kalınlık etkisi.

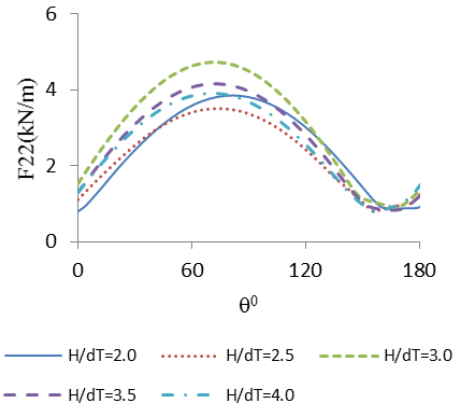


(d): Boyun seviyesi etkisi.

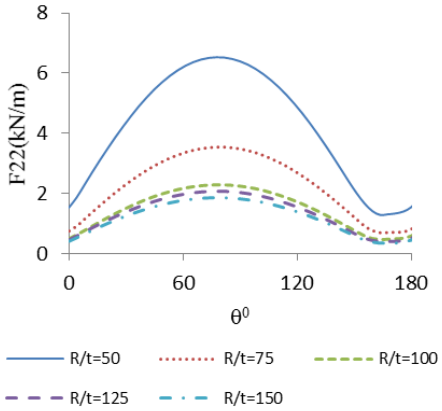
Şekil 9: Boyun seviyesindeki meridyonel kuvvetlerin açısal değişimi.



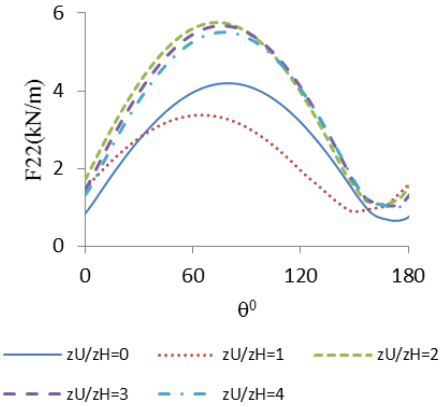
(a): Eğrilik etkisi.



(b): Narinlik etkisi.



(c): Kalınlık etkisi.



(d): Boyun seviyesi etkisi.

Şekil 10. Tepe seviyesindeki meridyonel kuvvetlerin açısal değişimi.

4 Sonuçlar

Hiperbolik soğutma kuleleri geniş çaplı narin yapılardır. Dolayısıyla dinamik davranışlarının bilinmesi tasarımcılar için büyük önem arz etmektedir. Bu amaçla sunulan çalışmada kule geometrik özellikleri değiştirilerek parametrik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Yapının narinliği, eğriliği, kabuk kalınlığı ve boyun seviyesinin yüksekliği gibi parametrelerin dinamik davranışa etkisi araştırılmıştır.

Dikkate alınan tüm parametreler hiperbolik soğutma kulelerinin deprem davranışını önemli ölçüde değiştirmektedir. Ancak özellikle taban seviyesindeki meridyonel kuvvetler ve momentler üzerinde kalınlık ve narinlik daha fazla etkiye sahip iken tepe seviyelerindeki meridyonel kuvvetler üzerinde kalınlık ve eğrilik etkisi diğer parametrelere nazaran daha fazla olmuştur. Boyun seviyesindeki meridyonel kuvvetler ise tüm parametrelerden etkilenmişlerdir. Yatay yer değiştirmeler incelendiğinde kule yüksekliği yani narinlik etkisi ve kabul kalınlığı diğer parametrelere göre daha baskın ve belirleyicidir.

Sonuç olarak kule geometrisi değiştirilerek oluşması beklenen yer değiştirmeler ve kuvvetlerin istenilen sınır değerler arasında tutulabileceği görülmektedir. Dolayısıyla hem ekonomik hem de güvenli bir tasarım birçok parametrenin dikkate alınmasıyla sağlanabilir.

5 Kaynaklar

[1] Prasahanth N, Sayeed S. "To study the effect of seismic loads and wind load on hyperbolic cooling tower of varying dimensions and RCC shell thickness". *International Journal of Emerging Trends in engineering and Development*, 4(3), 260-269, 2013.

[2] Nasir AM, Thambiratnam DP, Butler D, Austin P. "Dynamics of axisymmetric hyperbolic shell structures". *Thin-Walled Structures*, 40(7-8), 665-690, 2002.

[3] Karisiddappa, Viladkar MN, Godbole PN, Krishna P. "Finite element analysis of column supported hyperbolic cooling towers using semi-loof Shell and beam elements". *Engineering Structures*, 20(1), 75-85, 1998.

[4] Tande SN, Snehal SC. "Linear and Nonlinear Behavior of RC Cooling tower under earthquake loading". *International Journal of Latest Trends in Engineering and Technology (IJLTET)*, 2(4), 370-379, 2013.

[5] Asadzadeh E, Rajan A, Kulkarni MS, Sahebali A. "Finite element analysis for structural response of RCC cooling tower shell considering alternative supporting systems". *International Journal of Civil Engineering and Technology*, 3(1), 82-98, 2012.

[6] Kulkarni S, Kulkarni AV. "Static and dynamic analysis of hyperbolic cooling tower". *Journal of Civil Engineering Technology and Research*, 2(1), 39-61, 2014.

[7] Weng XR, Dai JW, Wu JX. "Nonlinear seismic responses analysis for a super cooling tower". *International Efforts in Lifeline Earthquake Engineering*, 105-112, 2013.
[8] Nuhoğlu H, Şahin S. "Sanayi bacalarının ve minarelerin dinamik davranışlarının incelenmesi". *Deprem Sempozyumu*, Kocaeli, Türkiye, 23-25 Mart 2005.
[9] Çarhoğlu AI, Usta P, Korkmaz KA. "Ayasofya örneğinde tarihi minare yapılarının sismik davranışının incelenmesi". *SDU International Journal of Technologic Science*, 5(1), 36-43, 2013.
[10] Aksu T. "A finite element formulation for column-supported hyperboloid cooling towers". *Computers and Structures*, 59(5), 965-974, 1996.
[11] SAP2000. "Integrated Finite Elements Analysis and Design of Structures". Computers and Structures, Inc, Berkeley, USA, 2008.
[12] MATLAB. "The Language of Technical Computing". The Mathworks, Natick, MA, USA, 2009.
[13] Viladkar MN, Karisiddappa, Bhargava P, Godbole PN, "Static soil-structure interaction response of hyperbolic cooling towers to symmetrical wind loads". *Engineering Structures,* 28(9), 1236-1251, 2006.
[14] Noorzaei J, Naghshineh A, Abdul Kadir MR, Thanoon WA and Jaafar MS. "Nonlinear interactive analysis of cooling tower-foundation-soil interaction under unsymmetrical wind load". *Thin-Walled Structures,* 44(9), 997-1005, 2006.