

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

84974

SU İÇİNDEKİ YAPILARIN DİNAMİK ÖZELLİKLERİ

İnşaat Mühendisi Devrim AKYOL

F.B.E. İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

T.C. YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMANTASYON MERKEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Zekeriya POLAT

26.03.1999

İSTANBUL, 1999

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	i
ŞEKİL LİSTESİ	vii
TABLO LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1 GİRİŞ	1
2 KAYNAKLARA GÖRE İNCELEMELER	2
2.1 Su içindeki Kulelerin Dinamik Özellikleri	3
2.1.1 Giriş	3
2.1.2 Kabuller ve temel denklemler	3
2.1.3 Kompleks frekans davranış ifadeleri	6
2.1.4 Yapı davranışı	8
2.1.5 Hidrodinamik çözümler	8
2.1.6 Hidrodinamik çözümler - Sınır şartları	11
2.1.7 Yüzey dalgalarının etkisi	12
2.1.8 Hidrodinamik etkileşimin başlıca etkileri	13
2.1.9 Kompleks frekans cevapları	13
2.1.10 Hakim titreşim periyodu	18

2.1.11	Ek kütle kavramı	21
2.2	Su Alma Kulelerinin Değişken Kesitli Olması Hali	26
2.2.1	Giriş	26
2.2.2	Kulelerin modal davranışı	28
2.2.3	Su içindeki kuleler	30
2.2.3.1	Kesin tekil mod davranışı	30
2.2.3.2	Hidrodinamik ek kütle	32
2.2.3.3	Sonuçların Değerlendirilmesi	35
2.2.4	Elastik Zemine Oturan Kuleler	37
2.2.4.1	Temel mod yanıtının kesin çözümü	37
2.2.4.2	Temel mod yanıtının yaklaşık çözümü	39
2.2.4.3	Davranış sonuçları	40
2.2.5	Esnek Zemin Üzerine Oturan Su İçindeki Kuleler	44
2.2.6	Eşdeğer Yanal Kuvvetler	45
2.3	Su Alma Kulelerinde Hidrodinamik Ek Kütlenin Basitleştirilmiş Hesabı	48
2.3.1	Giriş	48
2.3.2	Çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesi	48
2.3.2.1	Üniform kuleler	48
2.3.2.1.1	Üniform Kuleler – Özet	55
2.3.2.2	Üniform Olmayan Kuleler	56
2.3.2.2.1	Üniform olmayan kuleler – Özet	60
2.3.3	Kule içindeki suyun hidrodinamik ek kütlesi	62

2.3.3.1	Üniform kuleler	62
2.3.3.1.1	Üniform Kuleler – Özet	64
2.3.3.2	Üniform Olmayan Kuleler	66
2.3.3.2.1	Üniform olmayan kuleler – Özet	68
2.4	Su Alma Kulelerinin Davranışında Zemin-Yapı-Su Etkileşimi	70
2.4.1	Giriş	70
2.4.2	Kule - zemin - su sistemi	70
2.4.3	Hidrodinamik etkiler	73
2.4.3	Temel denklemler ve nümerik çözümleri	78
2.4.4	Sayısal örnek	78
2.4.5	Su yapı karşılıklı etkileşiminin tesirleri	79
2.4.6	Temel kenarlarının zeminden ayrılmasının etkileri	83
2.5	İncelenen Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar	85
2.5.1	Liaw, C. Y. ve Chopra, A. K., (1974), “Su içindeki kulelerin dinamik özellikleri” [2.1]	85
2.5.2	Goyal, A. ve Chopra A.K., (1989), “Su alma kulelerinin deprem davranış analizi” [2.2]	85
2.5.3	Goyal, A. ve Chopra A.K., (1989), “Su alma kulelerinde hidrodinamik ek kütlelerin basitleştirilmiş hesap yöntemi ile belirlenmesi” [2.3]	86
2.5.4	Syprakos, C.C. ve Xu, C., (1997), “Su alma kulelerinde zemin-yapı-su karşı etkileşimi” [2.4]	86
3	ÖRNEK ÇALIŞMALAR	87
3.1	Giriş	87

3.2	Örnek 1	88
3.3	Örnek 2	94
4	SONUÇLAR	101
4.1	Örnek 1’den Elde Edilen Sonuçlar	101
4.2	Örnek 2’den Elde Edilen Sonuçlar	101
KAYNAKLAR		102
EKLER		103
ÖZGEÇMİŞ		129



SİMGE LİSTESİ

$\varnothing_1(z)$	Kulenin susuz ortamdaki temel modu
ω_1	Açısal frekans
ζ_1	Sönüm oranı
$P_{c1}^*(t)$	Kule dış yüzeyine etkiyen $p_c(\theta, z, t)$ hidrodinamik basınçlarına maruz kulenin birinci titreşim modundaki genelleştirilmiş yük
C	Su içinde ses hızı
u^r, u^θ, u^z	Suyun birim yer değiştirmesinin sırasıyla radyal, teğetsel ve düşey bileşenleri
$\bar{p}_0$	Yer sarsıntısına maruz rijit kulenin yüzeyine etkiyen hidrodinamik basınçların kompleks frekans cevap fonksiyonu
$\bar{p}_1$	Zorlamanın birinci modda olmasına karşı gelen fonksiyon
m_1	m 'in $\alpha_m > \omega/c$ olması halinde en küçük integral değeri
$\phi(z)$	1 ve $\phi_1(z)$, kulenin hakim titreşim mod şekli (su olmaması durumunda)
$\ddot{u}_g(t)$	Yatay yer ivmesi
$U(z, t)$	Yanal yer değiştirmeler
$Y_n(t)$	n . titreşim modunda titreşim yapan kulede oluşan dönme ve yanal yer değiştirmeleri içeren $\phi_n(z)$ ve $\psi_n(z)$ fonksiyonları ile tanımlanan ilgili genelleştirilmiş (modal) koordinat
ω_n	n . doğal titreşim açısal frekansı
L_n	Genelleştirilmiş zorlama terimi
$m_s(z)$	Kulenin birim yüksekliğindeki kütle,

$I_s(z)$	Atalet momenti
H_s, H	Kulenin yüksekliği
$Y_n(\omega)$	Modal koordinatlar
M_{nn}^o	Kulenin çevresindeki su ile karşılıklı etkileşiminden oluşan ek kütle
L_n^o	Kulenin çevresindeki su ile karşılıklı etkileşiminden oluşan zorlama
$m_o^o(z)$	Zorlama terimi, $\phi_n(z)$ birim yatay yer ivmesi ve kule rijit olduğunda, kulenin dış yüzeyindeki titreşim düzlemine etki eden dış momentler
$f_n^o(z), m_n^o(z)$	Zorlama, $\phi_n(z)$ birim yatay yer ivmesi ve yer hareketinin olmaması durumunda kule ekseninin dönme ivmesi $\psi_n(z)$ olduğundaki uygun fonksiyonlar
$f_o^i(z)$	Zorlama, $\phi_n(z)$ birim yatay yer ivmesi ve kule rijit olduğunda kulenin iç yüzeyindeki titreşim düzlemine etki eden hidrodinamik yanal kuvvet
$m_o^i(z)$	Zorlama, $\phi_n(z)$ birim yatay yer ivmesi ve kule rijit olduğunda kulenin iç yüzeyindeki titreşim düzlemine etki eden iç momentler
$f_o^o(z)$	Birim yatay yer ivmesinden dolayı, rijit kulenin dış yüzeyindeki titreşim düzlemine etki eden yanal hidrodinamik kuvvetler
$f_o^i(z)$	Birim yatay yer ivmesinden dolayı, rijit kulenin iç yüzeyindeki titreşim düzlemine etki eden yanal hidrodinamik kuvvetler
ξ_n	$\eta_s/2$ sönümlleme oranı ve T_n^r titreşim periyodunda değerlendirilen deprem yer hareketine göre yalancı (pseudo)-ivme davranış spektrum ordinatı
T_n^r	n. modda titreşim yapan kulenin suyun etkilerinin dahil edilmiş titreşim periyodu
ω_1	Su olmayan bir ortamda bulunan ankastre temelli kulenin temel titreşim frekansı

$\theta_f(\omega)$	Kule temelinin serbest titreşim dönme frekansı
$u_f(\omega)$	Kule temelinin serbest titreşim öteleme frekansı
m_t	Kulenin toplam kütlesi
I_t	Kulenin temel dönme eksenine etrafındaki kütle atalet momenti
m_f	Temelin zemin seviyesi altındaki bölümünün kütlesi
I_f	Temelin zemin seviyesi altındaki bölümünün kütle atalet momenti
η_s	Histeritik sabit sönüm katsayısı
$\text{Im}[F(\omega)]$	Kompleks $F(\omega)$ fonksiyonunun sanal kısmı
η_a	Ek sönümleme faktörü
σ	Dalga parametresi
$\phi_n(z)$	$m_s(z)$ virtüel (toplam) kütleli kulenin n. tabii titreşim mod şekli
$S_a(T_n^r, \xi_n^r)$	T_n^r titreşim periyodu ve $\xi_n^r = \xi_n = \eta_s / 2$ sönümleme oranındaki yer hareketi için yalancı ivme spektral değeri
M_n	Genelleştirilmiş kütle
L_n	Genelleştirilmiş zorlama
$\tilde{m}_s(z)$	İtibari kütle
$\phi_n(z)$	Kulenin susuz ortamdaki titreşim modu
$m_a^o(z)$	Kulenin çevresindeki suyun oluşturduğu ek kütle
$m_a^i(z)$	Kulenin içerisindeki suyun oluşturduğu ek kütle
$H_o, H, h_o,$	Kulenin çevresindeki suyun derinliği

H_i, H, h_i	Kulenin içerisindeki suyun derinliği
ρ_w	Suyun kütle yoğunluğu
r_o, r_a	Kulenin dış yarıçapı
r_i	Kulenin iç yarıçapı
α_m	$(2m-1)\pi/2$
K_n	n. dereceden ikinci mertebe değiştirilmiş Bessel fonksiyonu
I_n	n. dereceden birinci mertebe değiştirilmiş Bessel fonksiyonu
$m_a^o(z) / m_\infty^o$	Kulenin çevresindeki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi
$m_a^i(z)/m_\infty^i$	Kulenin içindeki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi
$2a_o$	Kulenin zemin hareketine dik yöndeki boyutu
$2b_o$	Kulenin zemin hareketi yönündeki boyutu
$2\bar{a}_i$	“Eşdeğer” üniform eliptik kulenin yer hareketi doğrultusuna dik iç enine kesit boyutu
$2\bar{b}_i$	“Eşdeğer” üniform eliptik kulenin yer hareketi doğrultusu yönündeki iç enine kesit boyutu
a_o/b_o	Kulenin enine kesit boyutları oranı
$\rho_w A_o$	Kulenin birim yüksekliğinin hacmine karşı gelen su kütlesi
$\rho_w \pi a_o^2$	a_o yarıçaplı silindirin birim boy hacmine karşı gelen su kütlesi
z	Dikkate alınan noktanın kule temeline uzaklığı
$\bar{r}_0(z)$	Eşdeğer simetrik eksenli kulenin enine kesit yarıçapı,
A_i	Kule iç yüzeyinin enine kesit alanı

M_b	Kulenin toplam kütlesi
M_0	Kule tepesindeki kütle
h_f	Temelin yüksekliği
R, r_f	Temelin yarıçapı
M_f	Temelin toplam kütlesi
G_s	Zeminin kesme modülü,
ν_s	Poisson oranı
ρ_s	Zeminin kütle yoğunluğu
$\theta(t)$	Temelin dönmesi
$U(z,t)$	Zemine göre rölatif yer değiştirme
$z \cdot \theta(t)$	Temelin dönmesinden meydana gelen yer değiştirme
$\phi_i(z)$	Tahmini sapma modları
$q_i(t)$	Genelleştirilmiş koordinatlar
$p(r, \theta_z, t)$	Silindirik koordinatlardaki hidrodinamik basınç
p_i	Kule içindeki su basıncı
p_o	Kule çevresindeki su basıncı
$m_\infty^o = \rho_w \cdot \pi \cdot r_o^2$	Sonsuz uzun bir kulenin her birim uzunluğundaki kuleyi çeviren suyun oluşturduğu ek kütle,
$m_\infty^i = \rho_w \cdot \pi \cdot r_i^2$	Sonsuz uzun bir kulenin her birim uzunluğundaki kulenin içindeki suyun oluşturduğu ek kütle,
T	Kinetik enerji

V	Potansiyel enerji
Q_i	Genelleştirilmiş kuvvetler
G	Kesme modülü



ŞEKİL LİSTESİ

		Sayfa
Şekil 2.1.1	Yatay yer hareketine maruz su içindeki silindirik kule	2
Şekil 2.1.2	Hidrodinamik kuvvetin zorlama frekanslarına bağlı maksimum (genlik) değerleri, rijit kule	13
Şekil 2.1.3	$t/r_0 = 0.2$ ve $r_0/H_s = 0.05$ olan ince kulenin frekans oranlarına genelleştirilmiş ivme değerleri (Suyun sıkışabilirliği dahil edilse de edilmese de sonuçlar aynıdır)	14
Şekil 2.1.4	$t/r_0 =$ olan kalın kulelerin ($r_0/H_s = 0.25$) frekans cevapları	16
Şekil 2.1.5	$B_k(\omega)$ fonksiyonları üzerinde suyun sıkışabilirliğinin etkileri	18
Şekil 2.1.6	Kule yüksekliğine eşit çevredeki sudan dolayı kulenin hakim titreşim periyodunda oluşan artış	19
Şekil 2.1.7	Kulenin hakim titreşim periyoduna çevredeki suyun katkısı.	21
Şekil 2.1.8	Ek kütle dağılımlarının karşılaştırılması	23
Şekil 2.1.9	“Yaklaşık ek kütle” ile yapılan hata oranları	24
Şekil 2.2.1	İdealleştirilmiş kule - su - temel - zemin sistemi	26
Şekil 2.2.2	İdealize edilmiş üç değişik kule	27
Şekil 2.2.3	Dairesel silindirik kulede yanal kuvvetler, kesme ve kuvvetleri eğilme momentleri dağılımına çevredeki suyun katkısı, $H_s / r_a = 10$	34

		Sayfa
Şekil 2.2.4	Dairesel silindirik kulede yanal kuvvetler, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri dağılımına içerideki suyun katkısı, $H_s / r_a = 10$	34
Şekil 2.2.5	Rijit temel zemini üzerine oturan su içerisindeki dairesele silindirik kulelerin harmonik yatay yer hareketinden dolayı oluşan kesin ve yaklaşık davranışlarının (Hidrodinamik etkilerin ek kütle temsili) karşılaştırılması	35
Şekil 2.2.6	Dairesel silindirik kulelerin analizinde hidrodinamik etkilerin ek kütle ile temsil edilmesinin değerlendirilmesi; Verilen sonuçlar, rijit temel zemini üzerine oturan, su içerisinde ve su içerisinde olmayan kulelerin periyotları oranıdır.	36
Şekil 2.2.7	Susuz bir ortamda esnek zemine oturan dairesele silindirik kulelerin harmonik yer hareketinden dolayı oluşan gerçek ve eşdeğer BSD sistem davranışlarının karşılaştırılması	41
Şekil 2.2.8	Susuz ortamda rijit ve esnek temellere oturan kulelerin σ ve H_s/r_f oranlarına bağlı olarak birinci titreşim periyotlarının gerçek ve yaklaşık değerleri oranının karşılaştırılması.	42
Şekil 2.2.9	Dairesel silindirik kulelerde kule - temel - zemin etkileşiminden dolayı oluşan sabit ek histeretik sönüm faktörü (η_a)	43
Şekil 2.2.10	Susuz bir ortamda esnek temel zemini üzerine oturan dairesele silindirik kuleleri temsil eden eşdeğer bir serbestlik dereceli sistemin $\bar{\eta}_1$ sabit histeratik sönüm faktörü ; $\eta_s = 0.10$	43

		Sayfa
Şekil 2.3.1	Dairesel silindirik kulelerde çevredeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesi	50
Şekil 2.3.2	H_0 ve a_0 / b_0 ve A_0 parametreleri aynı olan dikdörtgen kesitli ve eliptik üniform kuleler için çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesinin normalleştirilmiş değerleri	53
Şekil 2.3.3	Çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesine maruz üniform eliptik kulelere tekabül eden “eşdeğer” dairese silindirik kulelerin özellikleri	54
Şekil 2.3.4	Üniform eliptik kuleler için çevredeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (“eşdeğer” dairese silindirik kule) değerlerinin karşılaştırılması.	55
Şekil 2.3.5	Su içindeki üniform kulelerin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (Basitleştirilmiş Hesap Yöntemi) değerlerinin karşılaştırılması	56
Şekil 2.3.6	Dış yüzey enine kesitleri gösterilen üniform olmayan iki kulenin eşdeğeri simetrik eksenli kuleler	58
Şekil 2.3.7	Su içindeki üniform olmayan iki kulenin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (Eşdeğer simetrik eksenli kule) değerlerinin karşılaştırılması	59
Şekil 2.3.8	Su içerisindeki giderek incelen simetrik eksenli kulelerin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık $[\tilde{r}_0(z)$ yarıçaplı dairese silindirik kuleler] değerlerinin karşılaştırılması.	60
Şekil 2.3.9	Su içindeki üniform olmayan iki kulenin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (Basitleştirilmiş	62

	Analiz Yöntemi) değerlerinin karşılaştırılması.	
Şekil 2.3.10	Dairesel silindirik kulelerde kule içerisindeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesi.	63
Şekil 2.3.11	Üniform kulelerde içerideki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (Basitleştirilmiş Analiz Yöntemi) değerlerinin karşılaştırılması.	65
Şekil 2.3.12	Üniform olmayan iki kulenin içerisindeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık ("Eşdeğer" simetrik eksenli kule) değerlerinin karşılaştırılması.	67
Şekil 2.3.13	Yüksekliği boyunca incelen simetrik eksenli kulelerin içerisindeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık [Yarıçaplı dairesel silindirik kuleler] değerlerinin karşılaştırılması;	68
Şekil 2.3.14	Üniform olmayan iki kulenin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (Basitleştirilmiş analiz yöntemi) değerlerinin karşılaştırılması.	69
Şekil 2.4.1	(a) Su alma kulesi; (b) Basitleştirilmiş model	71
Şekil 2.4.2	Yer değiştirmeler ve kuvvetler.	73
Şekil 2.4.4	Farklı durumlar için kulenin içerisindeki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi	75
Şekil 2.4.5	(a) Kesin ve basitleştirilmiş eşitliklerden elde edilen çevredeki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi; (b) Kesin ve basitleştirilmiş eşitliklerden elde edilen içerideki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi.	77

Şekil 2.4.6	(a) Kule tepesindeki eğilmeden ileri gelen yer değiştirmeler; (b) Temelin dönüşünden dolayı oluşan yer değiştirmeler	80
Şekil 2.4.7	Kule yüksekliği boyunca oluşan (a) Öteleme; (b) Moment; (c) Kesme kuvveti dağılımları.	81
Şekil 3.1	Briones Barajı su alma kulesi boyutları	89
Şekil 3.2	Tabana elastik ankastre su alma kulesinde temel kütlesi ile iç ve dış suyun hidrodinamik ek kütlelerinin dahil edilmesi halinde oluşan sehimler	90
Şekil 3.3	Tabana elastik ankastre su alma kulesinde temel kütlesi ile iç ve dış suyun hidrodinamik ek kütlelerinin dahil edilmesi halinde oluşan momentler	91
Şekil 3.4	Tabana elastik ankastre su alma kulesinde temel kütlesi ile iç ve dış suyun hidrodinamik ek kütlelerinin dahil edilmesi halinde oluşan momentler	92
Şekil 3.5	Köprü ayağı yapısal modeli	95
Şekil 3.6	Köprü ayağının sonlu eleman modeli	96
Şekil 3.7	İçve dış hidrodinamik su kütleleri vc temel zemini kütlesinin dahil edilmesi durumunda yapıda oluşan sehimler	97
Şekil 3.8	İçve dış hidrodinamik su kütleleri vc temel zemini kütlesinin dahil edilmesi durumunda yapıda oluşan momentler	98
Şekil 3.9	İçve dış hidrodinamik su kütleleri vc temel zemini kütlesinin dahil edilmesi durumunda yapıda oluşan kesme kuvvetleri	99

TABLO LİSTESİ

		Sayfa
Tablo 2.3.1	Sonsuz uzun kulelerde çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesi	51
Tablo 2.4.1	Yay ve sönüm katsayıları	72
Tablo 2.4.2	a_0 , b_0 , c_0 Katsayıları	76
Tablo 2.4.3	a_i , b_i , c_i Katsayıları	76
Tablo 2.4.4	Briones Barajı'nın deprem davranışı	82
Tablo 2.4.5	Farklı zemin şartları ve H/R oranları için yapının davranışı	83
Tablo 2.4.6	Çeşitli sınır şartları altındaki yapı davranışı	84
Tablo 3.1	Örnek 1 sonuçları	93
Tablo 3.2	Örnek 2 sonuçları	100

ÖNSÖZ

Çalışmamı ortaya koymamda benden destek ve yardımlarını esirgemeyen değerli hocam Sayın Prof. Zekeriya POLAT’a, çok sevgili aileme ve değerli arkadaşlarıma teşekkürü bir borç bilirim.

Saygılarımla

Devrim AKYOL

ÖZET

Bu çalışmada, silindirik kulelere etkiyen hidrodinamik basınçlar için literatürde önerilen çözümler özetlenmiş, yapı ile birlikte hareket ettiği göz önüne alınan çevredeki suyun ek kütlesi için önerilen formüller araştırılmış, bunun için ilk iki modda titreşim yapmaya zorlanan kulelerin dinamikleri üzerine yapılan çalışmalar gözden geçirilmiştir. Silindirik kulelerin modal titreşimlerinin harmonik yer hareketindeki davranışı ile ilgili çalışmalar verilmiş, hidrodinamik çözümlerde yüzey dalgalarının ve suyun sıkışabilirliğinin ihmal edilmesi ile elde edilen davranışların (responses) geçerlilik derecesi ile ilgili görüşlere yer verilmiştir. Hidrodinamik etkileşimin hakim titreşim periyodu üzerindeki etkileri çalışmanın ağırlıklı konularıdır.

Su alma kulelerindeki maksimum deprem kuvvetlerinin doğrudan deprem spektrum tasarımıyla belirlenmesinde kullanılacak literatürde yer alan basitleştirilmiş bir yöntem özetlenmiştir. Kule-su ve kule-temel-su karşı etkileşiminin önemli etkilerinin hepsi analize dahildir. Verilen yöntemlerin hemen tamamında, bu konudaki çalışmaların öncüleri Goyal, A.; Chopra, A. K.; Liaw, C.Y.; Syprakos, C. C. ve Xu, C. gibi araştırmacıların önerdikleri gibi hidrodinamik etkiler içerideki ve çevredeki suyun ek kütle fonksiyonları ile benzeştirilmiştir.

Zemin - yapı - su karşılıklı etkileşiminin etkilerini değerlendiren çalışmalara yer verilmiş, farklı zemin cinsleri ve kule yüksekliği-temel genişliği oranları için kulenin çevresinde ve içerisinde su olup olmaması durumlarına göre yapılan çalışmalar özetlenmiştir.

Son olarak, su içinde bulunmanın yanında, kumlu - siltli zeminleri geçen kazık - köprü ayaklarının dinamik özellikleri ve yer sarsıntısına spektral cevabı, sonlu elemanlar yaklaşımı ile, iki boyutlu olarak, incelenmiştir.

ABSTRACT

Solutions suggested at literature for hydrodynamic pressures on cylindrical towers are summarized. The magnitude of added mass of surrounding water considered to be moving with the structure is studied through literature. A study on the dynamics of towers that are in the first two modes is reviewed.

Expressions for response to harmonic ground motion in individual modes of vibration of cylindrical towers, including interaction with surrounding water, are summarized. The accuracy of responses obtained by ignoring surface waves and compressibility of water in the hydrodynamic solutions is given. The effects of hydrodynamic interaction on the fundamental vibration period are given due to the relevant literatures.

A simplified analysis procedure is summarized to determine the maximum earthquake forces in intake-outlet towers directly from the design earthquake spectrum. All the significant effects of tower-water interaction and tower-foundation-soil interaction are included in the analysis. An example realized using an earthquake direct spectrum in literature, is examined by spectral analysis using Turkish National Earthquake Code (1997), and, the results are compared. After reviewing all the procedures presented in this work, it is noticed that the hydrodynamic effects can be approximated by added mass functions for outside and inside water, as suggested by Goyal, A.; Chopra, A. K.; Liaw, C.Y.; Syrakos, C. C. and Xu, C. in their numerous works [1, 2, 3, 4].

Studies evaluated the effects of soil - structure - water interaction are also summarized in the presence and absence of surrounding and contained water for typical cases of soil conditions and tower height - foundation width ratios.

After summarized the studies that take on the consideration intake-outlet towers, bridge piles and similar water structures - water interaction and dynamic properties of structures and responses to ground motion, dynamic properties and dynamic responses of pile-bridge piles submerged in water at sandy-aluvion soil has been calculated by using summarized ideas and findings.

1. GİRİŞ

Bir akışkan ile temas halinde olan depreme maruz kalmış bir yapıda sıvı-yapı karşı etkileşimi sonucu yapı üzerinde ilave hidrodinamik yükler oluşur. Bu karşılıklı etkileşim yapının dinamik karakteristiklerini de değiştirebilmektedir. Akışkan-yapı karşılıklı etkileşim sistemleri üzerindeki çalışmaların çoğu genellikle iki ayrı problemin süperpozisyonu şeklinde ele alınmaktadır;

- a) Yapının rijit olduğu varsayımı ile, sıvı ile temas halinde olan yapı üzerindeki hidrodinamik basınç elde edilir.
- b) Yapının esnek ve boşlukta olduğu varsayımıyla (su ile etkileşim halinde olmadığı varsayımı) birinci problemde elde edilmiş hidrodinamik yüke maruz kalan yapının cevabi tepkisi incelenir.

İkinci problemde, tabiatıyla, yapının kendi atalet yükleri de gözönünde bulundurulmaktadır. Gerçekte karşılıklı etkileşim problemi çok daha karmaşıktır. Yapı üzerindeki hidrodinamik basınç sadece yapının rijit yer değiştirmesi sonucu oluşmamaktadır. Esnek yapının titreşimleri de ilave hidrodinamik basınç doğurmakta ve bu basınç yapının titreşimlerini etkileyip değiştirmekte ve dolayısı ile hidrodinamik basıncın kendisi de değişmektedir. Sıvı ile karşılıklı etkileşim halinde bulunan bir yapının dinamik analizinde yapıyı çevresindeki sıvıdan ayrı düşünmek gerçeği yansıtmaz. Gerçekte, yapı ve sıvı tüm bir sistem olarak karşı etkileşim analizinde gözönüne alınmalıdır.

Bu çalışmada, su alma kuleleri, köprü ayakları ve benzeri su içi yapıların, su ile karşılıklı etkileşimini dikkatini alarak yapı dinamik özelliklerini ve yer sarsıntısı halinde yapının cevabını inceleyen çalışmalar sistematik bir sıra halinde verildikten sonra; su içinde bulunmak yanında kumlu - siltli zeminleri geçen kazık - köprü ayaklarının dinamik özellikleri ve dinamik cevabının araştırması yapılmaktadır.

2 KAYNAKLARA GÖRE İNCELEMELER

Bu çalışmada; su içindeki yapıların dinamik davranışı ile ilgili olarak günümüze kadar yapılmış bulunan çalışmaların;

- Tarih sırası,
- Hesap parametrelerinin gelişim sırası

dikkate alınarak özetleri yapılmıştır. Özellikle, hidrodinamik etkilerin “ek kütle” yaklaşımı ile yapılan çalışmalar, sade yaklaşımlardan ayrıntılı yaklaşımlara doğru açıklanmıştır.

Yöntem olarak; yukarıda açıklanan esaslarla seçilen ve sıralanan kaynak çalışmaların geniş bir şekilde özetlenmesi, elde edilen sonuçların sıralanıp değerlendirilmesi, konuya ilişkin örnek uygulamalar yapıp, bunların değerlendirilmesi şeklinde bir yol izlenmiştir.



2.1 Su İçindeki Kulelerin Dinamik Özellikleri (1, Chopra, A. K.ve Goyal, A., 1974)

2.1.1 Giriş

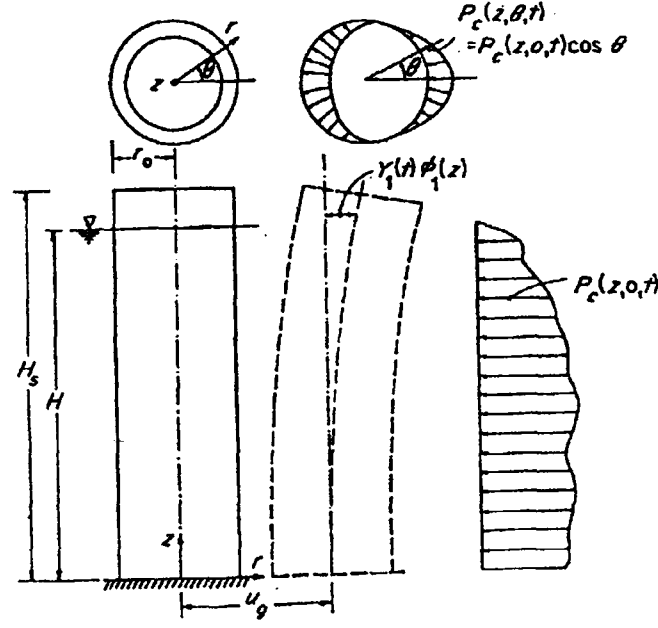
C. Y. Liaw ve A. K. Chopra bu çalışmalarında silindirik kulelere etkiyen hidrodinamik basınçlar ve kulenin (rijit gövdesi ya da deforme olmuş şeklindeki) tavsiye edilen harmonik hareketleri için çözümler elde etmişler, yapı ile birlikte hareket ettiği göz önüne alınan çevredeki suyun ek kütesini araştırmışlar, hidrodinamik etkileşimi içeren ağırlık barajlarının dinamiklikleri ve temel titreşim modundaki kulelerin dinamiklikleri üzerinde çalışarak formül ve kavramlar geliştirmişlerdir. Silindirik kulelerin modal titreşimlerinin harmonik yer hareketindeki davranışı ile ilgili ifadeler verilmiş, hidrodinamik çözümlerde yüzey dalgalarının ve suyun sıkışabilirliğinin ihmal edilmesi ile elde edilen cevapların doğruluğu incelenmiştir. Hidrodinamik etkileşimin hakim titreşim periyodu üzerindeki etkileri ve ilk iki titreşim modunda kulenin dinamiği üzerinde çalışılmıştır.

2.1.2 Kabuller ve temel denklemler

Bu çalışmada, elastik ve planda silindirik bir yapının sürekli bir su ortamında bulunduğu düşünülmüştür. Harmonik temel dalga yükü altında hareket denklemi, suyun sıkışabilirliği ve serbest yüzeydeki dalgaların kulenin dinamik özelliğine etkisi ihmal edilerek açık matematik formunda çözülmüştür.

Bilindiği üzere, kuleler de dahil birçok yapının yatay yer hareketine cevabı, esas olarak temel titreşim moduna bağlıdır. Bu nedenle, öncelikle sadece kulenin temel titreşim modunu dikkate alan kule-su etkileşimi üzerinde çalışılmış, bununla beraber yüksek modlardaki davranışlara da kısmen dikkat çekilmiştir.

Diğer bir varsayım da, yatay yer hareketine maruz lineer elastik dairesel silindirik kulenin düzlemsel titreşim yaptığı kabulüdür. (Şekil 2.1.1)



Şekil 2.1.1 Yatay yer hareketine maruz su içindeki silindirik kule

$\ddot{u}_g(t)$ yer ivmesine maruz susuz ortamdaki bir kulenin temel titreşim modunda titreşim yaptığı farz edilirse, $Y_1(t)$ genelleştirilmiş genliği göstermek üzere hareket denklemi,

$$M_1^* \ddot{Y}_1(t) + C_1^* \dot{Y}_1(t) + K_1^* Y_1(t) = -\ddot{u}_g(t) A_1 - P_{c1}^*(t) \quad (2.1.1)$$

olur. (2.1.1) denklemindeki büyüklükler;

$\phi_1(z)$ = Kulenin susuz ortamdaki temel (birinci) modu,

$m(z)$ = Birim boy kütlesi,

ω_1 = Temel titreşim açısal frekansı

ζ_1 = Sönüm oranı

olmak üzere, aşağıdaki ifadelerle belirlenirler:

$$M_1^* = \int_0^{H_s} m(z) \phi_1(z)^2 dz \quad (2.1.2)$$

$$K_1^* = \omega_1^2 M_1^* \quad (2.1.3)$$

$$C_1^* = 2\zeta_1 \omega_1 M_1^* \quad (2.1.4)$$

$$A_1 = \int_0^{H_s} m(z) \phi_1(z) dz \quad (2.1.5)$$

$P_{c1}^*(t)$, kule dış yüzeyine etkiyen $p_c(\theta, z, t)$ hidrodinamik basıncında ileri gelen kulenin birinci titreşim modundaki genelleştirilmiş basınç yüküdür. Bu radyal basınç, kulenin düzlemsel titreşimi esnasında çevresi boyunca $\cos\theta$ ile değişir.

$$p_c(\theta, z, t) = p_c(0, z, t) \cos \theta \quad (2.1.6)$$

Titreşim düzleminde birim yükseklikteki bileşke hidrodinamik kuvvet,

$$P_c^l(z, t) = \int_0^{2\pi} p_c(\theta, z, t) r_0 \cos \theta d\theta \quad (2.1.7)$$

dir. (2.1.1) denklemindeki P_{c1}^* şu hale gelir;

$$P_{c1}^*(t) = \int_0^H P_c^l(z, t) \phi_1(z) dz \quad (2.1.8)$$

Suyun doğrusal olarak sıkıştığını kabul edip iç viskozitesi ihmal edilerek, küçük öteleme hareketi, silindirik koordinatlarda aşağıdaki dalga denklemi ile ifade edilmiştir. (Şekil 2.1.1)

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} \quad (2.1.9)$$

$p(r, \theta, z, t)$ = Hidrodinamik basınç (Hidrostatik basıncın üstünde oluşan basınç),

C = Su içindeki ses hızı = 1440 m/s

dir. $p_c(\theta, z, t) = p(r_0, \theta, z, t)$ kule dış yüzeyine etki eden çevresel hidrodinamik basınçtır. Suyun her partikülü için aşağıdaki bağıntılar geçerlidir;

$$\left. \begin{aligned} \frac{w}{g} \frac{\partial^2 u^r}{\partial t^2} &= -\frac{\partial p}{\partial r} \\ \frac{w}{g} \frac{\partial^2 u^\theta}{\partial t^2} &= -\frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial \theta} \\ \frac{w}{g} \frac{\partial^2 u^z}{\partial t^2} &= -\frac{\partial p}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.10)$$

Bu ifadelerde;

u^r, u^θ ve u^z = Şekil 2.1.1’de gösterilen koordinat sisteminde, suyun birim yer değiştirmesinin sırasıyla radyal , teğetsel ve dikey bileşenlerini,

ω = Suyun birim hacim ağırlığını,

g = Yer çekimi ivmesini

gösterir. Bu çalışmada sadece silindirik kuleler dikkate alınmıştır. Kulenin rijit, ve su ile temas eden yüzünün dik, rezervuar tabanının yatay, rezervuardaki H su yüksekliğinin sabit olduğu ve ayrıca suyun kulenin bir yönünde sonsuza dek uzandığı kabul edilmiştir. (2.1.9) denklemi ile sınır koşulları (kulenin dış yüzeyi, rezervuar tabanı ve serbest yüzeyi) su sistemine göre problemi tanımlar.

2.1.3 Kompleks frekans davranış ifadeleri

Zamanın lineer invaryant kabul edildiği ortamda, zorlamanın harmonik olması halinde, kararlı titreşimin de, aynı frekansta basit bir harmonik titreşim olduğu Newton Mekaniği’nin bir özelliğidir. Davranışın genliği ve fazı genelde frekansa bağlıdır. Genlik ve fazın frekans bağımlılığı, kompleks frekans davranış fonksiyonu ile ifade edilir. Bir $z(t)$ cevabındaki $\bar{z}(\omega)$ kompleks kısmı, zorlamanın $e^{\zeta\omega t}$ ‘nin gerçel kısmı olduğunda $\bar{z}(\omega)e^{\zeta\omega t}$ ‘nin gerçel kısmı olması özelliği vardır.

Liaw ve Chopra, kulelerin dinamik özelliklerine hidrodinamik etkileşimin etkileri üzerinde çalışırken öncelikle harmonik yer hareketini dikkate almışlar ve kompleks frekans tepki fonksiyonlarını türetmişlerdir.

$\ddot{u}_g(t) = e^{\zeta\omega t}$ harmonik yer ivmesine tepkiler aşağıdaki bağıntılarla açıklanabilir;

$$\left. \begin{aligned}
 &\text{Genelleştirilmiş deplasman} & Y_1(t) &= \bar{Y}_1(\omega) e^{i\omega t} \\
 &\text{Genelleştirilmiş ivme} & \ddot{Y}_1(t) &= \bar{Y}_1(\omega) e^{i\omega t} = -\omega^2 \bar{Y}_1(\omega) e^{i\omega t} \\
 &\theta = 0 \text{ çizgisi boyunca kulenin ivmesi} & \ddot{\theta}(t) &= [1 + \bar{Y}_1(\omega) \phi_1(z)] e^{i\omega t} \\
 &\text{Hidrodinamik basınçlar} & p_c(\theta, z, t) &= \bar{p}_c(\theta, z, \omega) e^{i\omega t}
 \end{aligned} \right\} \quad (2.1.11)$$

Dalga hareketi denkleminde sınır şartları:

(i) $z=0$ 'da düşey hareket yok

$$\frac{\partial p}{\partial z}(r, \theta, 0, t) = 0$$

(ii) Serbest yüzeydeki dalga durumu

$$\frac{\partial^2 p}{\partial t^2}(r, \theta, H, t) = -g \frac{\partial p}{\partial z}(r, \theta, H, t)$$

(iii) $r = r_0$ 'daki hareketin radyal bileşeni kule dış yüzeyinin radyal hareketi ile aynıdır.

$$\frac{\partial p}{\partial r}(r_0, \theta, z, t) = -\frac{w}{g} [1 + \bar{Y}_1(\omega) \phi_1(z)] \cos \theta e^{i\omega t}$$

(iv) $\theta = 0$ düzlemi boyunca simetri durumu

$$\frac{\partial p}{\partial \theta}(r, 0, z, t) = \frac{\partial p}{\partial \theta}(r, \pi, z, t) = 0$$

(2.1.12)

$\bar{p}_c$ 'nin kompleks frekans cevabı şöyle ifade edilebilir:

$$\bar{p}_c(\theta, z, \omega) = \bar{p}_0(\theta, z, \omega) + \bar{Y}_1(\omega) \bar{p}_1(\theta, z, \omega)$$

(2.1.13)

$$p_k(\theta, z, t) = \bar{p}_k(\theta, z, \omega) e^{i\omega t}$$

$k=0$ ve 1 için $r=r_0$ 'da (2.1.9) dalga denkleminin aşağıdaki sınır şartları için çözümüdür.

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial p}{\partial z}(r, \theta, 0, t) &= 0 \\ \frac{\partial^2 p}{\partial t^2}(r, \theta, H, t) &= -g \frac{\partial p}{\partial z}(r, \theta, H, t) \\ \frac{\partial p}{\partial r}(r_0, \theta, z, t) &= -\frac{w}{g} \phi_k(z) \cos \theta e^{i\omega t} \\ \frac{\partial p}{\partial \theta}(r, 0, z, t) &= \frac{\partial p}{\partial \theta}(r, \pi, z, t) = 0 \end{aligned} \right\} \quad (2.1.14)$$

$\bar{p}_0$ ve $\bar{p}_1$ çözümleri sırasıyla, $\phi_0(z)=1$ ve $\phi_1(z)$ hallerine karşı gelir. $\bar{p}_0$; Yer sarsıntısına maruz rijit kulenin yüzeyine etkiyen hidrodinamik basınçların kompleks frekans cevap fonksiyonudur. $\bar{p}_1$; Zorlamanın birinci modda olmasına karşı gelen fonksiyondur.

2.1.4 Yapı davranışı

(2.1.1) ve (2.1.13) denklemlerinden elde edilen genelleştirilmiş modal ivme için kompleks frekans cevap fonksiyonu,

$$\bar{Y}_1(\omega) = \frac{A_1 + B_0(\omega)}{M_1^*[-1 + 2i\zeta_1(\omega_1/\omega) + (\omega_1/\omega)^2] - B_1(\omega)} \quad (2.1.15)$$

dir. Denklemdaki $B_k(\omega)$ ve $p_k^{-1}(z, \omega)$ aşağıdaki bağıntılarla hesaplanır:

$$B_k(\omega) = \int_0^H \bar{p}_k^1(z, \omega) \phi_1(z) dz; \quad k = 0, 1 \quad (2.1.16)$$

$$\bar{p}_k^1(z, \omega) = \int_0^{2\pi} \bar{p}_k(\theta, z, \omega) r_0 \cos \theta d\theta \quad (2.1.17)$$

2.1.5 Hidrodinamik çözümler

(2.1.14) sınır şartları için $\bar{p}_0$ ve $\bar{p}_1$ kararlı titreşim çözümleri aşağıdaki ifade ile verilmiştir:

$$\begin{aligned}
\bar{p}_k(\theta, z, \omega) = & 8 \frac{w}{g} \left\{ -\frac{\alpha_0}{\lambda_0} \frac{I_{k0}}{2\alpha_0 H + \sinh(2\alpha_0 H)} D_0(\lambda_0, r_0) \cosh(\alpha_0 z) e^{i\epsilon_0 r_0} \right. \\
& - \sum_{m=1}^{m_1-1} \frac{\alpha_m}{\lambda_m} \frac{I_{km}}{2\alpha_m H + \sin(2\alpha_m H)} D_m(\lambda_m, r_0) \cos(\alpha_m z) e^{i\epsilon_m r_0} \\
& \left. + \sum_{m=m_1}^{\infty} \frac{\alpha_m}{\lambda'_m} \frac{I_{km}}{2\alpha_m H + \sin(2\alpha_m H)} E_m(\lambda'_m, r_0) \cos(\alpha_m z) \right\} \cos \theta
\end{aligned} \tag{2.1.18}$$

(2.1.18) denkleminde $k=0$ ve 1 değerlerini alır; m_1 ise $\alpha_m > \omega/c$ için en küçük tam sayı değeridir; $m_1 = 1$ için serinin birinci terimleri düşer. α_0 ve α_m aşağıdaki bağıntıların çözümünden elde edilir:

$$\left. \begin{aligned} \alpha_0 \tanh(\alpha_0 H) &= \frac{\omega^2}{g} \\ \alpha_m \tan(\alpha_m H) &= -\frac{\omega^2}{g} \end{aligned} \right\} \tag{2.1.19}$$

$$\left. \begin{aligned} \lambda_0 &= \sqrt{\left(\frac{\omega^2}{C^2} + \alpha_0^2\right)} \\ \lambda_m &= \sqrt{\left(\frac{\omega^2}{C^2} - \alpha_m^2\right)} \\ \lambda'_m &= i\lambda_m \\ I_{k0} &= \int_0^H \phi_k(z) \cosh(\alpha_0 z) dz \\ I_{km} &= \int_0^H \phi_k(z) \cos(\alpha_m z) dz, \quad m = 1, 2, 3, \dots \end{aligned} \right\} \tag{2.1.20}$$

Burada, $\phi(z)=1$ ve $\phi_1(z)$, kulenin susuz ortamda hakim titreşim mod şeklidir.

$$[D_m(\lambda_m, r_0)]^2 = \frac{[J_1(\lambda_m r_0)]^2 + [Y_1(\lambda_m r_0)]^2}{[J_0(\lambda_m r_0) - J_2(\lambda_m r_0)]^2 + [Y_0(\lambda_m r_0) - Y_2(\lambda_m r_0)]^2} \tag{2.1.21}$$

$$E_m(\lambda'_m, r_0) = \frac{K_1(\lambda'_m r_0)}{K_0(\lambda'_m r_0) + K_2(\lambda'_m r_0)} \tag{2.1.22}$$

$$\tan(\epsilon_m r_0) = \frac{[Y_0(\lambda_m r_0) - Y_2(\lambda_m r_0)] J_1(\lambda_m r_0) - [J_0(\lambda_m r_0) - J_2(\lambda_m r_0)] Y_1(\lambda_m r_0)}{[J_0(\lambda_m r_0) - J_2(\lambda_m r_0)] J_1(\lambda_m r_0) + [Y_0(\lambda_m r_0) - Y_2(\lambda_m r_0)] Y_1(\lambda_m r_0)} \quad (2.1.23)$$

(2.1.21) ve (2.1.23) denklemlerinde, J_n ve Y_n sırasıyla n . dereceden birinci ve ikinci mertebe Bessel fonksiyonlarıdır. K_n ise, n . dereceden ikinci mertebe değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur.

Serbest yüzeydeki dalgaların ihmal edilmesi durumunda, serbest yüzeydeki dalga sınır koşulu (2.1.14b) şu şekilde değiştirilmelidir:

$$P(r, \theta, H, t) = 0 \quad (2.1.24)$$

(2.1.14a), (2.1.14c), (2.1.14d) ve (2.1.24) sınır koşullarına göre, $\bar{p}_k$ çözümü; birinci terimin gözükmediği (2.1.18) denkleminin özel bir durumudur; (2.1.19) ifadesi $\text{tg} \alpha_m H = 0$ halini alır; yani, $\alpha_m = (2m-1)\pi/2H$ olur.

$$\bar{p}_k(\theta, z, \omega) = 8 \frac{w}{g} \left\{ - \sum_{m=1}^{m_1-1} \frac{I_{km}}{2\lambda_m H} D_m(\lambda_m, r_0) \cos(\alpha_m z) e^{i\epsilon_m r_0} + \sum_{m=m_1}^{\infty} \frac{I_{km}}{2\lambda'_m H} E_m(\lambda'_m, r_0) \cos(\alpha_m z) \right\} \cos \theta \quad (2.1.25)$$

(2.1.18) ve (2.1.25) denklemleri ile verilen $\bar{p}_k$, kompleks değerli bir büyüklüktür ve bu nedenle $\omega > \alpha_m C$ durumu için zorlamalı safhanın dışındadır.

Eğer suyun sıkışabilirliği ihmal edilirse, $\bar{p}_k$ 'nin çözümü daha basit hale getirilebilir. Böylece (2.1.9) temel dalga denklemi Laplace denklemine dönüşür:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \theta^2} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (2.1.26)$$

Suyun sıkışabilirliğinin ihmal edilmesi ile, yüzey dalgalarının önemsenmediği $\bar{p}_k$ çözümü, (2.1.14a), (2.1.14c), (2.1.14d) ve (2.1.24) denklemleriyle tanımlanan sınır koşullarına göre (2.1.24) denklemi kullanılarak ya da (2.1.25) denkleminde $C = \infty$ alınarak elde edilebilir.

$$\bar{p}_k(\theta, z, \omega) = 8 \frac{w}{g} \left\{ \sum_{m=1}^{\infty} \frac{I_{km}}{(2m-1)\pi} E_m(\lambda'_m, r_0) \cos(\alpha_m z) \right\} \cos \theta \quad (2.1.27)$$

Burada, $\lambda'_m = \alpha_m = (2m-1)\pi/2H$ dır. Görüldüğü üzere, $\bar{p}_k$; ω zorlama frekansından bağımsız hale gelmiştir.

2.1.6 Hidrodinamik çözümler - Sınır şartları

r_0/H sonsuza giderken silindirik kule yaklaşımı iki boyutlu doğru eksenli ağırlık barajı problemine yaklaşır. Dolayısıyla, yukarıda verilen çözümler, ağırlık barajları için verilen klasik çözümlere dönüşür.

(2.1.25) ifadesinin çeşitli terimleri için limit değerler, $\bar{p}_k$ ifadesinde yüzey dalgalarının etkisini ihmal ederek, fakat suyun sıkışabilirliğini dikkate alarak, r_0/H 'nin sonsuza yaklaşması halinde, aşağıda verilmiştir:

$$D_m(\lambda_m, r_0) = 1/2, E_m(\lambda_m, r_0) = 1/2, e^{i\epsilon_m r_0} = i$$

$\bar{p}_k$ 'nin ilgili sınır ifadesi ise,

$$\bar{p}_k(0, z, \omega) = \frac{2w}{gH} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{I_{km}}{\lambda'_m} \cos(\alpha_m z)$$

$$\lambda'_m = \sqrt{\left(\alpha_m^2 - \frac{\omega^2}{C^2}\right)} \quad (2.1.28)$$

$$\alpha_m = \frac{(2m-1)\pi}{2H}$$

değerlerini gösterir.

(2.1.28) denkleminde görülmektedir ki, $\bar{p}_k$, suyun $\omega = \alpha_m C$, $m=1,2,3,\dots$, rezonans frekanslarından bağımsızdır.

Buna karşın, simetrik eksenli bir kule üzerindeki hidrodinamik basınçlar, $\bar{p}_k$ (2.1.25), $\omega = \alpha_m C$ dahil tüm ω değerlerine bağlıdır.

Çünkü;

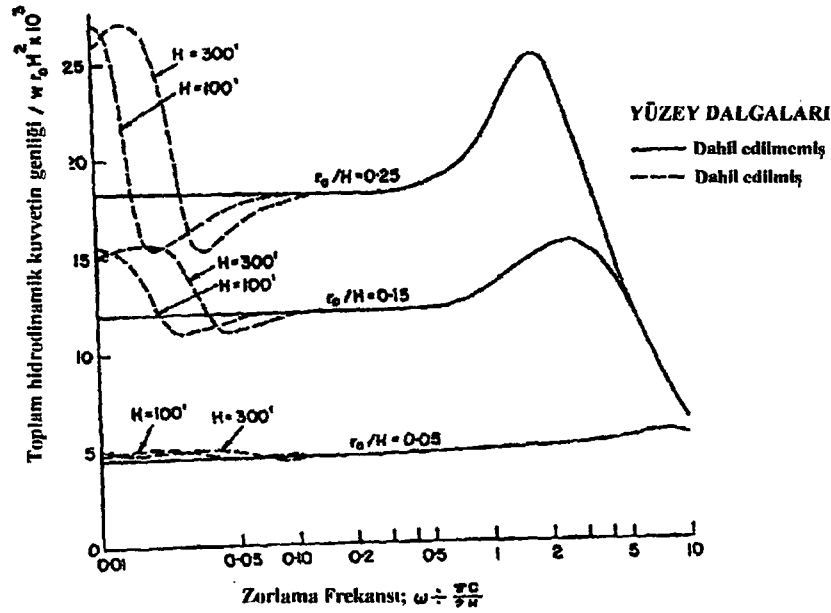
$$\left. \begin{aligned} \lim_{\lambda_m \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\lambda_m r_0} D_m(\lambda_m, r_0) \right] &= -\frac{1}{2} \\ \lim_{\lambda \rightarrow 0} \left[\frac{1}{\lambda'_m r_0} E_m(\lambda'_m, r_0) \right] &= \frac{1}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2.1.29)$$

dir. Bu rezonans bağımsızlığı, kule-su etkileşiminin hidrodinamik incelemesinde önemli yer tutar. Suyun sıkışabilirliğinin ihmalinin kulenin davranışını pratik olarak etkilememesinin başlıca nedenlerinden biridir.

2.1.7 Yüzey dalgalarının etkisi

Yüzey dalgalarının ihmal edilmesi, (2.1.14b) ve (2.1.19) denklemlerinde $g = 0$, ve (2.1.19) denkleminde $\omega = \infty$ alınması anlamına gelir. Bu nedenle yüzey dalgalarının yüksek frekanslardaki tepkilerde hiçbir öneminin olmaması beklenir; ancak, düşük frekanslarda önemli olabilir.

Hidrodinamik kuvvetlerin rijit kule üzerindeki etkileri, frekans bazında, (2.1.18) ve (2.1.25) denklemleri H su yüksekliğince integre ederek, Şekil 2.1.2'de gösterilmiştir. r_0/H hidrodinamik basınçların bağlı olduğu temel bir parametredir. Eğer, yüzey dalgaları ek bir parametreyle dikkate alınır, sonuçlara aynı zamanda H da dahil olur. Yüzey dalgalarının düşük frekanslar dışında hidrodinamik cevaplarda etkili olmadığı görülmektedir. Eğer kulenin temel frekansı, bu düşük yüzey dalga frekanslarına yakın ya da içinde ise, düşük frekanslardaki $\bar{p}_0$ ve $\bar{p}_1$ değerlerine yüzey dalgalarının etkisi (2.1.15), yapısal cevabı önemli derecede etkileyebilir. Bu durum çok nadir olabilir. Çünkü, yapısal frekanslar genelde daha yüksektir. Sonuç olarak, yüzey dalgalarının, su içindeki kulelerin depreme davranışında etkisi küçüktür.



Şekil 2.1.2 Hidrodinamik kuvvetin zorlama frekanslarına bağlı maksimum (genlik) değerleri, rijit kule

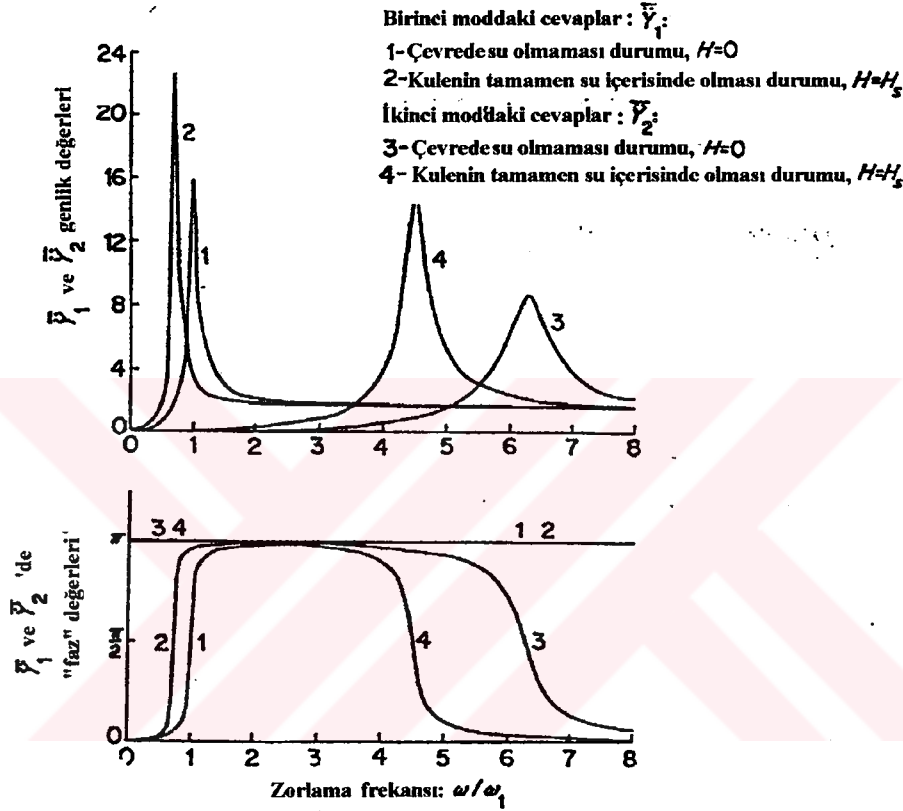
2.1.8 Hidrodinamik etkileşimin başlıca etkileri

Sadece hakim titreşim modunu dikkate alan ve $\phi_1(z)$ mod şekline bağlı olan kulelerin davranışı ile ilgili ifadeler, $-A_1, M_1^*, B_1(\omega)$ (2.1.15) denklemiyle verilmiştir. Eğer, $\phi_1(z)$ yerine $\phi_2(z)$ (ikinci titreşim modunun şekli) getirilip buna göre $A_2, M_2^*, B_2(\omega)$ hesaplanır, ω_1 ve ζ_1 yerine ω_2 ve ζ_2 (sırasıyla ikinci mod frekansı ve sönüm oranı) getirilirse, sadece ikinci titreşim modunu dikkate alan tepkiler (2.1.15)-denkleminde hesaplanabilir.

2.1.9 Kompleks frekans cevapları

Bu çalışmada dış yarıçapının yüksekliğine oranı, $r_0/H = 0.05$ ve 0.25 olan kuleler incelenmektedir. $r_0/H=0.05$, çoğu ince kule için tipik bir değerdir; $r_0/H = 0.25$ ise, r_0/H oranı ile suyun sıkışabilirlik etkilerinin korelasyonunu incelemek için oldukça uç bir değer sayılır. Duvar basıklığının dış yarıçapa oranı, t/r_0 , uygulanmış birçok kule için tipik bir değer olan 0.20 alınmıştır. Suyun sıkışabilirliği dikkate alınırsa, hidrodinamik etkileşim etkileri betonun

E elastiklik modülüne de bağlı olur; suyun sıkışabilirliği ihmal edildiğinde ise, betonun elastiklik modülünden bağımsız kalır. Betonun; elastiklik modülü 34475 Mpa; birim hacim ağırlığı 24.52 kN/m³; modal sönüm oranı 0.05'dir. Titreşim mod şekilleri ve frekansları ise, üniform konsol kirişin titreşiminden elde edilen değerler olarak alınmıştır.



Şekil 2.1.3 $t/r_0=0.2$ ve $r_0/H_s=0.05$ olan ince kulenin frekans oranlarına genelleştirilmiş ivme değerleri (Suyun sıkışabilirliği dahil edilse de edilmese de sonuçlar aynıdır)

İlk iki titreşim modundaki genelleştirilmiş ivmelerin frekans oranlarına (ω/ω_1) bağlı değerleri (2.1.15) ve (2.1.17) denklemlerinden hesaplanmış ve ince kuleler için ($r_0/H_s=0.05$) elde edilen değerler Şekil 2.1.3'de gösterilmiştir.

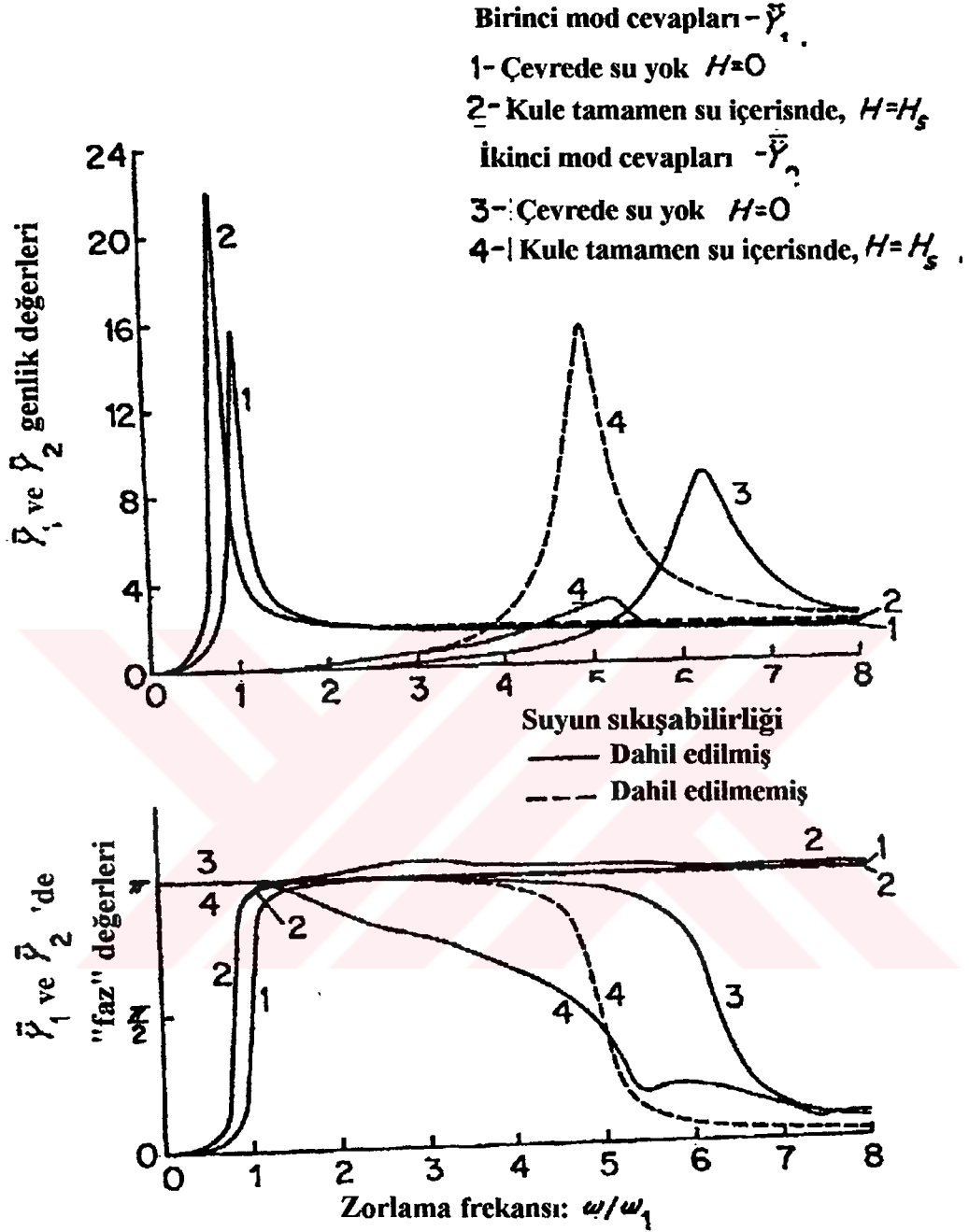
Kuleler tasarlanırken, yapının yüksekliği daima çevredeki suyun maksimum değerinden daha büyük olmasına rağmen, basitlik açısından su derinliği, kule yüksekliğine eşit alınır. Suyun sıkışabilirliği dikkate alınarak, fakat daha önce

de gösterildiği gibi gerçekte hiç bir önemi olmayan yüzey dalgalarının etkisi ihmal edilerek yapının cevabı (2.1.15) denklemi ile, (2.1.25) ile $\bar{p}_k$ hesaplanmıştır.

Çevre suyunun yapının cevabına etkisi iki şekilde kendini gösterir; öncelikle, rezonans frekansı düşer; ikinci olarak ise, modal sönüm oranındaki düşme sonucu yapının cevabı daha dik (keskin) olarak ortaya çıkar.

Suyun sıkışabilirliği ihmal edildiğinde, $\bar{p}_k$ (2.1.27) ve B_k (2.1.15)'nin gerçel değerlerinin zorlama frekansından bağımsız değerler oldukları görülmüştür.

Daha önce yapılmış bir çalışmada dikkate alınan üç durum için basık bir kulenin ($r_0/H_s = 0.25$) ilk iki titreşim modunda genelleştirilmiş ivmenin frekansa bağlı genlikleri Şekil 2.1.4'de gösterilmiştir. Hidrodinamik etkileşimin birinci moddaki cevap üzerindeki etkileri, ince kule için yukarıda tartışılanlarla genelde aynıdır. Suyun sıkışabilirliğinin, basık kulelerin davranışında, ince kulelerin davranışına oranla etkisi daha fazladır. Basık kuleler için, suyun sıkışabilirliğinin birinci mod cevabı üzerindeki etkileri, ihmal edilebilecek kadar küçüktür. Çevredeki su, kulenin basık olması durumunda ikinci modda cevabı oldukça farklı şekilde etkiler.

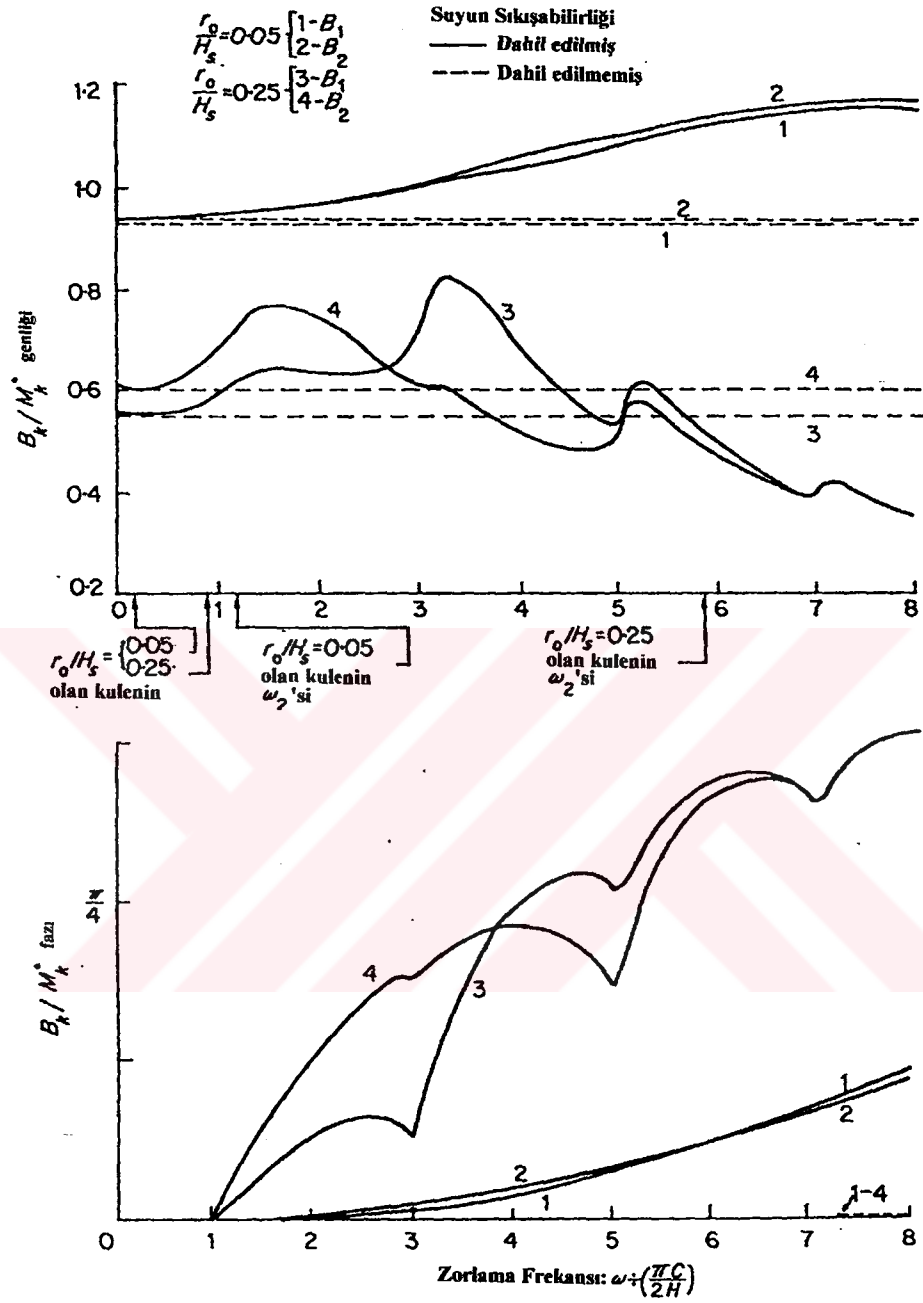


Şekil 2.1.4 $t/r_0=0.20$ olan basık kulelerin ($r_0/H_s = 0.25$) frekansa bağlı cevapları

İlk olarak hidrodinamik etkileşim, ince kulelerde gözlemlenen rezonans frekansında önemli bir azalma meydana getirmez. İkinci olarak suyun sıkışabilirliği, özellikle rezonans frekansı yakınında, cevabın şiddetli sönümlenmesine neden olur.

Basık kulelerin daha yüksek modlardaki davranışında suyun sıkışabilirliği ve hidrodinamik etkileşimden dolayı oluşan farklı etkilerin nedenlerini açıklamaya yardımcı olacak $B_k(\omega)$ fonksiyonları, Şekil 2.1.5’de gösterilmiştir. $B_k(\omega)$ fazı sıfırdır. Yani, $B_k(\omega)$ suyun sıkışabilirliği dikkate alınsa da alınmasa da, $\pi C/2H$ ’dan küçük ω zorlama frekansları için gerçek değerlidir.





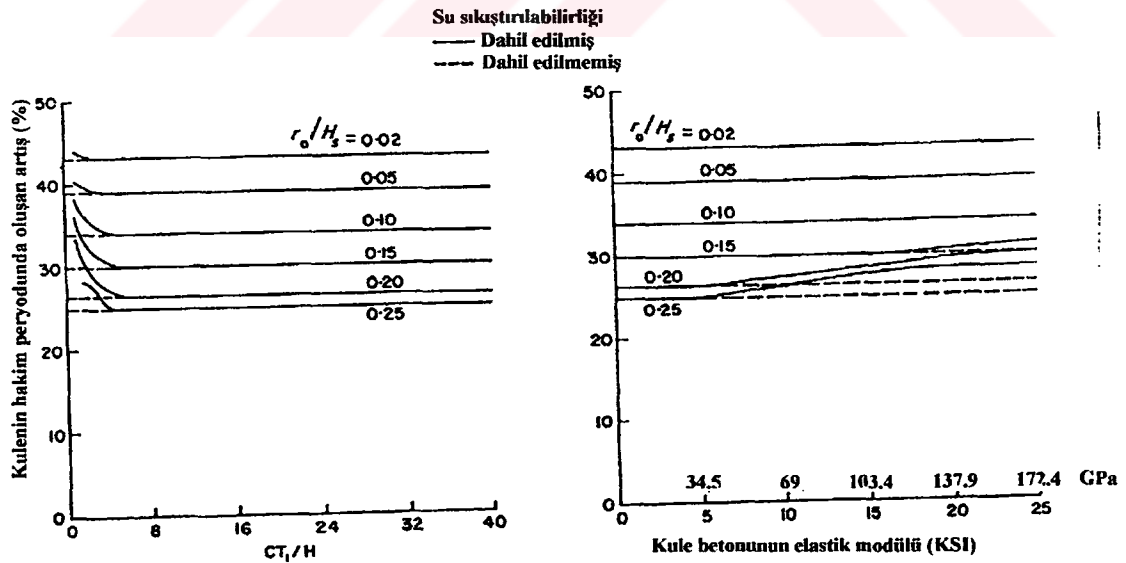
Şekil 2.1.5 $B_k(\omega)$ fonksiyonları üzerinde suyun sıkışabilirliğinin etkileri

2.1.10 Hakim titreşim periyodu

Bir sistemin deprem hareketine cevabına etki eden en önemli özelliklerinden biri o sistemin hakim titreşim periyodudur. Çevrede hiç su olmaması durumundaki T_1 'e nispetle çevredeki suyun kule yüksekliğine eşit olduğu

durumdaki $\tilde{T}_1$ peryodundaki değişiklik rezonans frekans cevap fonksiyonlarının hesaplanması ve rezonans frekansındaki değişikliğin değerlendirilmesi ile elde edilmiştir.

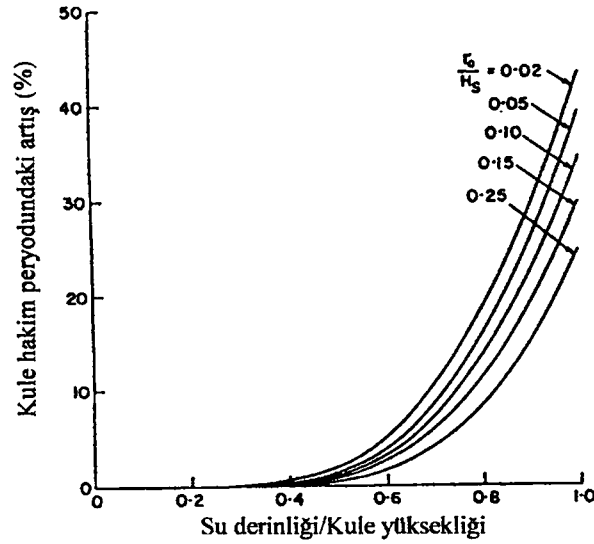
Yapısal davranışla ilgili (2.1.15) ve hidrodinamik basınçlarla ilgili ifadeler (2.1.25 ve 2.1.2 denklemleri) incelendiğinde, hidrodinamik etkileşimde suyun sıkışabilirliğini kontrol eden temel parametrenin CT_1/H (çevresinde su olmayan kulenin titreşim peryodunu içeren boyutsuz bir parametre) olduğu anlaşılır. Burada, C sudaki ses hızı, H da çevredeki suyun derinliğini göstermektedir. Çevredeki su yüzünden oluşan hakim rezonans peryodundaki bağıl değişiklik, r_0/H oranının geniş bir dizisi için, bu boyutsuz parametrenin bir fonksiyonu olarak, şekil 2.1.6a'da gösterilmiştir. Buradan şöyle bir sonuç çıkarılabilir: Eğer, $CT_1/H < 4$ ise, suyun sıkışabilirliği temel rezonans frekansını etkiler. Bir önceki sonuçların [şekil 2.1.6a], kulenin elastiklik modülünün bir fonksiyonu olarak gösterildiği şekil 2.1.6b'den, suyun sıkışabilirliğinin betonarme kulelerin elastiklik modülünün pratik değerleri için hiç bir etkisinin olmadığı açıkça görölmektedir. Bu netice, gerçek kulelerin r_0/H_s değerlerininin geniş bir dizisine uygulanır.



şekil 2.1.6 Kule yüksekliğine eşit çevredeki sudan dolayı kulenin hakim titreşim peryodunda oluşan artış

Şekil 2.1.6’da verilen sonuçlar, çevre suyu derinliğinin kule yüksekliğine eşit olması hali içindi. Kısmen dolu rezervuarlar için de benzer hesaplar yapılabilir. Bu amaçla yapılan sayısal çözümlerle üretilen sonuçlar Şekil 2.1.7’de “ r_0/H_s ” ve “çevre su derinliği/kule yüksekliği”nin fonksiyonu olarak çizilmiştir. Yukarıdaki sonuçlara dayanarak suyun sıkıştırılmaz olduğu kabul edilmiştir. Bu kabuller altında elde edilen sonuçlar, elastiklik modülünün bütün değerlerine uygulanır. Sonuçlar gösteriyor ki:

- (a) Rezervuarı dolu bir kulenin temel titreşim periyodunda çevredeki su ile etkileşimden dolayı % 25’den daha fazla bir artış meydana gelir;
- (b) H / H_s ’nin 0.80’den 0.90’a kadarki çok karşılaşılan değerleri için, birinci periyotlardaki artış, r_0/H_s oranına bağlı olarak, %10 ile %30 arasında değişir;
- (c) Periyod artışı, H / H_s ’nin 0,5’den küçük değerleri için ihmal edilebilir mertebelerdedir;
- (d) Titreşim periyodundaki artış, narin kuleler için daha fazladır.



Şekil 2.1.7 Kulenin hakim titreşim periyoduna çevredeki suyun katkısı

2.1.11 Ek kütle kavramı

Yukarıda açıklanan sonuçların en önemli neticesi, su ile karşı etkileşimde bulunan kulelerin dinamik özelliklerini incelerken suyun sıkışabilirliğinin ihmal edilebilmesidir. Sonuç olarak, $B_k(\omega)$ frekans bağımlı fonksiyonları, $\omega = 0$ 'daki fonksiyonun değerine eşit sabitlerle değiştirilebilir; yani, $B_k(\omega) = B_k(0)$ 'dır. Şu halde, modal titreşim hareketi denklemi, doğrudan yazılabilir:

$$[M_1^* + B_1] \ddot{Y}_1(t) + 2M_1^* \zeta_1 \omega_1 \dot{Y}_1(t) + \omega_1^2 M_1^* Y_1(t) = -[A + B_0] \ddot{u}_g(t) \quad (2.1.30)$$

Sadelik için, $B_k(0)$, B_k olarak gösterilmiştir. Hidrodinamik etkileşim etkileri, B_1 “ek kütle”ne ve B_0 “ek zorlama”sına eşdeğer alınabilir. (2.1.16) denkleminde,

$$B_k = \int_0^H p_k^l(z) \phi_k(z) dz, \quad k = 0, 1 \quad (2.1.31)$$

yazılabilir; $p_k^l(z)$ ise, (2.1.17) ve (2.1.27) denklemlerinden,

$$p_k^l(z) = \frac{8w}{g} r_0 \sum_{m=1}^{\infty} \frac{I_{km}}{(2m-1)} E_m(\lambda'_m, r_0) \cos(\alpha_m z) \quad (2.1.32)$$

olarak elde edilir. $\lambda'_m = \alpha_m = (2m - 1)\pi/2H$ ve I_{km} (2.1.20) ifadesi ile tanımlanmıştır.

Kulenin hidrodinamik etkileşimini içeren $\tilde{T}_1$ titreşim periyodu ve $\tilde{\zeta}_1$ sönüm oranı, çevre suyu bulunmaması durumundaki T_1 ve ζ_1 değerlerine bağlı olarak, aşağıdaki gibi ifade edilebilir:

$$\frac{T_1}{\tilde{T}_1} = \frac{\zeta_1}{\tilde{\zeta}_1} = \frac{1}{\sqrt{[1 + (B_1/M_1^*)]}} \quad (2.1.33)$$

Çevredeki su, yapının titreşim periyodunun uzamasını ve sönümleme oranının azalmasını sağlayan bir etkiye sahiptir. (Şekil 2.1.7)

Birinci titreşim modundaki kulelerin dinamiklikleri üzerine çevredeki suyun etkileri, tam olarak ve doğrudan,

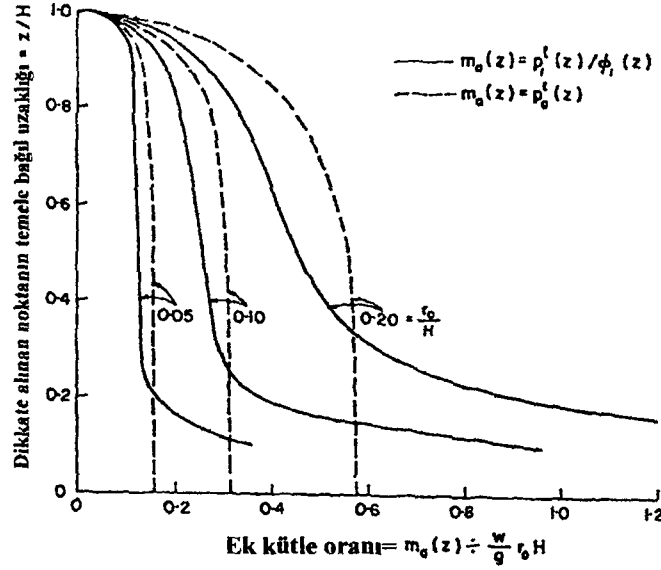
$$m_a(z) = \frac{p'_1(z)}{\phi_1(z)} \quad (2.1.34)$$

şeklinde, kulenin yüksekliğince ek bir kütle dikkate alınarak ifade edilebilir. $\phi_n(z)$ modunda titreşim yapan su içindeki kulenin kütle dağılımı,

$$\tilde{m}(z) = m(z) + m_a(z) \quad (2.1.35)$$

ile ifade edilebilir.

$m_a(z)$, $\phi_1(z)$ mod şeklinde titreşime zorlanan kulenin birim yükseklikteki ek kütlesidir ve (2.1.34) ifadesinden elde edilir. Ek kütle, göz önüne alınan kulenin $\phi_k(z)$ titreşim modunun şekline göre değişir.



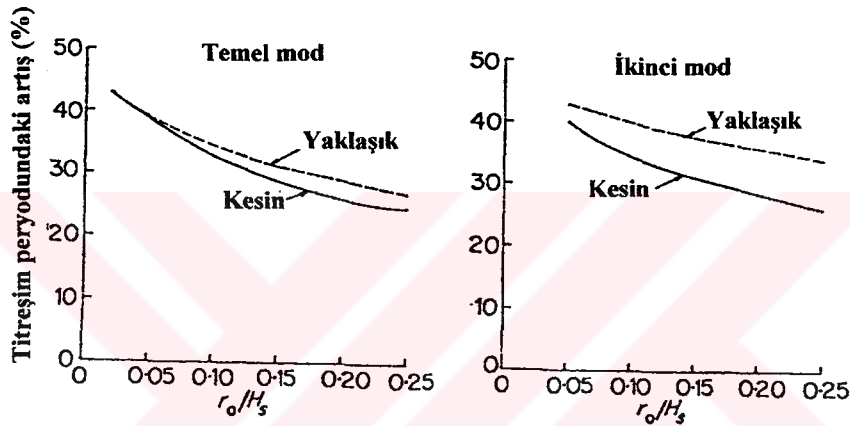
Şekil 2.1.8 Ek kütle dağılımlarının karşılaştırılması

Yapı ile etkileşim halinde bulunan suyun atalet etkisini temsil eden ek kütle kavramı, klasik hidrodinamik problemleri, gemi titreşimi, barajlar üzerine deprem etkileri...gibi konuları içeren birçok farklı duruma uygulanmıştır. Bu önceki araştırmalarda yapının rijit olduğu kabul edilmiş, titreşim yapan yapı üzerindeki hidrodinamik basınçlar üreten bir ek kütle hesaplanmıştır. Kuleler için bu ek kütle;

$$m_a(z) \approx p_0^l(z) \quad (2.1.36)$$

ile ifade edilir. $p_0^l(z)$, (2.1.32) denkleminde elde edilir. Bu ek kütle ile ilgili birinci moddaki $\int_0^H m_a(z) \phi_1(z) dz$ genelleştirilmiş ek yük ifadesi B_0 'a eşittir; fakat, $\int_0^H m_a(z) \phi_1(z)^2 dz$ genelleştirilmiş ek kütlesi B_1 'e tam olarak eşit değildir. Sonuç olarak, (2.1.36) denkleminde tanımlanan ek kütle, hidrodinamik etkileri yaklaşık olarak temsil etmektedir. Yukarıda açıklandığı üzere toplam kütlesi, (2.1.36) denklemi ile tanımlanan ek kütle ile gerçek kütlelerinin toplamına eşit olan susuz ortamdaki kulenin hareket denklemi, çevredeki suyun etkilerini içeren kulenin dinamik özelliklerine bağlı değildir. Bu nedenle, (2.1.36) ek kütle denkleminin, hidrodinamik etkileri ne derecede temsil edip etmediği araştırılmıştır. Şekil 2.1.8'de, üniform kesitli r_0 / H oranları farklı kulelerin

birinci mod için (2.1.34) denklemiyle hesaplanan “kesin” ek kütle değerleri ve (2.1.36) denklemiyle hesaplanan “yaklaşık” ek kütle değerlerinin bir karşılaştırması yapılmış, Şekil 2.1.9’da da, yaklaşık hesapla yapılan hatanın derecesini anlamak amacıyla “kesin” ve “yaklaşık” hidrodinamik ek kütle değerlerinden oluşan eğriler gösterilmiştir. Birinci mod için temel titreşim periyodunda %3’ten daha az bir hata payı olduğu görülmektedir. İkinci mod periyodundaki hatalar daha yüksek olmakla beraber aşırı değildir. Hatalar yüksek modlara gidildikçe artmaktadır.



Şekil 2.1.9 “Yaklaşık ek kütle” ile yapılan hata oranları

Sonuç olarak, kulelerin dinamik özelliklerine çevredeki suyun etkileri, yükseklik boyunca dağılan ek kütle $m_a(z) = p_0^l(z)$ ile yaklaşık olarak temsil edilebilir. Kulenin $\tilde{m}(z)$ toplam kütlesi, basitçe $m(z)$ kulenin kendi kütlesi ve $m_a(z)$ suyun ek kütlelerinin toplamıdır. $m_a(z)$; r_0/H oranı değerleri için (2.1.36) denkleminde hesaplanır. Giderek incelen değişken kesitli kulenin yüksekliği boyunca, yapının temel üstündeki herhangi bir bölgesinde ek kütle, $r_0/H=r_0(z)/H$ için, bu bölge ile ilgili eğriden hesaplanabilir. Basit bir şekilde elde edilen bu yaklaşık değer, giderek incelen kuleleri çeviren sıvı bölgeleri için, Laplace denkleminde bulunan sonlu eleman analizine dayanan gerçek sonuçlara uymaktadır.

Bu şekilde oluşan itibari kütleli kulenin deprem cevabı, standart mod süperpozisyon yöntemleriyle analiz edilebilir. Bununla beraber, belirgin biçimde sadece birkaç ilk titreşim modu böyle bir analize dahil edilebilir. Temel moddan daha yüksek modlardaki cevaplar, bir başka deyimle yüksek modlardaki cevaplar, yukarıda belirtilen ek kütle yaklaşımındaki hatalardan dolayı, önemli derecede yanılığa sebep olabilir.

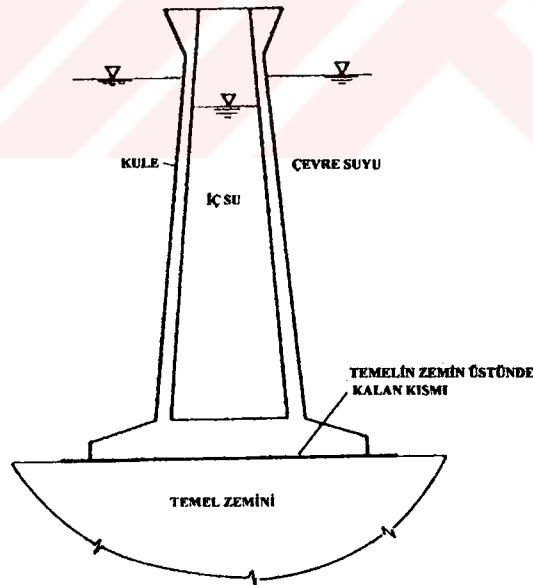


2.2 Su Alma Kulelerinin Değişken Kesitli Olması Hali (2, Goyal, A.ve Chopra, A. K., 1989)

2.2.1 Giriş

Goyal ve Chopra, 1989 tarihli bu çalışmalarında, 2.1. bölümde geniş bir özeti verilen çalışmayı, gerek temel koşulları, gerekse yapının değişken kesitli olması hallerini dikkate alarak genelleştirmişlerdir. Aşağıda bu çalışmanın geniş bir özeti verilmiştir.

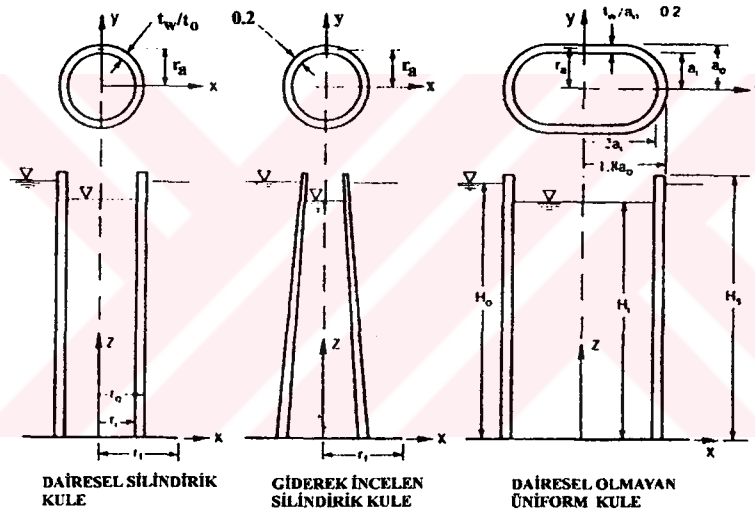
Parametrik çözümlerde örnek alınan kule yapısı, iki eksene göre simetriktir. Bu, deprem hareketinin yatay bileşenlerinin yapıda neden olduğu eşdeğer yatay kuvvetlerin de simetri düzlemlerinde alınabileceği anlamına gelir. Temelin zemin üstünde kalan kısmının rijit, zemin içerisinde kalan kısmının ise elastik yarı sonsuz ortamda olduğu kabul edilmiştir (Şekil 2.2.1). Bu kabul, zemin yüzeyine oturan ya da pratikte çok karşılaşılan temelleri zemine hafifçe gömülü yapılarda geçerlidir.



Şekil 2.2.1 İdealize edilmiş kule - su - temel - zemin sistemi

Davranış sonuçları, üç farklı geometrideki kuleler için hesaplanmıştır: dairesel silindirik kuleler, dairesel kesitli giderek incelen (değişken

elevasyonlu) kuleler, ve enine kesiti dairesel olmayan kuleler. Dairesel silindirik kuleler için (Şekil 2.2.2a) kule yüksekliğinin ortalama yarıçapa oranının (H_s/r_a) hesaplarda dikkate alınan değerleri 20, 10 ve 5'dir. İç yarıçapın, dış yarıçapa oranı, r_i/r_o , 0.8'e; duvar kalınlığı, t_w , $0.2 r_o$ 'ya eşit alınmıştır. Enine kesiti dairesel, giderek incelen kuleler için (Şekil 2.2.2b), kulenin tepesindeki iç ve dış yarıçap, kulenin tabanındaki iç ve dış yarıçapın yarısına eşit alınmıştır. İç ve dış yarıçap yükseklik boyunca doğrusal olarak değişmektedir. Enine kesiti dairesel olmayan ve $H_s/r_a = 20$ olan üniform bir kulenin (Şekil 2.2.2c) davranışları, iki simetri eksenini boyunca ayrı ayrı uygulanan yer hareketine göre hesaplanmıştır.



Şekil 2.2.2 İdealize edilmiş üç değişik kule

Dikkate alınan bütün kulelerin Young modülü $E_s = 31000$ MPa birim hacim ağırlığı 25 kN/m^3 , Poisson oranı $= 0.1$ 'dir. Donatının elastisite modülü üzerindeki etkisi ihmal edilmiştir. Beton kulenin histeretik enerji yutma özelliği $\eta_s = 0.1$ sabit sönüm katsayısıyla temsil edilmiştir. Bu değer rijit zemine oturan kulenin bütün modları için viskoz sönüm oranının 0.05 alınmasına karşı gelir. Kulenin çevresindeki su sabit yükseklikte ve radyal doğrultuda sonsuz genişlikte bir akışkan ortam olarak idealize edilmiştir.

Deprem ivmeleri, $\ddot{u}_g(t)$, kule planının simetri düzlemlerinde ve yatay alınmıştır. Kulelerin davranışı aşağıdaki durumlar için araştırılmıştır:

- Kule susuz ortamdadır ($H_0/H_s = 0$, $H_i/H_s=0$);
- Kulenin sadece çevresinde su vardır ($H_0/H_s = 1$, $H_i/H_s = 0$);
- Kulenin hem içerisinde hem de çevresinde su vardır ($H_0/H_s = 1$, $H_i/H_s=1$).

2.2.2 Kulelerin modal davranışı

Kule, kesme deformasyonlarının ve eğilme ataletinin etkilerini içeren bir boyutlu Timoshenko kirişi olarak idealleştirilmiştir. Kule deformasyonları sonucunda ortaya çıkan $\theta(z,t)$ kule ekseninin dönmeleri, ve $u(z,t)$ yanal yer değiştirmeleri,

$$u(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \phi_n(z) Y_n(t) \quad (2.2.1a)$$

$$\theta(z,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \psi_n(z) Y_n(t) \quad (2.2.1b)$$

formülleri ile ifade edilebilir.

$Y_n(t)$ = n. modda titreşim yapan kulede oluşan dönme ve yanal yer değiştirmeleri içeren $\phi_n(z)$ ve $\psi_n(z)$ fonksiyonları ile tanımlanan ilgili genelleştirilmiş (modal) koordinatdır. Deprem davranış spektrumunun ivme (ya da hız) kontrollü bölgelerinde su alma kulelerinin davranışına sadece titreşim modlarının ilk ikisinin katkısını dikkate almak yeterlidir. Kulenin n. modundaki deplasmanlar,

$$u(z,t) = \phi_n(z) Y_n(t) \quad (2.2.2a)$$

$$\theta(z,t) = \psi_n(z) Y_n(t) \quad (2.2.2b)$$

dir. Susuz ortamda $\ddot{u}_g(t) = e^{i\omega t}$ harmonik yer ivmesiyle n. modda titreşim yapmaya zorlanan ankastre temelli kulenin hareket denklemi, ilgili modal

koordinatın $\tilde{Y}_n(\omega)$.frekans cevap fonksiyonuna göre yazıldığında, aşağıdaki hali alır:

$$[-\omega^2 M_n + (1 + i\eta_s)\omega_n^2 M_n]\tilde{Y}_n(\omega) = -L_n \quad (2.2.3)$$

$\omega_n = n$. doğal titreşim frekansı, $\eta_s =$ Sabit histeretik sönüm katsayısıdır ve ξ_n sönüm oranı ile doğrudan ilişkilidir (genellikle $\eta_s=2\xi_n$ 'dir). M_n genelleştirilmiş kütle, L_n de genelleştirilmiş zorlama terimidir ve şu bağıntılarla ifade edilirler;

$$M_n = \int_0^{H_s} m_s(z)|\phi_n(z)|^2 dz + \int_0^{H_s} I_s(z)|\psi_n(z)|^2 dz \quad (2.2.4)$$

$$L_n = \int_0^{H_s} m_s(z)\phi_n(z)dz \quad (2.2.5)$$

Bu ifadelerde, $m_s(z)$ ve $I_s(z)$, = Sırasıyla, kulenin birim yüksekliğindeki kütle ve kütle atalet momenti, $H_s =$ Kulenin yüksekliğidir.

(2.2.3) denkleminde frekans alanındaki $\tilde{Y}_n(\omega)$ modal koordinatları elde edilir:

$$\tilde{Y}_n(\omega) = \frac{-L_n}{M_n[-\omega^2 + (1 + i\eta_s)\omega_n^2]} \quad (2.2.6)$$

(2.2.6) denklemi kullanılarak belirli bir yer hareketi için modal koordinatların zamana bağlı değerleri hesaplanabilir. Zamana bağlı yer değiştirmeler (2.2.2a) ve (2.2.2b) denklemleri; yapıda oluşan kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri ise $Y_n(t)$ fonksiyonları kullanılarak ifade edilebilir. Ayrıca, bunların maksimum değerleri herhangi bir deprem için spektrum eğrileri kullanılarak doğrudan hesaplanabilir.

Ankastre temelli, susuz ortamda bulunan kulelerin titreşim frekanslarındaki dönme ataleti ve kesme deformasyonlarının etkisi, artan mod sayısı ile artar. Narinlik oranındaki azalma ve bu iki etkiden dolayı frekanslarda oluşan değişimin dörtte üçünden fazlası, kesme deformasyonlarından dolayıdır. Bu

nedenle şöyle bir sonuca varılabilir; Sadece ilk iki titreşim modunun dikkate alındığı kulelerin dinamik analizinde, kesme deformasyonlarının katkısı, kısa kulelerin analizine dahil edilebilir ve yatay yer hareketi esnasında kulede oluşan dönme ataletinin etkisi ihmal edilebilir.

2.2.3 Su içindeki kuleler

2.2.3.1 Kesin tekil mod davranışı

n. modda titreşim yapmaya zorlanan kulenin davranışı ile ilgili (2.2.3) denklemi, sıvı-yapı karşı-etkileşimi sonucu yapı üzerinde oluşan hidrodinamik yüklerin dahil edilmesi ile şu hali alır:

$$[-\omega^2 \bar{M}_n + (1 + i\eta_s)\omega_n^2 M_n] \bar{Y}_n(\omega) = -\bar{L}_n \quad (2.2.7)$$

$$\bar{M}_n = M_n + M_{nn}^o + M_{nn}^i \quad (2.2.8a)$$

$$\bar{L}_n = L_n + L_n^o + L_n^i \quad (2.2.8b)$$

M_n ve L_n (2.2.4) ve (2.2.5) denklemleri ile tanımlanmıştır. n. modda titreşim yapmaya zorlanan kulenin çevresindeki su ile karşılıklı etkileşimden dolayı oluşan M_{nn}^o ek kütlesi ve L_n^o zorlaması aşağıdaki denklemlerle ifade edilir:

$$M_{nn}^o = \int_0^{H_n} \phi_n(z) f_n''(z) dz + \int_0^{H_n} \psi_n(z) m_n''(z) dz \quad (2.2.9)$$

$$L_n^o = \int_0^{H_o} \phi_n(z) f_o''(z) dz + \int_0^{H_o} \psi_n(z) m_o''(z) dz \quad (2.2.10)$$

Bu denklemlerde H_o = Kulenin çevresindeki suyun yüksekliğini, $f_o''(z)$ ve $m_o''(z)$, $\phi_n(z)$ birim yatay yer ivmesi ve kulenin rijit olması halinde, kulenin dış yüzeyinde titreşim düzleminde etki eden hidrodinamik yanal kuvvetler ve dış momentleri gösterir. $f_n''(z)$ ve $m_n''(z)$ ise, $\phi_n(z)$ birim yatay yer ivmesi ve yer hareketinin olmaması durumunda kule ekseninin $\psi_n(z)$ dönme ivmesine karşı gelen fonksiyonlardır. Benzer şekilde, n. modda titreşim yapan kulenin

içindeki sudan dolayı oluşan M_{nn}^0 ek kütlesi ve L_n^i ek zorlama terimi aşağıdaki denklemlerle ifade edilebilir:

$$L_n^i = \int_0^{H_i} \phi_n(z) f_0^i(z) dz + \int_0^{H_i} \psi_n(z) m_0^i(z) dz \quad (2.2.11)$$

$$M_{nn}^i = \int_0^{H_i} \phi_n(z) f_n^i(z) dz + \int_0^{H_i} \psi_n(z) m_n^i(z) dz \quad (2.2.12)$$

Bu denklemlerde, H_i = Kule içindeki suyun yüksekliği, $f_0^i(z)$ ve $m_0^i(z) = \phi_n(z)$ birim yatay yer ivmesi ve kule rijit olduğunda kulenin iç yüzeyindeki titreşim düzlemine etki eden hidrodinamik yanal kuvvetler ve dış momentlerdir. $f_n^i(z)$ ve $m_n^i(z)$, yer hareketi yokken $\phi_n(z)$ yatay ivme ve $\psi_n(z)$ rotasyonel ivme fonksiyonları ile hesaplanan karşılıklı fonksiyonları gösterir.

Kulenin çevresindeki suyun $f_0^o(z)$, $m_0^o(z)$, $f_n^o(z)$ ve $m_n^o(z)$ fonksiyonları ve kulenin içerisindeki suyun $f_0^i(z)$, $m_0^i(z)$, $f_n^i(z)$ ve $m_n^i(z)$ fonksiyonları Laplace denkleminin çözümüyle bulunur.

Giderek incelen pratik kuleler için uygun, üniform kuleler için de tamamen geçerli, hidrodinamik ek kütle ve zorlama ifadelerine (2.2.9, 2.2.10, 2.2.11, 2.2.12 denklemleri), $m_0^o(z)$, $m_n^o(z)$, $m_0^i(z)$ ve $m_n^i(z)$ hidrodinamik moment fonksiyonlarının katkısını ihmal ederek, n. titreşim modundaki kulelerin dinamik özellikleri üzerine çevredeki suyun etkileri,

$$m_a^o(z) = \frac{f_n^o(z)}{\phi_n(z)} \quad (2.2.13)$$

kulenin birim yüksekliğindeki ek kütle olarak dikkate alınmasıyla hesaplanabilir. Benzer şekilde, kulenin n. titreşim modunda içerideki suyun etkileri,

$$m_a^i(z) = \frac{f_n^i(z)}{\phi_n(z)} \quad (2.2.14)$$

kulenin birim yüksekliğindeki ek kütle olarak dikkate alınmasıyla bulunabilir. Hidrodinamik momentlerin olmaması durumunda (2.2.13) ve (2.2.14) denklemleri ile verilen $m_a^0(z)$ ve $m_a^i(z)$ ek kütleleriyle, $\phi_n(z)$ modunda titreşim yapmaya zorlanan kulenin kütle dağılımı,

$$\bar{m}_s(z) = m_s(z) + m_a^0(z) + m_a^i(z) \quad (2.2.15)$$

olarak ifade edilebilir.

2.2.3.2 Hidrodinamik ek kütle

Uzun yıllar boyunca bir yapı ile etkileşim halinde bulunan suyun atalet etkisini temsil eden hidrodinamik ek kütle kavramında, yapının rijit olduğu kabul edilmiştir. Bu kavram, klasik hidrodinamik problemleri, su barajları, su içeren silindirik tanklar ve su ile çevrili silindirik yapılar gibi farklı durumlarda uygulanmıştır. Kulelerde, böyle bir kavram $m_a^0(z)$ ve $m_a^i(z)$ hidrodinamik ek kütleleri için aşağıdaki tanımlamalarla ifade edilir:

$$m_a^0(z) = f_0^0(z) \quad (2.2.16)$$

$$m_a^i(z) = f_0^i(z) \quad (2.2.17)$$

$f_0^0(z)$ ve $f_0^i(z)$ = Birim yatay yer ivmesinden dolayı, rijit kulenin sırasıyla dış ve iç yüzeylerindeki titreşim düzlemine etki eden yanal hidrodinamik kuvvetlerdir. Eğer, hidrodinamik momentler ihmal edilirse, sırasıyla, L_n^0 ve L_n^i 'ye (2.2.10 ve 2.2.12 denklemleri) eşit olduğu gösterilebilen bu ek kütleler ile ilgili n. titreşim modundaki genelleştirilmiş ek zorlama terimleri

$$\int_0^{H_0} m_a^0(z) \phi_n(z) dz \text{ ve } \int_0^{H_i} m_a^i(z) \phi_n(z) dz \text{ olur. Bununla birlikte, (2.2.16) ve (2.2.17)}$$

denklemlerinden elde edilen ek kütleler ile ilgili genelleştirilmiş ek kütle ifadeleri, $\int_0^{H_0} m_a^0(z) \phi_n^2(z) dz$ ve $\int_0^{H_i} m_a^i(z) \phi_n^2(z) dz$, M_{nn}^0 (2.2.9) ve M_{nn}^i (2.2.11)'ye eşit değildirler. Sonuç olarak, (2.2.16) ve (2.2.17) denklemleri ile tanımlanan ek kütleler, hidrodinamik etkileri tam olarak temsil etmemektedirler.

(2.2.16) ve (2.2.17) denklemleri ile elde edilen ek kütlelerin hidrodinamik etkileri ne derecede temsil ettiğini araştırmak için ilk olarak eşdeğer yanal kuvvetlerin dağılımları incelenmiştir. Ankastre temelli kulenin n . titreşim modundaki maksimum davranışla ilgili eşdeğer yanal kuvvetler,

$$f_n(z) = \frac{\bar{L}_n}{\bar{M}_n} S_{an}(T_n^r, \xi_n) \bar{m}_s(z) \phi_n(z) \quad (2.2.18)$$

şeklinde ifade edilebilir. $S_{an}(T_n, \xi_n)$, $\xi_n = \eta_s/2$ sönümlleme oranı ve T_n^r titreşim periyodunda değerlendirilen deprem yer hareketine göre yalancı ivme (pseudo acceleration) davranış spektrum ordinatıdır. $T_n^r = 2\pi/\omega'_n = n$. modda titreşim yapan kulenin suyun etkilerini içeren titreşim periyodudur. $f_n(z)$ eşdeğer yanal kuvvetlerine çevredeki suyun katkısı dahil edildiğinde;

$$[f_n(z)]_{\text{dış}} = \frac{\bar{L}_n}{\bar{M}_n} S_a(T_n^r, \xi_n) m_a^o(z) \phi_n(z) \quad (2.2.19)$$

halini alır.

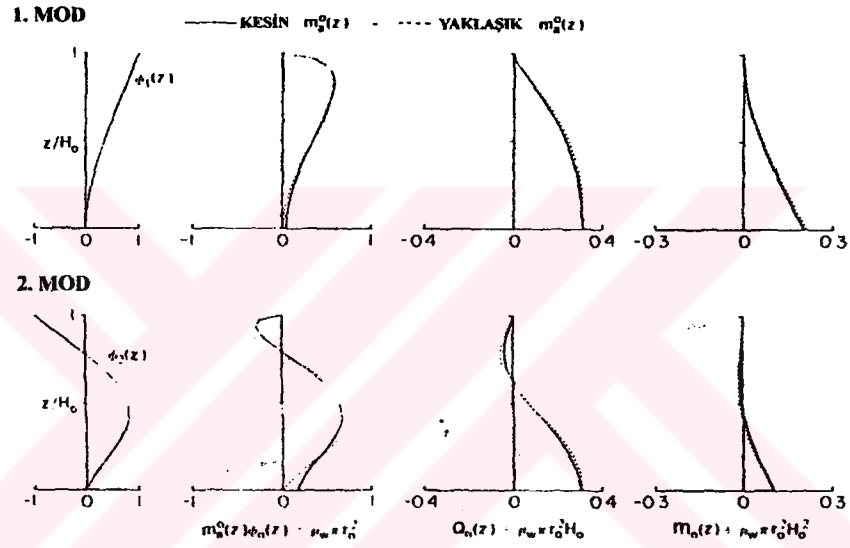
Şekil 2.2.3 'de kulenin çevresindeki suyun $m_a^0(z)$ hidrodinamik ek kütlelerinin, (2.2.13) denkleminde elde edilen kesin değeri ve (2.2.16) denkleminde elde edilen yaklaşık değerlerinin birinci ve ikinci titreşim modlarındaki yanal kuvvetler, kesme kuvvetleri ve eğilme momentine katkısı gösterilmiştir. Ek kütlelerin yükseklik üzerindeki kesin ve yaklaşık dağılımları farklılık göstermekle birlikte integrallerinin, hidrodinamik kuvvetlerin karşılıklı (reciprocity) özelliği kullanılarak eşit olduğu gösterilebilir. İlgili $Q_n(z)$ kesme kuvvetleri ve $M_n(z)$ eğilme momentlerinin dağılımındaki farklılıklar, hem dairesel üniform kulelerde (Şekil 2.2.3), hem de giderek incelen kulelerde H_s/r_a değerlerinin geniş bir aralığında yeterince küçüktür.

Benzer şekilde, n . titreşim modunda $f_n(z)$ (2.2.18) eşdeğer yanal kuvvetlerine içerideki suyun katkısı dahil edildiğinde;

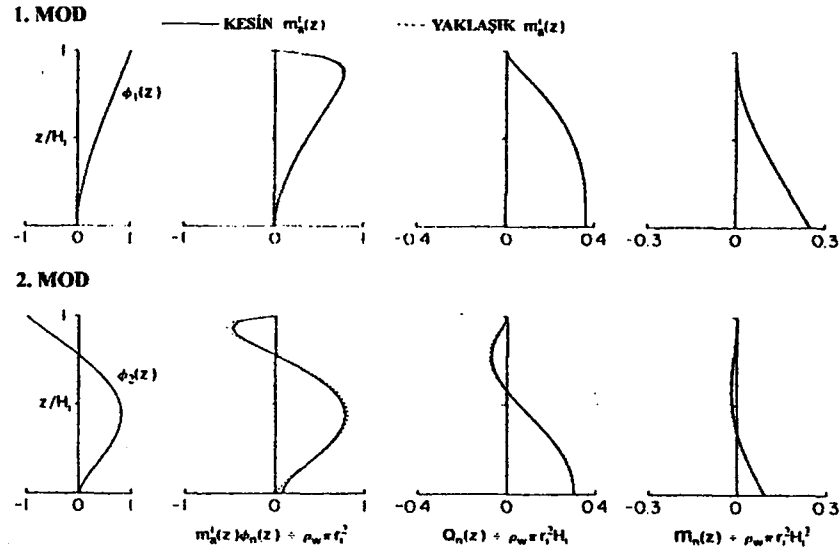
$$[f_n(z)]_{\text{iç}} = \frac{\bar{L}_n}{\bar{M}_n} S_a(T_n^r, \xi_n) m_a^i(z) \phi_n(z) \quad (2.2.20)$$

halini alır.

Şekil 2.2.4’de kulenin içerisindeki suyun $m_a^i(z)$ hidrodinamik ek kütlesinin (2.2.14) denkleminde elde edilen kesin değeri ve (2.2.17) denkleminde elde edilen yaklaşık değerlerinin birinci ve ikinci titreşim modlarındaki yanal kuvvetler, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri dağılımına katkısı gösterilmiştir. Görüldüğü üzere, (2.2.17) denkleminde elde edilen yaklaşık ek kütle, basitleştirilmiş analiz için oldukça doğru sonuçlar (Şekil 2.2.4) üretilmesini sağlamaktadır.



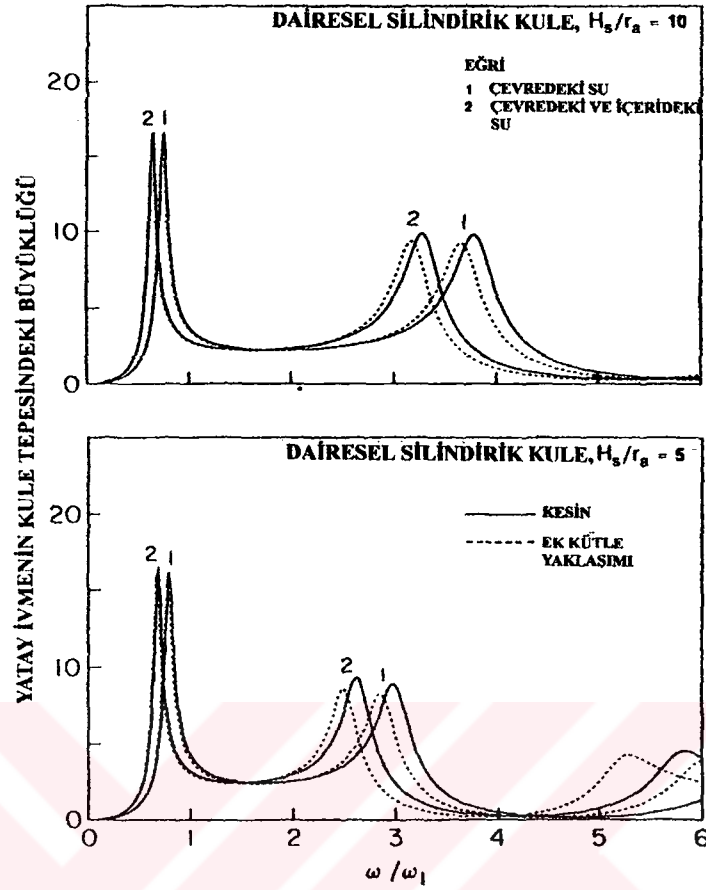
Şekil 2.2.3 Dairesel silindirik kulede yanal kuvvetler, kesme ve kuvvetleri eğilme momentleri dağılımına çevredeki suyun katkısı, ($H_s/r_a = 10$ için)



Şekil 2.2.4 Dairesel silindirik kulede yanal kuvvetler, kesme kuvvetleri ve eğilme momentleri dağılımına içerideki suyun katkısı ($H_s/r_a = 10$ için)

2.2.2.3 Sonuçların Değerlendirilmesi

Şekil 2.2.5’de sadece çevresinde su olan dairesel silindirik kuleler ile hem içerisinde hem de çevresinde su olan dairesel silindirik kulelerin (Şekil 2.2.2a), ω/ω_1 normalize edilmiş zorlama frekansına göre çizilen yatay yer hareketine gösterdikleri kararlı davranışın genliği gösterilmiştir. ω_1 , su olmayan bir ortamda bulunan ankastre temelli kulenin temel titreşim frekansıdır.



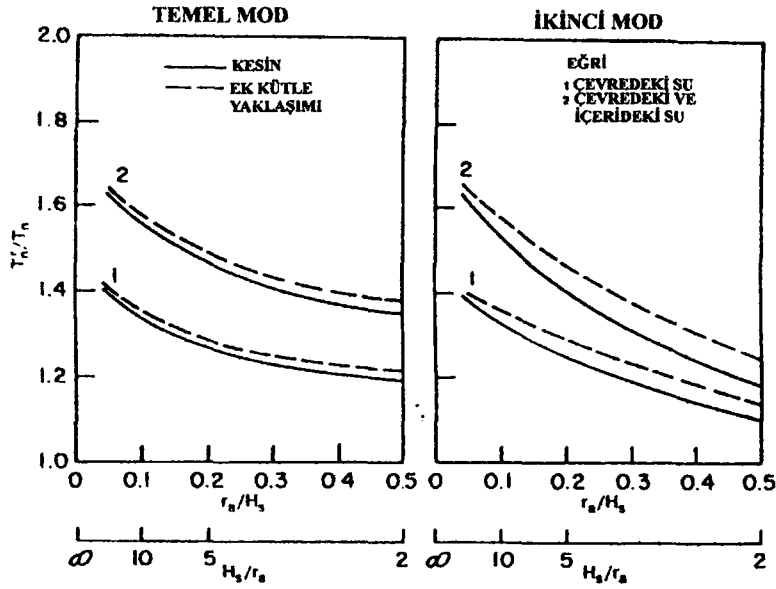
Şekil 2.2.5 Rijit temel zemini üzerine oturan su içerisindeki dairesel silindirik kulelerin harmonik yatay yer hareketinden dolayı oluşan kesin ve yaklaşık davranışlarının (Hidrodinamik etkilerin ek kütle temsili) karşılaştırılması

Şekil (2.2.2b) ve (2.2.2c)'deki kulelerin ek davranış sonuçları da, Goyal ve Chopra (1989b) tarafından açıklanmıştır. Bu sonuçlar;

1. Goyal ve Chopra tarafından tanımlanan kesin analiz,
2. Kütlesi, (2.2.16) ve (2.2.17) denklemlerinden elde edilen hidrodinamik ek kütlelerin gerçek kütle ile toplamına eşit, susuz ortamdaki kulenin analizi

ile elde edilebilir. Ek kütle yaklaşımı ikinci mod rezonans periyodunun tahmin edilmesinde yeterince iyi değildir. Özellikle, kısa kuleler için hata oranı artmaktadır. Bununla birlikte, narinliğin geniş bir aralığında rezonans davranışları ve hidrodinamik etkileri içeren rezonans periyodları için doğruya

yakın sonuçlar elde edilebilir (Şekil 2.2.6).



Şekil 2.2.6 Dairesel silindirik kulelerin analizinde hidrodinamik etkilerin ek kütle yaklaşımı ile temsil edilmesinin değerlendirilmesi; Verilen sonuçlar, rijit temel zemini üzerine oturan, su içerisinde ve su içerisinde olmayan kulelerin peryodları oranıdır

Bu bölümde açıklanan davranış sonuçlarına dayanarak, hidrodinamik etkileşimin, $m_s(z)$ kule kütesinin gerçek değeri yerine (2.2.15) denkleminde elde edilen $\tilde{m}_s(z)$ yerleştirilerek, içerideki su için (2.2.17) denklemini, çevredeki su için de (2.2.16) denklemini ile elde edilen hidrodinamik kütle dağılımlarıyla, kulelerin, davranış spektrum analizine basitçe dahil edilebildiği anlaşılmaktadır.

2.2.4 Elastik Zemine Oturan Kuleler

Elastik zemine oturan binaların ve ağırlık barajlarının davranışı ile ilgili olarak bugüne kadar yapılan çalışmalarda elde edilen başlıca sonuçlar şunlardır:

1. Yapının temel titreşim modundaki yapı–temel etkileşimi sönüm oranı ve titreşim peryodundaki değişikliklerle ifade edilebilir,

2. Daha yüksek titreşim modlarının katkısı, yapı rijit zemin üzerine oturtulmuş gibi düşünülerek yaklaşık olarak hesaplanabilir.

Aynı yaklaşımlar su alma kulelerine de uygulanabilir.

2.2.4.1 Temel mod yanıtının kesin çözümü

Ankastre temelli kulenin birinci mod titreşimi elastik zemine oturan temelin

$\tilde{\theta}_f(\omega)$ dönme ve $\tilde{u}_f(\omega)$ öteleme serbestlik dereceleri ile birlikte gözönüne alındığında, sistemin frekans ve modal koordinatlarının genlikleri,

$$\begin{bmatrix} [-\omega^2 M_1 + (1 + i\eta_1)\omega_1^2 M_1] & -\omega^2 L_1^h & -\omega^2 L_1^* \\ -\omega^2 L_1^h & -\omega^2(m_f + m_t) + K_{vv}(\omega) & -\omega^2 L_0^* + K_{vm}(\omega) \\ -\omega^2 L_1^* & -\omega^2 L_0^* + K_{mv}(\omega) & -\omega^2(I_f + I_t) + K_{mm}(\omega) \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \tilde{Y}_1(\omega) \\ \tilde{u}_f(\omega) \\ \tilde{\theta}_f(\omega) \end{Bmatrix} = - \begin{Bmatrix} L_1 \\ m_f + m_t \\ L_0^* \end{Bmatrix} \quad (2.2.21)$$

denklemleri yardımıyla hesaplanabilir.

Burada, $L_1^h = L_1$,

m_t = Kulenin toplam kütlesi,

I_t = Kule temelinin dönme eksenini etrafındaki kütle atalet momentidir ve temelin zemin üzerindeki bölümünün katkısı da ilave edilmiştir. m_f ve I_f sırasıyla temelin zemin seviyesi altındaki bölümünün kütlesi ve kütle atalet momentidir. Aşağıda bu ifadeler verilmiştir;

$$m_t = \int_0^{H_s} m_s(z) dz \quad (2.2.22)$$

$$I_t = \int_0^{H_s} z^2 m_s(z) dz + \int_0^{H_s} I_s(z) dz \quad (2.2.23)$$

$$L_1^* = \int_0^{H_s} z m_s(z) \phi_1(z) dz + \int_0^{H_s} I_s(z) \psi_1(z) dz \quad (2.2.24)$$

$$L_0' = \int_0^{H_1} z m_s(z) dz \quad (2.2.25)$$

Frekans içerikli $K_{VV}(\omega)$, $K_{MM}(\omega)$, $K_{VM}(\omega)$ [Simetri dolayısıyla $K_{VM}(\omega) = K_{MV}(\omega)$ 'dır.] fonksiyonları, viskoelastik yarı uzay ortamda yatay kuvvet ve harmonik moment sınır değer problemlerinin kule–temel–zemin sistemlerine uygulanmasıyla elde edilir. $Y_1(\omega)$ modal koordinatının frekans davranış fonksiyonu, ω zorlama frekanslarının farklı değerleri için (2.2.21) denkleminin sayısal çözümü ile elde edilebilir. Genelde çok katlı binaların analizinde ihmal edilen, fakat betonarme ağırlık barajlarının analizine dahil edilebilen $K_{VM}(\omega)$ ve $K_{MV}(\omega)$ 'nın etkisi kulelerin temel mod yanıtında önemlidir.

2.2.4.2 Temel mod yanıtının yaklaşık çözümü

Temel–zemin esnekliğinin izin verdiği titreşim hareketi ile ilişkili m_t , I_t ve L_0^r atalet ifadeleri, temel titreşim modunun hesabında da yaklaşık olarak kullanılabilir. $m_t \approx m_1^*$, $L_0^r \approx m_1^* \cdot h_1^*$, ve $I_t = m_1^* \cdot (h_1^*)^2$ 'dir. Burada, $m_1^* = (L_1)^2 / M_1$ ve $h_1^* = L_1^r / L_1$ sırasıyla temel titreşim modundaki kulenin etkili kütlesi ve etkili yüksekliğidir. Bu yaklaşımda (2.2.21) denklemi, m_1^* kütleli, h_1^* yükseklikli, ω_1 ankastre temel frekanslı, bir serbestlik dereceli kulenin η_s histeretik sabit sönüm katsayısı ile söz konusu temel–zemin sistemi üzerindeki kulenin temel mod yanıtını da yansıtır. Bu sebeple, bina–temel sistemleri için geliştirilmiş çözüm yolları bu probleme de uygulanabilir. Sonuçta, eşdeğer sistemin özellikleri zemin–yapı etkileşiminden dolayı kule sönümündeki değişme ve rijitlikte azalma şeklinde ortaya çıkar. Eşdeğer BSD sistemin ω_1^f doğal frekansı şöyle verilebilir:

$$\omega_1^f = \frac{\omega_1}{\sqrt{1 + \text{Re}[F(\omega_1^f)]}} \quad (2.2.26)$$

$$F(\omega) = m_1^* \omega_1^2 \left[\frac{(h_1^*)^2}{K_{MM}(\omega)} + \frac{1}{K_{VV}(\omega)} \right] \quad (2.2.27)$$

ω_1^f , (2.2.26) denkleminin iterasyonu ile elde edilmelidir; $\text{Re}[F(\omega)] > 0$ bütün zorlayıcı titreşim frekansları için 0'dan büyük olduğundan ω_1^f , ω_1 'den küçüktür.

Doğal frekansı ω_1^f ve sabit histeretik sönüm katsayısı η_1^f olan eşdeğer BSD sistemin frekans yanıt fonksiyonu, aşağıdaki şekilde gösterilebilir;

$$\ddot{Y}_1(\omega) = \left[\frac{\omega_1^f}{\omega_1} \right]^2 \frac{-L_1}{-\omega^2 M_1 + (1 + i\eta_1^f)(\omega_1^f)^2 M_1} \quad (2.2.28)$$

η_1^f , aşağıdaki denklemlerin çözümüyle elde edilebilir;

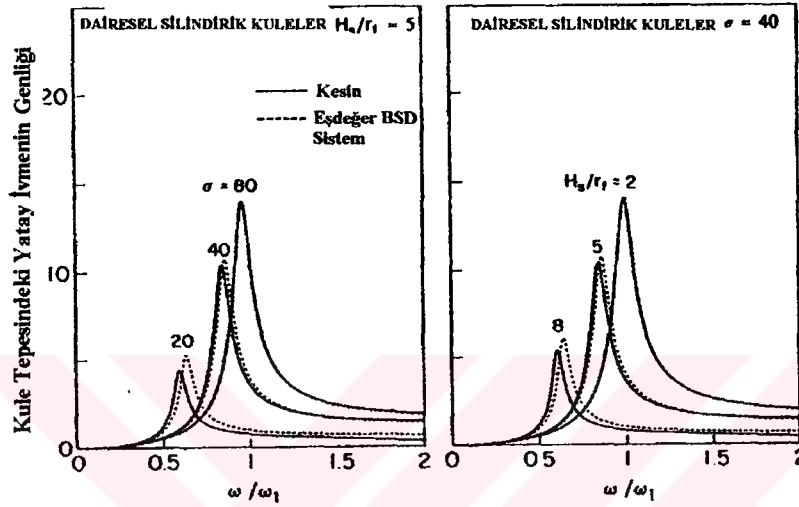
$$\eta_1^f = \left[\frac{\omega_1^f}{\omega_1} \right]^2 \eta_s + \eta_a \quad (2.2.29)$$

$$\eta_a = - \left[\frac{\omega_1^f}{\omega_1} \right]^2 \text{Im} [F(\omega_1^f)] \quad (2.2.30)$$

$\text{Im}[F(\omega)]$, kompleks $F(\omega)$ fonksiyonunun sanal kısmıdır. (2.2.29) denkleminde, sağdaki ilk kısım yapısal sönümlemenin η_1^f 'e katkısını, ikinci kısım da temelden gelen ek sönümlemeyi gösterir. η_a ek sönüm katsayısı daima pozitifdir. Çünkü, bütün zorlayıcı titreşim frekanslarında $\text{Im}[F(\omega)] < 0$ 'dır. ξ_1^f eşdeğer viskoz sönüm oranı η_1^f histeretik sönüm katsayısı ile ilgilidir ve yaklaşık olarak $\xi_1^f = \eta_1^f/2$ alınabilir. Eğer yapıdaki enerji tüketimi, viskoz sönüm ile modellenirse, yapıdaki sönüm oranı (2.2.29) denkleminde benzer bir şekilde $(\omega_1^f/\omega_1)^3$ ile çarpılabilir.

2.2.4.3 Davranış sonuçları

Şekil 2.2.7’de, sabit $\eta_s = 0.10$ histeretik sönüm katsayısı ile (2.2.21) denklemi kullanılarak kule tabanına nispetle kule tepesinin ivme genliğinde hesaplanan genlikler gösterilmiştir; σ dalga parametresidir. Aynı sonuçlar, dairesel kulelerle temsil edilebilen diğer kuleler için de elde edilmiştir.

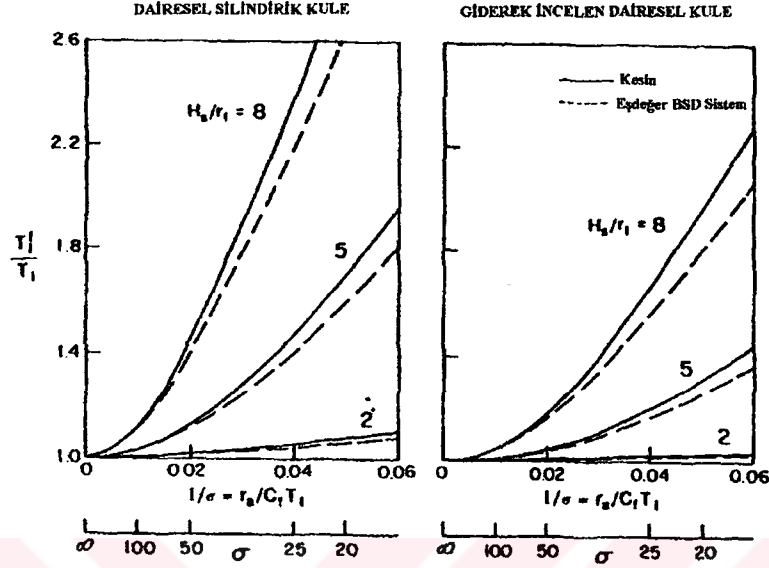


Şekil 2.2.7 Susuz bir ortamda esnek zemine oturan dairesel silindirik kulelerin harmonik yer hareketinden dolayı oluşan gerçek ve eşdeğer BSD sistem davranışlarının karşılaştırılması

Şekilden de görüldüğü üzere σ dalga parametresi azaldıkça ya da H_s/r_f oranı arttıkça, kulenin temel rezonans frekansı ve aynı zamanda temel rezonans genliği azalır. Şekil 2.2.7’de, (2.2.28) denkleminden hesaplanan eşdeğer BSD sistemin frekans cevap fonksiyonu, (2.2.26) ve (2.2.29) denklemleriyle verilen η_1^f sönüm katsayısı ve ω_1^f doğal frekansı çizilmiştir. Bu sonuçlar, zorlama frekanslarının ve σ , H_s/r_f ve γ kule–temel–zemin sistem parametrelerinin geniş bir değişim aralığında, eşdeğer BSD sistemin esnek zemin üzerine oturan kulelerin temel mod cevabını oldukça doğru temsil ettiğini gösterir.

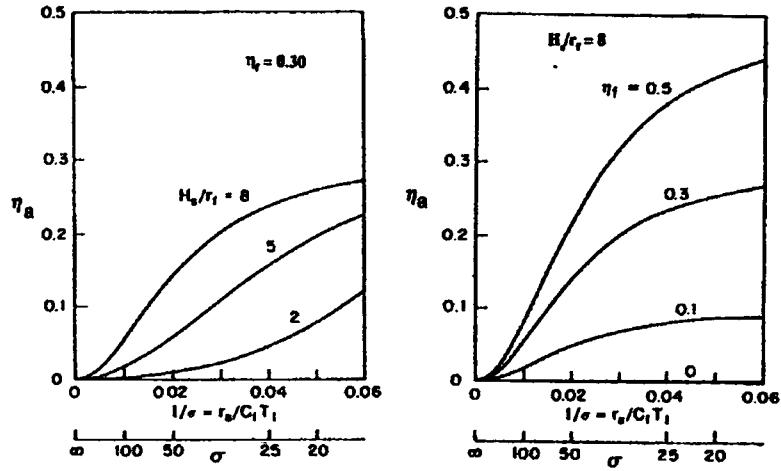
Şekil 2.2.8’de susuz ortamda rijit ve esnek temellere oturan kulelerin σ ve H_s/r_f ‘nin geniş bir değişim alanında birinci titreşim periyodlarının gerçek ve yaklaşık değerleri oranları karşılaştırılmıştır; $T_1^f = 2\pi/\omega_1^f$, 2.2.26 denkleminden hesaplanır ve σ ’nın yüksek, H_s/r_f ’nin düşük değerleri için kule–

temel–zemin sisteminin temel rezonans periyoduna yakındır. Fakat, doğruluk derecesi σ azaldıkça azalır ya da H_s/r_f oranı arttıkça artar.

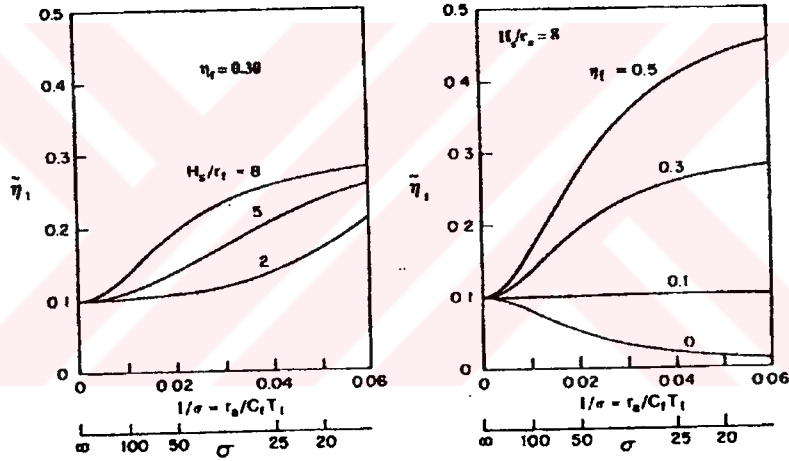


Şekil 2.2.8 Susuz ortamda rijit ve esnek temellere oturan kulelerin σ ve H_s/r_f oranlarına bağlı olarak birinci titreşim periyodlarının gerçek ve yaklaşık değerleri oranının karşılaştırılması

Kule–temel–zemin etkileşiminden kaynaklanan ek sönüm katsayısı η_a Şekil 3.9’da; eşdeğer BSD sistemin η^f ek sönüm katsayısı ise Şekil 3.10’da, σ ve H_s/r_f , ω_1^f parametrelerine bağlı olarak gösterilmiştir. ω_1^f ’in ω_1 ’den daha küçük olduğu göz önüne alındığında, 2.2.30 denkleminde görülmektedir ki, kule–temel–zemin etkileşimi yapısal sistemin etkin sönümünün azalması şeklinde kendini gösterir. Bununla beraber, yapısal sistemin sönümündeki azalma η_a ’dan daha büyük olabilir. Bu sebeple, bu azalma, temelin ek sönümlemesinden dolayı oluşan artışla telafi edilmedikçe, su ile etkileşim halindeki sistemin temel titreşim modundaki sönümleme oranı, sabit temelli kulenin sönümleme oranından daha düşük olacaktır (Şekil 2.2.10). Birçok durumda bu azalma, tüm sistem üzerindeki η_a ek sönümüyle fazlasıyla karşılanır.



Şekil 2.2.9 Dairesel silindirik kulelerde kule - temel - zemin etkileşiminden oluşan sabit ek histeretik sönüm katsayısı (η_a)



Şekil 2.2.10 Susuz bir ortamda esnek temel zemini üzerine oturan dairesel silindirik kuleleri temsil eden eşdeğer bir serbestlik dereceli sistemin $\bar{\eta}_1$ sabit histeretik sönüm katsayısı; $\eta_f = 0.10$

2.2.5 Esnek zemin üzerine oturan su içindeki kuleler

Kule–temel–zemin etkileşiminin etkileri göz önüne alındığında dahi, (2.2.16) ve (2.2.17) denklemleriyle elde edilen $m_a^0(z)$ ve $m_i^0(z)$ hidrodinamik kütle fonksiyonları, kulelerin düşük frekanslı modal cevabında, hidrodinamik etkilerin temsilini yeterli ölçüde sağlar. Bu nedenle, susuz bir ortamda esnek zemin üzerine oturan kulelerin temel mod cevabını modelleyen yukarıdaki bölümde tanımlanan eşdeğer BSD sistem, hidrodinamik etkileri dahil edecek

şekilde genişletilebilir. Susuz ortamda bulunan kulenin temel mod özellikleri, yani ω_1 temel titreşim frekansı, M_1 genelleştirilmiş kütlesi, L_1 genelleştirilmiş zorlama terimi, m_1^* etkili kütlesi ve h_1^* etkili yüksekliği su içerisindeki kulenin ilgili özelliklerine çevrilebilir. $\tilde{m}_1^* = (\tilde{L}_1)^2/(\tilde{M}_1)^2$ ve $\tilde{h}_1^* = \tilde{L}_1^r / \tilde{L}_1$

Esnek zemin üzerine oturan su içindeki kulenin temel mod cevabını modelleyen eşdeğer BSD sistemin $\tilde{\omega}_1$ doğal frekansı (2.2.26) ve (2.2.27) denklemleri geliştirilerek şu şekilde ifade edilebilir:

$$\tilde{\omega}_1 = \frac{\omega_1^r}{\sqrt{1 + \text{Re}[\tilde{F}(\tilde{\omega}_1)]}} \quad (2.2.31)$$

$$\tilde{F}(\omega) = \tilde{m}_1^*(\omega_1^r)^2 \left[\frac{(\tilde{h}_1^*)^2}{K_{MM}(\omega)} + \frac{1}{K_{VV}(\omega)} \right] \quad (2.2.32)$$

Benzer şekilde, esnek temel zemini üzerinde bulunan su içindeki kulenin temel mod davranışını modelleyen eşdeğer BSD sistemin $\tilde{\eta}_1$ sabit histeretik sönüm çarpanı, (2.2.29) ve (2.2.30) denklemleri geliştirilerek şu şekilde ifade edilebilir:

$$\tilde{\eta}_1 = \left[\frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_1^r} \right]^2 \eta_s + \eta_a \quad (2.2.33)$$

$$\eta_a = - \left[\frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_1^r} \right]^2 \text{Im}[\tilde{F}(\tilde{\omega}_1)] \quad (2.2.34)$$

Eğer kulenin gerçek kütlesi yerine itibari kütlesi konulursa (2.2.15), $\tilde{\omega}_1$ doğal frekanslı ve $\tilde{\eta}_1$ sabit histeretik sönüm çarpanlı eşdeğer BSD sistemin frekansa bağlı cevap fonksiyonu (2.2.28) ifadesine benzer.

Dairesel silindirik kuleler için, kule–su–temel–zemin sistemlerinin temel mod davranış analizini basitleştiren yaklaşımlar serisinin sonuçları Şekil 2.2.11’de gösterilmiştir. Tamamen su ile dolu bir ortamda, esnek temel zemini

üzerindeki kulenin “kesin” temel mod cevabı, kule-su etkileşimini içeren (2.2.21) denkleminin genişletilmiş bir versiyonunun çözülmesiyle hesaplanmıştır. (2.2.31) ve (2.2.33) denklemlerinden hesaplanan $\tilde{\eta}_1$ sabit histeretik sönüm çarpanlı ve $\tilde{\omega}_1$ doğal frekanslı BSD sistemin cevabı, $\tilde{m}_s(z)$ itibari kütleli kule için (2.2.35) denklemi kullanılarak hesaplanmıştır.

$$\tilde{Y}_1(\omega) = \left[\frac{\tilde{\omega}_1}{\omega_1'} \right]^2 \frac{-\tilde{L}_1}{-\omega^2 \tilde{M}_1 + (1 + i\tilde{\eta}_1)\tilde{\omega}_1^2 \tilde{M}_1} \quad (2.2.35)$$

Bu sonuçlar, eşdeğer BSD sistemin σ ve H_s/r_f değerlerinin geniş bir değişim aralığı için su içindeki kulelerin temel mod cevabı yaklaşımını en iyi şekilde sağladığını gösterir. Gerçekte, kule-su etkileşiminin ve kule-temel-zemin etkileşiminin tek tek dikkate alınarak incelenmesi halinde hassas çözüm kalitesine ulaşılacağı açıktır. Hidrodinamik ek-kütle yaklaşımı, bizzat bu hidrodinamik etkilere bağlı rezonans frekansındaki azalmayı olduğundan fazla büyük tahmin eder; buna mukabil BSD sistem yaklaşımı ise zemin-yapı etkileşimine bağlı rezonans frekansını olduğundan küçük bulur, böylece, bu iki yaklaşımda yapılan hataların birbirini kısmen giderdiği düşünülebilir.

2.2.6 Eşdeğer Yanal Kuvvetler

Kulelerin dinamik cevabındaki hidrodinamik etkilerin sırasıyla (2.2.16) ve (2.2.17) denklemlerinden elde edilen $m_a^o(z)$ ve $m_a^i(z)$ hidrodinamik kütle fonksiyonları ile temsil edilebileceği anlaşılmaktadır. Bir başka deyimle, hidrodinamik etkiler, kulenin $m_s(z)$ gerçek kütlesi yerine, itibari kütlesi alınarak bulunabilir:

$$\tilde{m}_s(z) = m_s(z) + m_a^o(z) + m_a^i(z) \quad (2.2.36)$$

Böyle bir yaklaşım, zorlama frekanslarının hemen hemen tamamı için kulelerin harmonik yer hareketine cevabının oldukça doğruya yakın tahmin

edilmesini sağlar. Kulenin n . titreşim modundaki maksimum cevabı ile ilgili eşdeğer yanal kuvvetler şunlardır:

$$f_n(z) = \frac{\tilde{L}_n}{\tilde{M}_n} S_a(T_n^r, \xi_n^r) \tilde{m}_s(z) \tilde{\phi}_n(z) \quad (2.2.37)$$

Burada, T_n^r ve $\tilde{\phi}_n(z) = \tilde{m}_s(z)$ itibari kütleli kulenin n . doğal titreşim periyodu ve mod şekli; $S_a(T_n^r, \xi_n^r) = T_n^r$ titreşim periyodu ve $\xi_n^r = \xi_n = \eta_s/2$ sönüm oranına karşı gelen yer hareketi için yalancı ivme cevabı spektral ordinatıdır. (Hidrodinamik etkilerin sönüm oranını değiştirmeyeceği kabulü ile.) M_n genelleştirilmiş kütle ve L_n genelleştirilmiş yük terimi (2.2.4) ve (2.2.5) denklemlerinde $m_s(z)$ yerine $\tilde{m}_s(z)$ konulması ve dönme ataletinin ihmal edilmesiyle şu şekilde ifade edilir:

$$\tilde{M}_n = \int_0^{H_1} \tilde{m}_s(z) |\tilde{\phi}_n(z)|^2 dz \quad (2.2.38)$$

$$\tilde{L}_n = \int_0^{H_1} \tilde{m}_s(z) \tilde{\phi}_n(z) dz \quad (2.2.39)$$

İlk iki titreşim modunun, genelde, deprem tasarım kuvvetlerinin yaklaşık değerini tahmin için yeterli olduğu kabulüyle, $n=1$ ve 2 için (2.2.39) denklemini çözmek gerekecektir. Bu şunları gerektirir:

- (1) $\tilde{m}_s(z)$ itibari kütleli kule için ilgili özdeğer problemini çözerek, ilk iki titreşim modu frekansları ve mod şekillerinin hesabı;
- (2) Sırasıyla, dış ve iç su bölgeleri için üç boyutlu sınır değer problemlerini çözerek $m_a^0(z)$ ve $m_i^0(z)$ hidrodinamik ek kütle fonksiyonlarının hesabı.

Uygulamada, bu büyüklükleri hesaplamada kullanılacak basitleştirilmiş yöntemler geliştirilmiştir. Kule–temel –zemin etkileşimini içeren, kulelerin temel mod cevabının, (2.2.31) denklemiyle verilen $\tilde{\omega}_1$ doğal frekansı ve (2.2.33) denklemiyle verilen $\tilde{\eta}_1$ sabit histeretik sönüm çarpanı özelliklerine sahip eşdeğer BSD bir sistemle, doğruya yakın tahmin edilebileceği anlaşılmaktadır. Temsili eşdeğer BSD sistem, zorlama frekanslarının hepsi

için doğrudur ve temsili yer hareketine kulenin cevabının analizinde kullanılabilir. Binalar ve barajlar için geliştirilen yaklaşımlar izlenerek temel titreşim modundaki maksimum cevapla ilgili eşdeğer yanal kuvvetler gösterilebilir:

$$f_1(z) = \frac{\tilde{L}_1}{\tilde{M}_1} S_a(\tilde{T}_1, \tilde{\xi}_1) \tilde{m}_1(z) \tilde{\phi}_1(z) \quad (2.2.40)$$

$S_a(\tilde{T}_1, \tilde{\xi}_1) = \tilde{T}_1 = 2\pi / \tilde{\omega}_1$ titreşim periyodu ve $\tilde{\xi}_1 = \tilde{\eta}_1 / 2$ sönüm oranındaki yer hareketi için yalancı ivme spektral ordinatıdır. Yukarıda bahsedildiği gibi, ikinci titreşim modundaki cevapla ilgili eşdeğer yanal kuvvetler (2.2.37) denkleminde elde edilebilir. Çünkü, kule–temel–zemin etkileşim etkileri, yüksek modlarda ihmal edilebilir mertebededir. Böylece, kulenin herhangi bir bölgesindeki kesme ve eğilme momentleri, ilk iki modun ($n=1$ ve $n=2$) maksimumlarının uygun bir şekilde kombine edilmesiyle bulunabilir.

2.3 Su Alma Kulelerinde Hidrodinamik Ek Kütlenin Basitleştirilmiş Hesabı (3, Goyal, A.ve Chopra, A. K., 1989)

2.3.1 Giriş

Goyal, A.ve Chopra, A.K. bu çalışmaları ile, iki simetri eksenli su alma kulelerinin titreşiminde kullanılan hidrodinamik ek kütlelerinin hesabını olabildiğince basitleştirerek, proje hesaplarında uygulanabilir pratik ifadeler vermektedir. Aşağıda, bu çalışmanın geniş bir özeti verilmeye çalışılmıştır.

İki eksene göre simetrik kesitli su alma kulelerinin deprem analizinde su ile yapı arasındaki karşı etkileşim sonucu oluşan hidrodinamik kuvvetleri, kulenin $m_s(z)$ kütlesi yerine itibari $\tilde{m}_s(z)$ kütlesi kullanılarak dikkate alınmanın mümkün olacağı, önceki çalışmada ifade edilmişti:

$$\tilde{m}_s(z) = m_s(z) + m_a^o(z) + m_a^i(z) \quad (2.3.1)$$

$m_a^o(z)$ ve $m_a^i(z)$ hidrodinamik ek kütleleri, bir başka deyimle, birim yatay yer ivmesinden dolayı rijit kulenin dış ve iç yüzeylerine, titreşim düzlemi boyunca etkiyen yanal hidrodinamik kuvvetlerin titreşime katkılarını temsil eden itibari büyüklükleri göstermektedirler.

Kulenin kesiti üniformsa, elde edilen ek kütle verileri kesindir; kesit değişkense ek kütle verileri yaklaşık olmakla birlikte yaklaşıklık mertebesi oldukça iyidir. Ek kütle ile ilgili analitik ifadeler, sadece dairesel silindirik kuleler ve üniform eliptik kuleler için mevcuttur ve planda enine kesiti değişken olan kulelerde hidrodinamik ek kütle fonksiyonlarının hesaplanması, iç ve dış sıvı bölgeleri için sınır değer problemlerinin sonlu eleman çözümünü gerektirir.

2.3.2 Çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesi

2.3.2.1 Üniform kuleler

Çevredeki suyun etkilerine maruz kalan dairesel ve silindirik kulelerde suyun oluşturduğu hidrodinamik ek kütle, yukarıdaki çalışmalarda da ifade edildiği gibi, Laplace diferansial denkleminin analitik çözümünden elde edilebilir:

$$m_a^o(z) = (\rho_w \pi r_o^2) \cdot \left[\frac{16 H_o}{\pi^2 r_o} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} E_m \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) \cos \left(\alpha_m \frac{z}{H_o} \right) \right] \quad (2.3.2)$$

Burada, z = Göz önüne alınan noktanın kule temeline uzaklığı, H_o = Çevredeki suyun derinliği, ρ_w = Suyun kütle yoğunluğu, r_o = Kulenin dış yarı çapı, $\alpha_m = (2m-1)\pi/2$, ve

$$E_m \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) = \frac{K_1 \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right)}{K_0 \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right) + K_2 \left(\alpha_m \frac{r_o}{H_o} \right)} \quad (2.3.3)$$

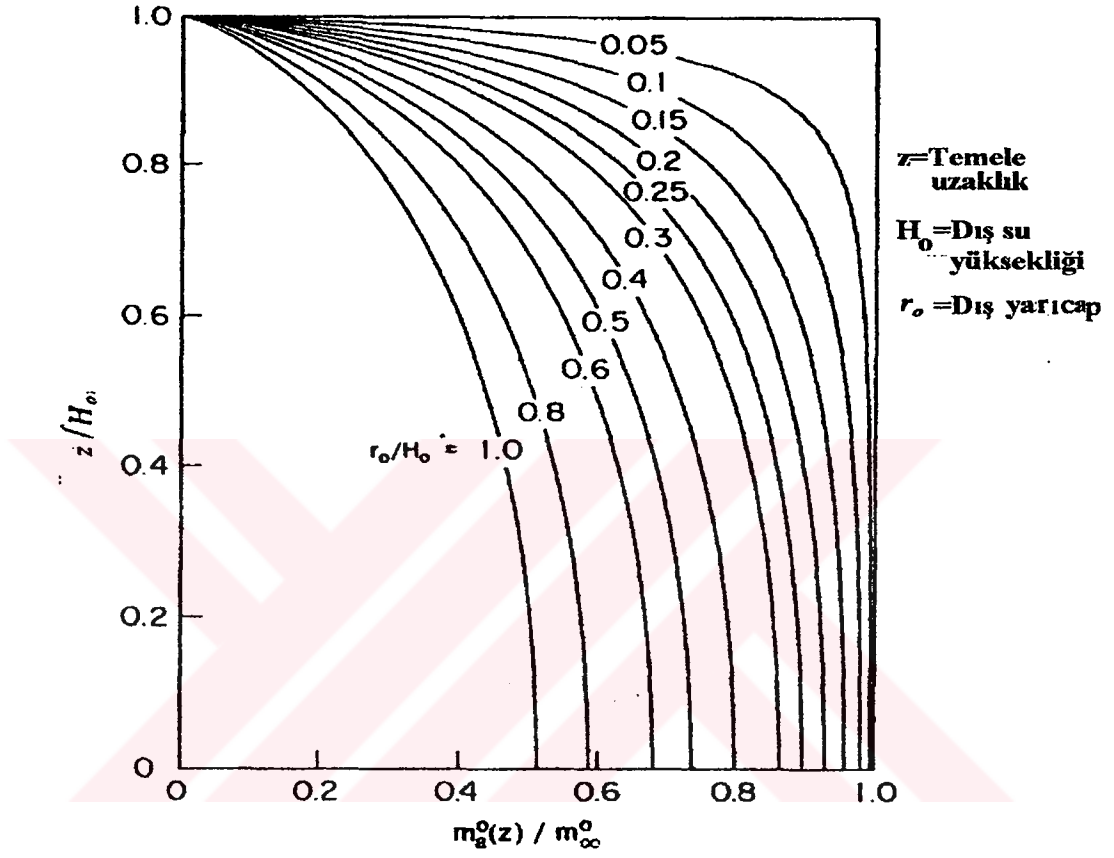
'dir. (2.3.3) ifadesinde K_n , n . dereceden ikinci çeşit değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur.

Dairesel enine kesiti sabit sonsuz uzun bir kulede, kulenin birim boyu tarafından yeri değiştirilen suyun kütlesine eşit olan ek kütle,

$$m_o^o = \rho_w \pi r_o^2 \quad (2.3.4)$$

dir. Dairesel silindirik kulelerde r_o/H_o 'nun (dış yarıçapın su derinliğine oranı) farklı değerleri için hesaplanan, $m_a^o(z) / m_o^o$ normalleştirilmiş ek kütle eğrileri Şekil 2.3.1'de gösterilmiştir. Şekilden açıkça görüldüğü üzere, $m_a^o(z) / m_o^o$ oranı, silindirin narinliği arttıkça ($H_o / r_o = \infty$) 1'e yaklaşır, azaldıkça küçülür.

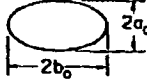
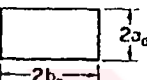
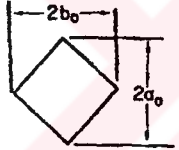
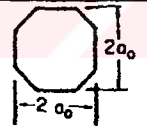
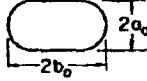
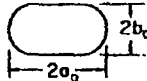
Enine kesiti değişken bir kulede, çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesi Laplace diferansiel denklemi çözülerek bulunabilir. Bu durumda analitik (kapalı) çözümler genelde mümkün değildir; ayrık (discrete) yöntemlerin kullanılması yoluna gidilir. $m_a^o(z)$ ek kütlesi, üç boyutlu sınır değer probleminin (SDP) çözümünü gerektirir; problemi simetriden yararlanarak iki boyutlu sınır değer problemine indirgeyip, sonlu elemanlar yardımı ile, yarı analitik bir çözüm yolu da izlenebilir.



Şekil 2.3.1 Dairesel silindirik kulelerde çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesi

Tablo 2.3.1'de sonsuz uzun üniform bir kulenin farklı enine kesitleri için birim uzunluğuna karşı gelen m_{∞}° ek kütlesi verilmiştir:

Tablo 2.3.1 Sonsuz uzun kulelerde çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesi

Dış Yüzey Enine Kesiti (1)	Yer Hareketi Doğrultusu (2)	a_0/b_0 (3)	$m_{\infty}^{\circ}/(\rho_w A_0)$ (4)	$m_{\infty}^{\circ}/(\rho_w \pi a_0^2)$ (5)
	$\leftrightarrow$	1	1.000	1.000
	$\leftrightarrow$	Bütün Değerler İçin	a_0/b_0	1.000
	$\leftrightarrow$	1/5	0.311	1.980
		1/4	0.377	1.920
		1/3	0.480	1.835
		1/2	0.667	1.701
		2/3	0.853	1.630
		1	1.186	1.511
		3/2	1.661	1.411
		2	2.136	1.359
		3	3.038	1.289
	$\leftrightarrow$	1/2	0.527	0.671
		1	1.189	0.756
		2	2.661	0.847
	$\leftrightarrow$	1	1.046	1.165
	$\leftrightarrow$	1/5	0.261	1.592
		1/4	0.314	1.511
		1/3	0.397	1.408
		1/2	0.555	1.262
		2/3	0.707	1.157
		1	1.000	1.000
	$\updownarrow$	3/2	1.444	1.050
		2	1.896	1.077
		3	2.787	1.098
		4	3.658	1.102
		5	4.516	1.101

Tabloda, kulenin enine kesit boyutları genel olarak, zemin hareketine dik doğrultuda $2a_0$, zemin hareketi doğrultusunda $2b_0$ ile gösterilmiştir. Tablodan da görüldüğü üzere, ek kütle, zemin hareketine dik doğrultudaki boyutun, hareket doğrultusundaki boyuta oranıyla doğrudan ilişkilidir ve, ya $\rho_w A_0$, ya

da $\rho_w \pi a_o^2$ kütlelerine oranlanarak ifade edilmiştir. Burada, $\rho_w A_o =$ Kulenin birim yüksekliğinin hacmine karşı gelen su kütlesi, $\rho_w \pi a_o^2 =$ a_o yarıçaplı silindirin birim boy hacmine karşı gelen su kütlesidir.

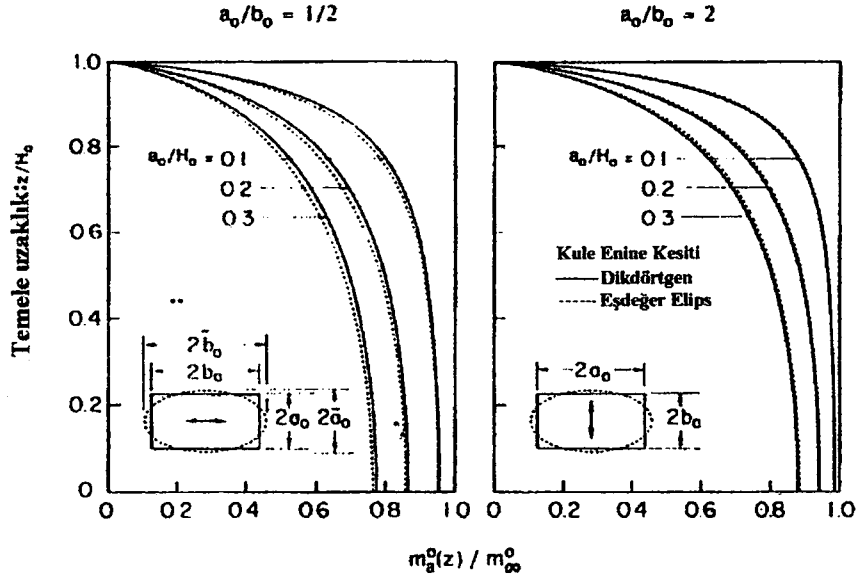
Sonlu uzunluktaki bir kulenin $m_a^o(z) / m_\infty^o$ hidrodinamik ek kütlesi, kulenin a_o / b_o enine kesit boyutları oranı; A_o enine kesit alanı; enine kesit şekli ve H_o / a_o (Şekil 2.3.1) narinlik oranından etkilenmektedir.

Şekil 2.3.2' de farklı a_o / b_o ve a_o / H_o oranları için, dikdörtgen ve eşdeğer eliptik kulelerde oluşan çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesindeki değişim gösterilmiştir. Eşdeğer eliptik kulenin $\tilde{a}_o / \tilde{b}_o$ plan boyutları oranı ve $H_o / \tilde{a}_o$ narinlik oranı ile gerçek kulenin a_o / b_o , A_o ve H_o 'su arasında şöyle bir ilişki vardır:

$$\frac{H_o}{\tilde{a}_o} = \frac{H_o}{\sqrt{\frac{A_o}{\pi}}} \cdot \sqrt{\frac{b_o}{a_o}} \quad (2.3.5a)$$

$$\frac{\tilde{a}_o}{\tilde{b}_o} = \frac{a_o}{b_o} \quad (2.3.5b)$$

Bu yaklaşımda, şekilden görüldüğü üzere, H_o , a_o / b_o ve A_o büyüklükleri aynı olan kulelerin ek kütlesi, kulenin enine kesit şeklinden pratik olarak bağımsızdır ve her iki kulede oluşan hidrodinamik ek kütle esasta aynıdır. Enine kesit şeklinin etkisi, H_o / a_o narinlik oranı azaldıkça artmaktadır.

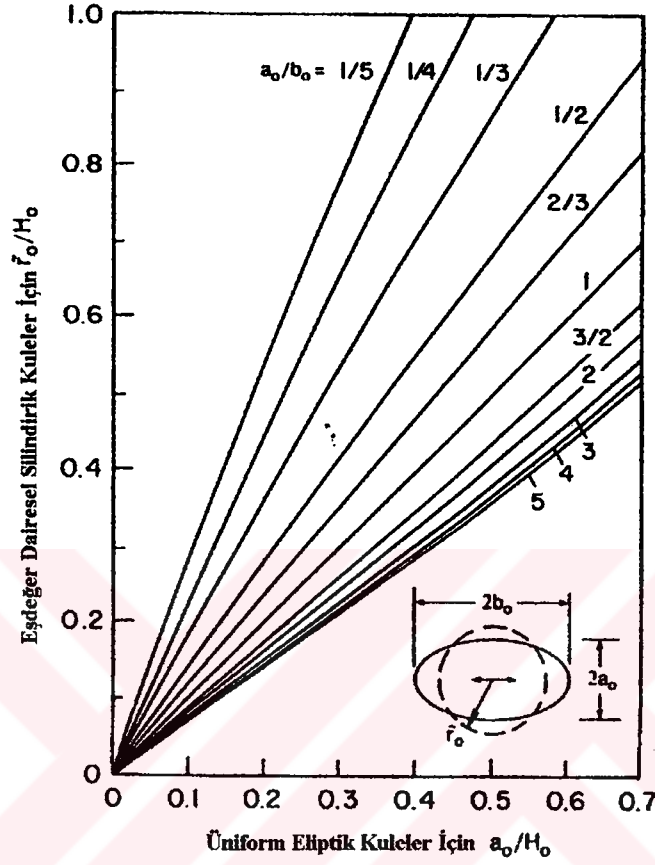


Şekil 2.3.2 H_0 ve a_0 / b_0 ve A_0 parametreleri aynı olan dikdörtgen kesitli ve eşdeğer eliptik kesitli üniform kuleler için çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlelerinin normalize edilmiş değerleri

Ayrık (discrete) yöntemler kullanılarak enine kesitleri eliptik olan üniform kulelerin normalize edilmiş ek kütlesi, çok sayıda a_0/b_0 ve H_0/a_0 parametreleriyle tespit edilebilir ve çizelge haline getirilebilir. Bu hazır grafikler veya hazır tablolar kullanılarak, benzeri sistemlerin normalize edilmiş ek kütle değerleri kolaylıkla elde edilebilir. Bununla beraber bu hesap tarzında ara değerler için yapılacak olan ara değer bulma yaklaşımına bağlı olarak süreksizlikler ortaya çıkabilir. Şekil 2.3.3’de eşdeğer dairesel silindirik kulenin narinlik oranının tersi, $\bar{r}_0 / H_0$, eliptik kulenin enine kesitinin farklı a_0 / b_0 değerleri için, benzer a_0 / H_0 oranına göre gösterilmiştir. Şekilden görüldüğü üzere, a_0 / b_0 , $\bar{r}_0 / H_0$ ‘nun sabit değeri, a_0 / H_0 ‘nun yaklaşık olarak doğrusal bir fonksiyonudur.

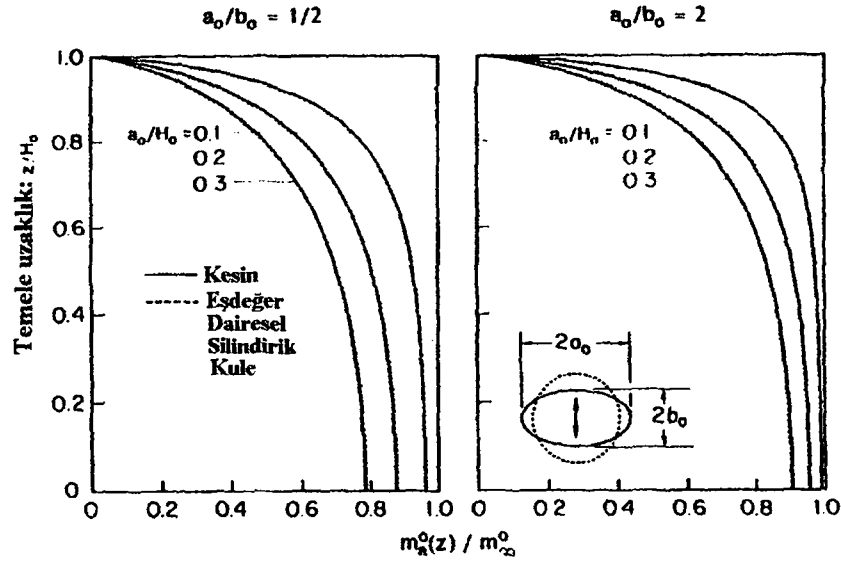
Uygulamada kolaylık sağlamak açısından üniform eliptik kule yerine eşdeğer dairesel silindirik kule ile hesap yapmak daha uygun olacaktır. Eşdeğerlik sağlanırken sonunda hesaplanacak $m_a^0(z)/m_\infty^0$ normalize edilmiş hidrodinamik ek kütlelerinin eliptik üniform kesitli kule ile dairesel üniform kesitli kulede aynı olması gerekir. $m_a^0(z) / m_\infty^0$ normalize edilmiş ek kütlesi, dairesel

silindirik kule için (2.3.2) denkleminde, üniform eliptik kule için ise ayırık yöntemlerle bulunabilir. Sonuçlar Şekil 2.3.4’de özetlenmiştir.



Şekil 2.3.3 Çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesine maruz üniform eliptik kulelere tekabül eden “eşdeğer” daireysel silindirik kulelerin özellikleri

(2.3.2) denkleminin eşdeğer daireysel silindirik kule için değerlendirilmesi sonucu yaklaşık olarak belirlenen normalleştirilmiş ek kütlenin, ayırık yöntemlerle elde edilen “gerçek” sonuçlarla esasta benzer olduğu anlaşılmıştır (Şekil 2.3.4).



Şekil 2.3.4 Üniform eliptik kuleler için çevredeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (“eşdeğer” dairesel silindirik kule) değerlerinin karşılaştırılması

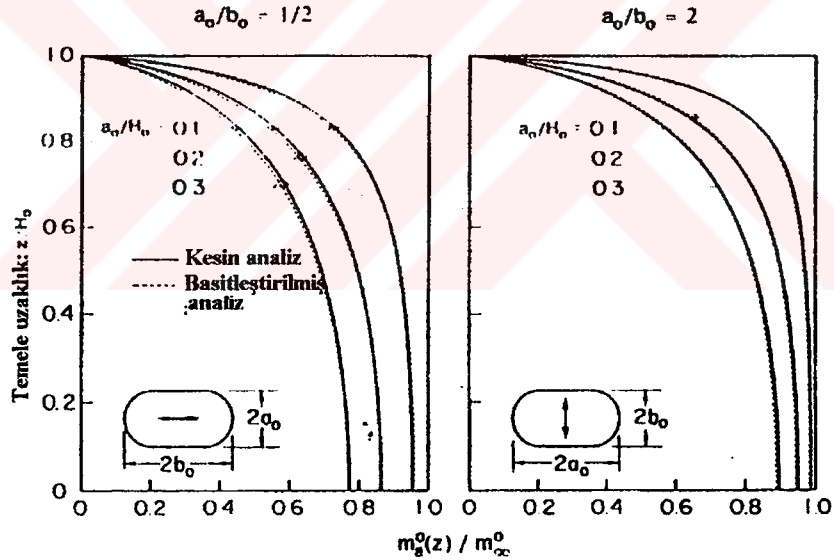
2.3.2.1.1 Üniform Kuleler – Özet

Önceden açıklanan sonuçlara ve analizlere dayanarak, iki simetri eksenli, eşdeğer enine kesiti belirli üniform kulelerde, çevredeki suyun hidrodinamik ek kütlesi şu adımlar izlenerek bulunabilir:

1. Gerçek kulenin H_0/a_0 narinlik oranı, A_0 enine kesit alanı, a_0 / b_0 plan boyutları oranı özelliklerine tekabül eden “eşdeğer” üniform eliptik kulenin $\tilde{a}_0/\tilde{b}_0$ ve $H_0/\tilde{a}_0$ parametreleri (2.3.5) ifadeleri kullanılarak hesaplanır,
2. Şekil 4.3 kullanılarak, eşdeğer eliptik kule için birinci adımda belirlenen $\tilde{a}_0/\tilde{b}_0$ ve $H_0/\tilde{a}_0$ özelliklerinden “eşdeğer” dairesel silindirik kulenin narinlik oranı $H_0/\tilde{r}_0$ hesaplanır,
3. Şekil 2.3.1’den, ikinci adımda belirlenen $H_0/\tilde{r}_0$ narinlik oranı ile dairesel silindirik kule için normalleştirilmiş ek kütle $m_a^0(z) / m_\infty^0$ okunur,

4. Tablo 2.3.1'den bazı gerçek enine kesitler için elde edilen sonuçlardan yararlanarak sonsuz uzun bir kulenin hidrodinamik ek kütlesi, m_{∞}^0 , belirlenir. Diğerk enine kesitler için, Laplace diferansiel denkleminin iki boyutlu çözümü çevredeki su bölgesi için uygulanabilir,
5. Üçüncü adımda belirlenen normalleştirilmiş ek kütle oranı ile dördüncü adımda hesaplanan m_{∞}^0 'yu çarparak gerçek kulenin $m_a^0(z)$ hidrodinamik ek kütlesi belirlenir.

Hidrodinamik ek kütle, üniform kulelerin seçilmiş enine kesitleri ve narinlik oranının farklı değerkleri için yukarıda açıklanan iki yöntemle belirlenmiş, ve Şekil 2.3.5'de karşılaştırılması yapılmıştır. Şekilden de görüldüğü üzere basitleştirilmiş yaklaşımın hassasiyeti hesap parametrelerinin uygulamada karşılaşılan değerkleri için oldukça iyidir.



Şekil 2.3.5 Su içindeki üniform kulelerin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (Basitleştirilmiş Hesap Yöntemi) değerklerinin karşılaştırılması

2.3.2.2 Üniform Olmayan Kuleler

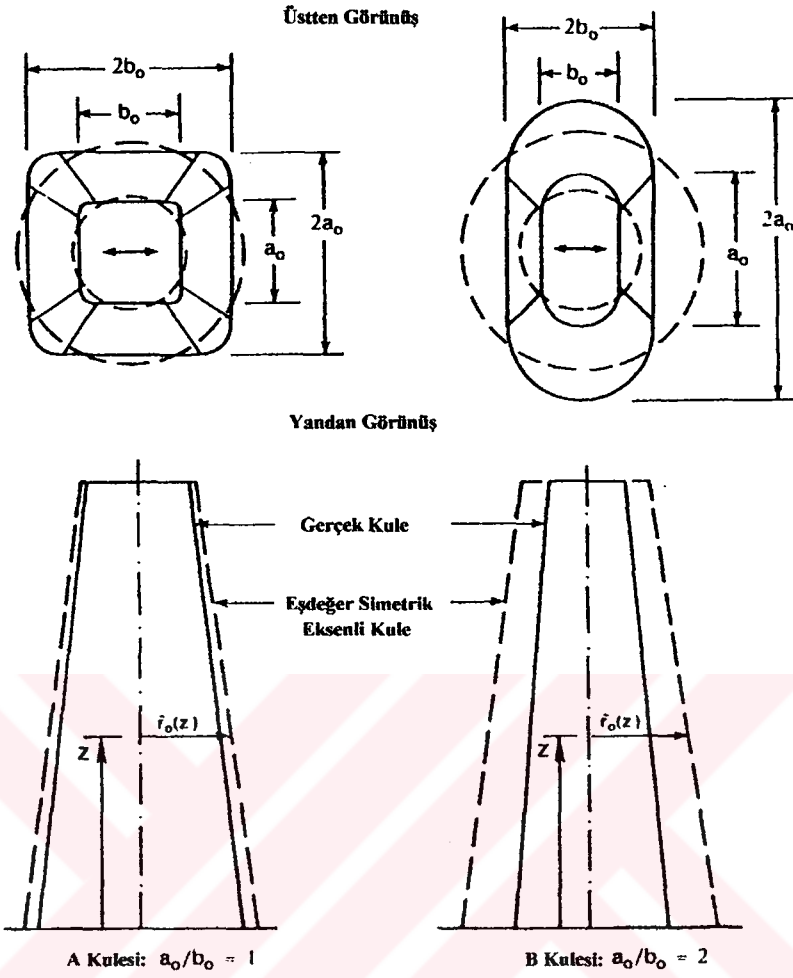
Su alma kulesinin enine kesit şekli, genelde yüksekliğı boyunca değışmese bile, enine kesit boyutları, temelin üstündeki mesafeye göre değışken olabilir.

Üniform kesitli kuleler için yukarıda anlatılan yöntem, değişken kesitli kuleye eşdeğer üniform kesitli kule tanımlanarak, değişken kesitli kulelere de uygulanabilir. Burada problem bu eşdeğer üniform kesitli kulenin belirlenmesidir. Yapılan çalışmalar değişken kesitli kulelerde normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütleyi belirlemek için iki eksene göre simetrik eşdeğer dairesel silindirik üniform kesitli kulelerin kullanılabileceğini göstermiştir.

Şekil 2.3.6'da, enine kesiti üniform olmayan iki eksenine göre simetrik iki kulenin bu bağlamda eşdeğeri kuleler gösterilmiştir. Şekilden de anlaşılacağı üzere, $\bar{\Gamma}_0 / a_0$ esasta H_0/a_0 dan bağımsızdır ve $\bar{\Gamma}_0(z)$ yaklaşık lineer bir fonksiyondur. Yani, eğer gerçek kulenin enine kesit boyutları yüksekliğiyle doğrusal olarak azalırsa, eşdeğer simetrik eksenli kuleler de yaklaşık lineer konik formda olacaklar demektir.

Seçilen üniform olmayan kulelerin (Şekil 2.3.6) $m_a^0(z)/m_\infty^0$ normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütleleri Şekil 2.3.7'de gösterilmiştir. Normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütle iki yöntemle belirlenmiştir:

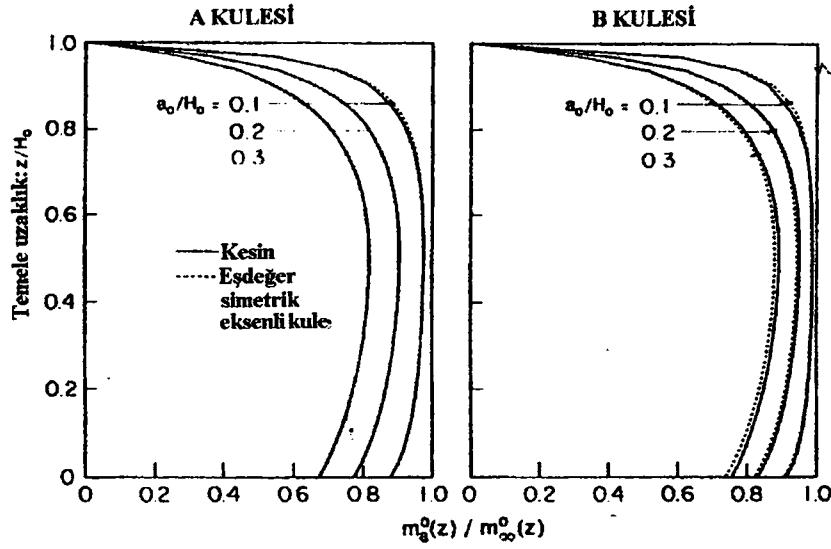
1. Gerçek kule için, çevredeki su bölgesinin kesin üç boyutlu hidrodinamik hesabı;
2. Simetrik eksenli eşdeğer kule için, çevredeki su bölgesinin kesin, simetrik eksenli hidrodinamik hesabı;



Şekil 2.3.6 Dış yüzey enine kesitleri gösterilen üniform olmayan iki kulenin eşdeğeri simetrik eksenli kuleler.

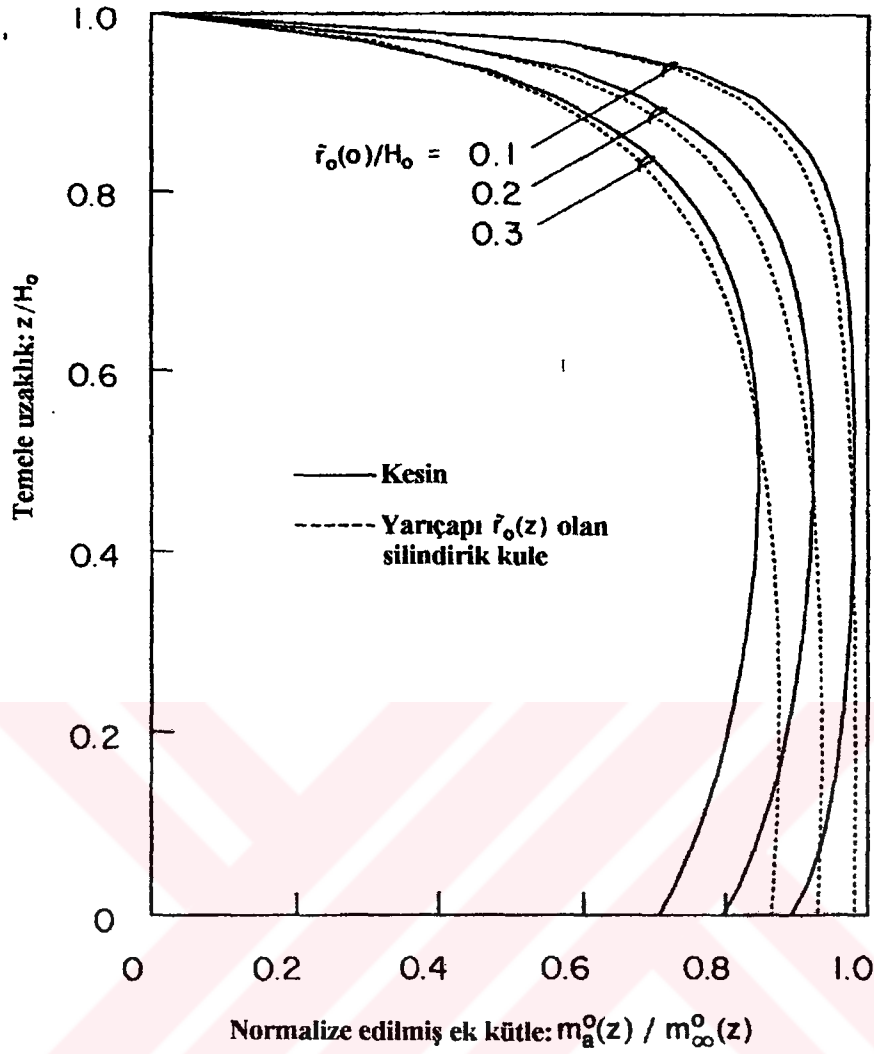
Bu yöntemlerde kulenin herhangi bir z ordinatındaki ek kütle, $m_a^o(z)$, aynı bölgedeki enine kesitin ek kütlesi, m_∞^o , ile normalleştirilmiştir. [m_∞^o ek kütlesi, X-Y düzleminde iki boyutlu hidrodinamik analiz ile kesin olarak belirlenebilmektedir.]

Şekil 2.3.7'den iki eksene göre simetrik eşdeğer kuleler için bu tür hesapla bulunan normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlelerin oldukça gerçeğe yakın olduğu görülmektedir.



Şekil 2.3.7 Su içindeki üniform olmayan iki kulenin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlelerinin kesin ve yaklaşık (Eşdeğer simetrik eksenli kule) değerlerinin karşılaştırılması

Yarıçapı $\bar{r}_0(z)$ olan simetrik eksenli eşdeğer kulenin herhangi bir z ordinatındaki $m_a^0(z)/m_\infty^0$ normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesi, $r_0/H_0 = \bar{r}_0(z)/H_0$ olan dairesel silindirik kulenin analitik çözümlerle elde edilen normalleştirilmiş ek kütlelerinden hesaplanabilir. [(2.3.2) denklemi, Şekil 2.3.1]. Şekil 2.3.8’de normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlelerin yaklaşık değerleri, giderek incelen simetrik eksenli kulelerin “kesin” değerleri ile karşılaştırılmıştır. Açıkça görüldüğü üzere, yaklaşık yöntem kulenin üst yarısı için iyi sonuçlar vermektedir. Çünkü, kulenin titreşim frekansları ve mod şekilleri, kule temeline yakın bölgelerde oluşan ek kütleden çok fazla etkilenmez. Basitleştirilmiş yöntem, kulelerin ön tasarımı ve güvenlik değerlendirilmesi açısından yeterince hassas kabul edilebilir.



Şekil 2.3.8 Su içerisindeki giderek incelen simetrik eksenli kulelerin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlelerinin kesin ve yaklaşık [$\tilde{r}_0(z)$ yarıçaplı dairesel silindirik kuleler] değerlerinin karşılaştırılması

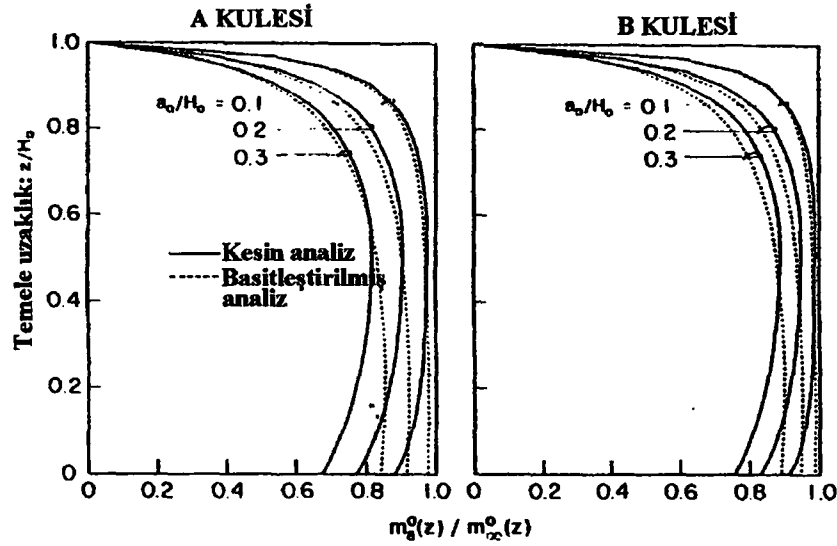
2.3.2.2.1 Üniorm olmayan kuleler – Özet

Yukarıda açıklanan analiz ve sonuçlara dayanarak, iki eksenli simetrik, enine kesiti üniorm olmayan kulelerde, çevredeki suyun oluşturduğu hidrodinamik ek kütle aşağıdaki adımlar izlenerek bulunabilir:

1. $m_a^0(z)$ ek kütlelerinin, yükseklik boyunca dağılımını elde etmek için, kulenin yüksekliği boyunca yeterli sayıda sonlu bölge seçilir. Seçilen bölgeler için z yükseklik koordinatları hesaplanır;

2. Seçilen z koordinatlı bölgede eşdeğer simetrik eksenli kulenin $\bar{r}_0(z)$ enine kesit yarıçapı belirlenir;
3. Seçilen z bölgesindeki eşdeğer simetrik eksenli kulenin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesi, $r_o/H_o = \bar{r}_0(z) / H_o$ için dairesel silindirik kulenin normalleştirilmiş ek kütesinden elde edilir (Şekil 2.3.1);
4. Tablo 2.3.1 ya da dış su bölgesi için Laplace denkleminin iki boyutlu analizinden, enine kesiti gerçek kulenin temeli seviyesinde aynı olan sonsuz uzun bir kulenin hidrodinamik ek kütlesi, $m_\infty^\circ(z = 0)$, hesaplanır. Eğer gerçek kulenin enine kesit şekli, yüksekliği boyunca değişmiyor, sadece boyutları değişiyor ise, $m_\infty^\circ(z)/m_\infty^\circ(0)$ oranının iki bölgedeki $A_o(z)/A_o(0)$ enine kesit alanlarına oranının eşit olduğu kabul edilerek, seçilen z bölgesindeki $m_\infty^\circ(z)$ ek kütlesi hesaplanabilir. Enine kesit şekli de değişiyorsa, $m_\infty^\circ(z)$ doğrudan birinci adımda seçilen z bölgesindeki gerçek kulenin enine kesit özelliklerinden hareketle bulunmalıdır,
5. Seçilen z bölgesindeki gerçek kulenin $m_a^\circ(z)$ hidrodinamik ek kütlesi, üçüncü adımda belirlenen normalleştirilmiş ek kütle ile yine aynı bölge için dördüncü adımda hesaplanan $m_\infty^\circ(z)$ ek kütlesi çarpılarak belirlenir.
6. Üniform olmayan bir kulenin hidrodinamik ek kütesinin tam bir dağılımını elde etmek için, birinci adımda seçilen kule yüksekliği boyunca değişik bölgeler için 2 - 5 adımları tekrarlanabilir.

Seçilen üniform olmayan kulelerde (Şekil 2.3.6), dıştaki suyun hidrodinamik ek kütlesi basitleştirilmiş hesap yöntemi ve kesin hesap yöntemi ile belirlenebilir. Şekil 2.3.9'dan da açıkça görüldüğü üzere, her iki yöntemle elde edilen sonuçlar yeterince uyumaktadır.



Şekil 2.3.9 Su içindeki üniform olmayan iki kulenin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütesinin kesin ve yaklaşık (Basitleştirilmiş hesap yöntemi) değerlerinin karşılaştırılması

2.3.3 Kule içindeki suyun hidrodinamik ek kütlesi

2.3.3.1 Üniform kuleler

Silindirik kulelerin içindeki suyun hidrodinamik ek kütlesi, Laplace denkleminin analitik çözümüyle elde edilebilir.

$$m_a^l\left(\frac{z}{H_i}\right) = (\rho_w \pi r_i^2) \cdot \left[\frac{16 H_i}{\pi^2 r_i} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} D_m\left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i}\right) \cos\left(\alpha_m \frac{z}{H_i}\right) \right] \quad (2.3.6)$$

Burada; z = Dikkate alınan kesitin temele uzaklığı,

H_i = Kule içerisindeki suyun derinliği,

ρ_w = Suyun kütle yoğunluğu,

r_i = Kulenin iç yarıçapı,

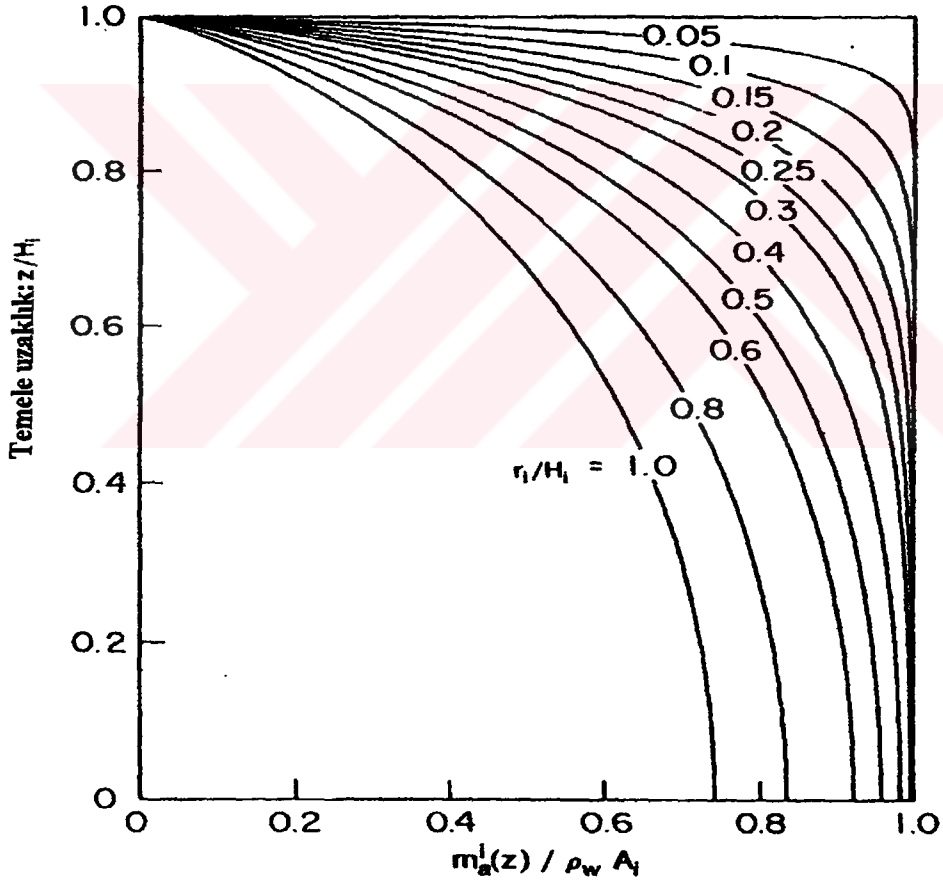
$$\alpha_m = (2m - 1) \pi/2$$

$$D_m\left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i}\right) = \frac{I_1\left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i}\right)}{I_0\left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i}\right) + I_2\left(\alpha_m \frac{r_i}{H_i}\right)} \quad (2.3.7)$$

dir. (2.3.7) denkleminde I_n , n. dereceden birinci çeşit değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur. Enine kesiti değişmeyen sonsuz uzun bir kulenin içindeki suyun birim kule yüksekliğindeki kütlesine eşit olan ek kütle;

$$m_x^i = \rho_w \pi r_i^2 \quad (2.3.8)$$

dir.



Şekil 2.3.10 Dairesel silindirik kulelerde kule içerisindeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesi

Dairesel silindirik kulelerde, iç yarıçapın su derinliğine oranının farklı değerleri için hesaplanan normalleştirilmiş ek kütle, $m_a^i(z)/m_\infty^i$, Şekil 2.3.10'da gösterilmiştir. Açıkça görülmektedir ki, normalleştirilmiş ek kütle $m_a^i(z)/m_\infty^i$, sonsuz ince kuleler (Yani; $H_i/r_i = \infty$) için birdir ve kuleler kısaltıkça (yani; narinlik oranı H_i/r_i azaldıkça) azalmaktadır. Çevredeki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi (Şekil 2.3.1) ile karşılaştırıldığında, aynı narinlik oranına göre, içteki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi daha büyüktür.

Enine kesiti değişken olan kulelerde içerideki suyun hidrodinamik ek kütlesi, Laplace diferansiel denkleminin çözümüyle belirlenebilir. Buna göre, analitik çözümler genelde pratik değildir ve ayrık (discrete) yöntemler daha uygundur. Üç boyutlu sınır değer problemlerinin (SDP) çözümü öncelikle $m_a^i(z)$ 'in belirlenmesini gerektirmektedir. Herhangi bir kule enine kesiti için;

$$m_\infty^i = \rho_w A_i \quad (2.3.9)$$

yazılabilir. Burada, A_i , kule iç boşluğunun enine kesit alanıdır ve m_∞^i , üniform kulenin içindeki suyun birim kule yüksekliğindeki kütlesine eşittir.

2.3.3.1.1 Üniform Kuleler – Özet

Yer hareketi doğrultusuna dik yöndeki iç boyutu $2a_i$, yer hareketi doğrultusu yönündeki iç boyutu $2b_i$, iç enine kesit alanı A_i ve içerisindeki suyun derinliği H_i olan, iki eksene göre simetrik bir kulenin içerisindeki suyun hidrodinamik ek kütlesi şu adımlar izlenerek belirlenebilir:

1. “Eşdeğer” üniform eliptik kulenin $2\bar{a}_i$ ve $2\bar{b}_i$ (sırasıyla yer hareketi doğrultusuna dik ve doğrultu yönündeki iç enine kesit boyutları) değerleri hesaplanır, $\bar{a}_i/\bar{b}_i$ oranı ve $H_i/\bar{a}_i$ narinlik oranı (2.3.10a) ve (2.3.10b) denklemlerinden belirlenir.

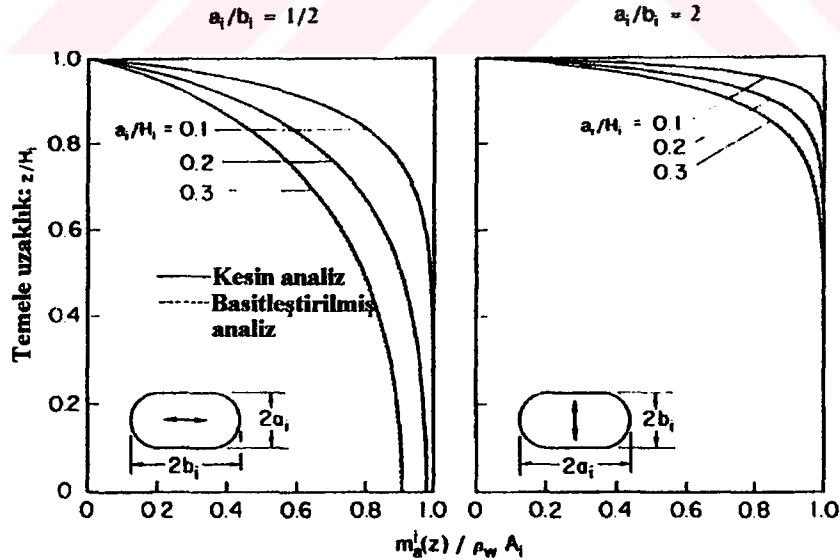
$$\frac{H_i}{\bar{a}_i} = \frac{H_i}{\sqrt{\frac{A_i}{\pi}}} \cdot \sqrt{\frac{b_i}{a_i}} \quad (2.3.10a)$$

$$\frac{\bar{a}_i}{\bar{b}_i} = \frac{a_i}{b_i} \quad (2.3.10b)$$

2. Birinci adımda “eşdeğer” eliptik kule için belirlenen $\bar{a}_i/\bar{b}_i$ ve $H_i/\bar{a}_i$ oranları yardımıyla “eşdeğer” dairesel silindirik kulenin $H_i/\bar{r}_i$ narinlik oranı hesaplanır. a_i/b_i ’nin sabit değeri için, $\bar{r}_i/H_i$ gerçekte a_i/h_i ’nin lineer fonksiyonudur; bu, şu şekilde gösterilebilir;

$$\bar{r}_i = \sqrt{\frac{A_i}{\pi} \cdot \frac{b_i}{a_i}} \quad (2.3.11)$$

3. Şekil 2.3.10’dan, ikinci adımda belirlenen $H_i/\bar{r}_i$ narinlik oranı ile dairesel silindirik kulenin $m_a^i(z)/m_\infty^i$ normalleştirilmiş ek kütlesi hesaplanır;
4. Üçüncü adımda belirlenen normalleştirilmiş ek kütle ile $m_\infty^i = \rho_w A_i$ çarpılarak gerçek kulenin $m_a^i(z)$ hidrodinamik ek kütlesi bulunur.



Şekil 2.3.11 Üniform kulelerde içerideki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (Basitleştirilmiş hesap yöntemi) değerlerinin karşılaştırılması

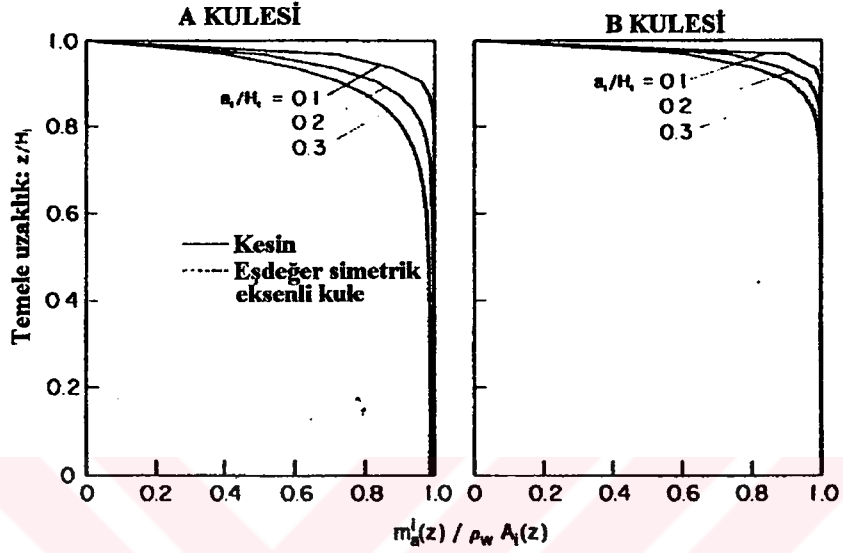
Üniform kulelerde, içerideki suyun hidrodinamik ek kütlesi iki yöntemle belirlenebilir. Yukarıda özetlenen basitleştirilmiş hesap yöntemi ve kesin hesap yöntemi. Şekil 2.3.11'den basitleştirilmiş hesap yöntemleriyle elde edilen sonuçların, kesin hesap yöntemleriyle elde edilen sonuçlara çok yakın olduğu görülmektedir. Şekil 2.3.11 ile Şekil 2.3.5 karşılaştırıldığında, basitleştirilmiş hesap yönteminin dış suya göre iç su için daha hassas sonuçlar verdiği görülür. Her iki durumda basitleştirilmiş hesap yöntemi, kulelerin ön tasarım safhasında ve güvenliğinin değerlendirilmesinde yeterince doğru sonuçlar vermektedir.

2.3.3.2 Üniform Olmayan Kuleler

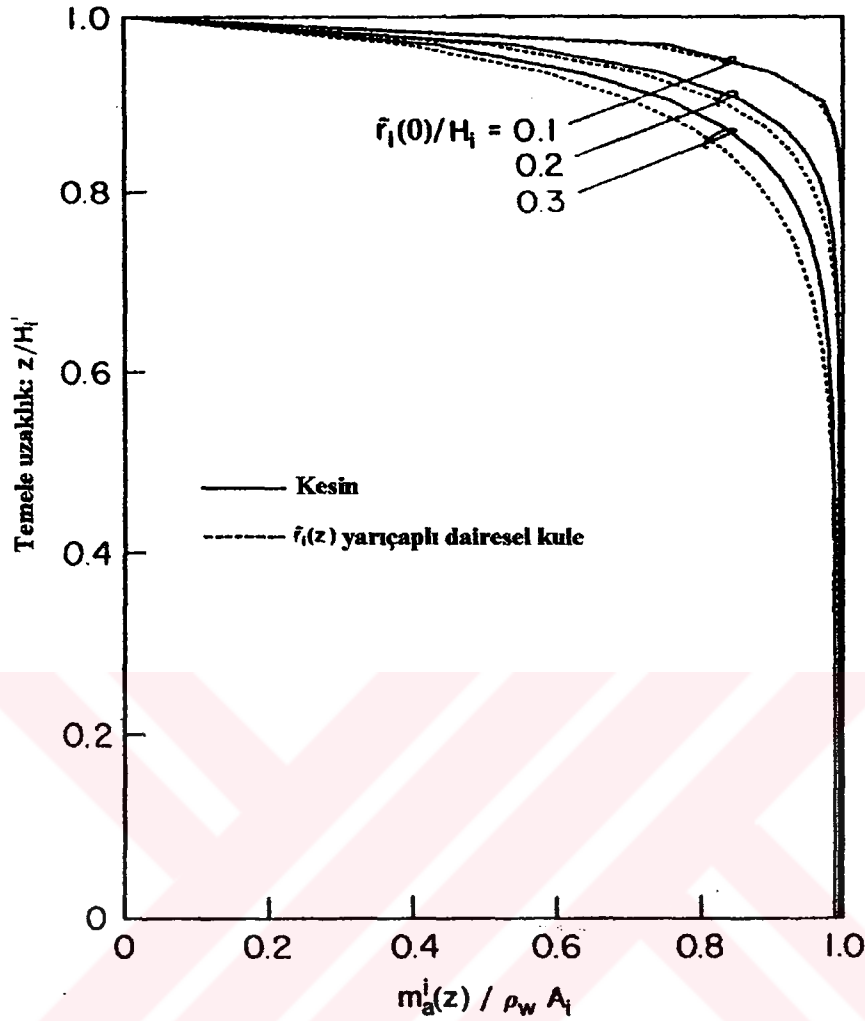
Üniform olmayan bir kulenin içerisindeki suyun hidrodinamik ek kütlesini belirlemek için, kule, $\bar{r}_0(z)$ yarıçapı, yüksekliği ile doğrusal olarak değişen, enine kesiti dairesel “eşdeğer” simetrik eksenli bir kule ile temsil edilir. Simetrik eksenli eşdeğer kulenin iç yarıçapı, çevredeki su durumunda olduğu gibi, üniform kulelerde kullanılan yöntem (yukarıdaki bölümde anlatılan 1 ve 2 adımları) yükseklik boyunca farklı bölgeler için uygulanarak belirlenebilir. Her bölgede, üniform kulenin enine kesiti, gerçek kulenin o bölgedeki enine kesiti olarak alınabilir. Gerçek kule için içteki su bölgesinin kesin üç boyutlu analizi ve eşdeğer simetrik eksenli kule için içteki su bölgesinin kesin, simetrik eksenli hidrodinamik analizi sonuçları, $m_a^i(z)/m_\infty^i(z)$, Şekil 2.3.12'de gösterilmiştir. İki analizden elde edilen sonuçlar arasında mükemmel denilebilecek bir uyum görülmektedir.

Yukarıda eşdeğer simetrik eksenli kulenin her bir enine kesitindeki çevredeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesi analitik yöntemlerle hesaplanmıştı. Analitik yöntemler, simetrik eksenli bir kulenin içerisinde bulunan suyun hidrodinamik ek kütlesinin değerlendirilmesinde de tatmin edici sonuçlar verir. $\bar{r}_1(z)$ yarıçaplı eşdeğer simetrik eksenli kulenin herhangi bir z bölgesindeki, $m_a^i(z)/m_\infty^i(z)$ normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesi, $r_i/H_i = \bar{r}_1(z)/H_i$ [(4.6), Şekil 2.3.10] olan dairesel, silindirik kule için analitik

olarak elde edilen sonuçlardan hesaplanabilir. Elde edilen yaklaşık değerler kulelerin ön tasarım safhaları için yeterince hassastır. (Şekil 2.3.13).



Şekil 2.3.12 Üniform olmayan iki kulenin içerisindeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlelerinin kesin ve yaklaşık (“Eşdeğer” simetrik eksenli kule) değerlerinin karşılaştırılması



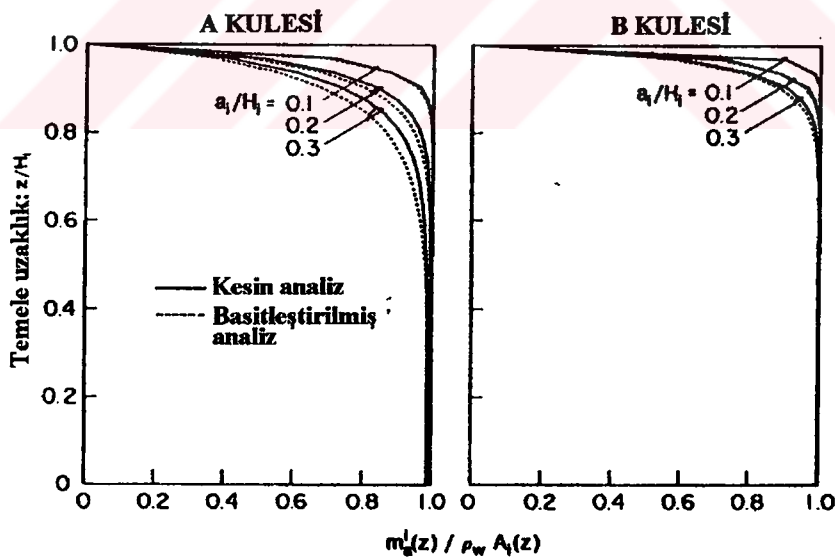
Şekil 2.3.13 Yüksekliği boyunca incelen simetrik eksenli kulelerin içerisindeki suyun normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlelerinin kesin ve yaklaşık $[\tilde{r}_t(z)$ Yarıçaplı dairesel silindirik kuleler] değerlerinin karşılaştırılması

2.3.3.2.1 Üniform olmayan kuleler – Özet

Yukarıdaki analiz ve sonuçlara dayanarak, iki simetri eksenli, enine kesiti değişken olan üniform olmayan kulelerin içerisindeki suyun hidrodinamik ek kütlesi de hesaplanabilir;

1. $m_i^0(z)$ ek kütlelerinin yükseklik boyunca dağılımını elde etmek için, üniform olmayan kulenin yüksekliği boyunca hidrodinamik ek kütlelerinin tahmin edileceği yeterli sayıda bölge seçilir. Seçilen bölgelerdeki z yükseklik koordinatı hesaplanır.

2. Seçilen z bölgesindeki eşdeğer simetrik eksenli kulenin $\bar{r}_i(z)$ enine kesit yarıçapı hesaplanır (Denklemler 2.3.11).
3. Seçilen z bölgesindeki eşdeğer simetrik eksenli kulenin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesi, Şekil 2.3.10'dan aynı z bölgesinde $r_i/H_i = \bar{r}_i(z)/H_i$ olan dairesel, silindirik kulenin normalleştirilmiş ek kütlesi olarak belirlenir,
4. Seçilen z bölgesindeki gerçek kulenin $m_a^i(z)$ hidrodinamik ek kütlesi, üçüncü adımda belirlenen normalleştirilmiş ek kütle ile $m_\infty^i(z)$ çarpılarak elde edilir; A_i iç enine kesit alanı ise, $m_\infty^i = \rho_w A_i(z)$ 'dir.
5. Üniform olmayan kulelerin $m_a^i(z)$ hidrodinamik ek kütlesinin tam bir dağılımını elde etmek için birinci adımda seçilen kule yüksekliği boyunca farklı bölgeler için 2–4 adımları tekrarlanır. Seçilen üniform olmayan kulelerin iç su ile ilgili hidrodinamik ek kütlesi iki yöntemle belirlenir.



Şekil 2.3.14 Üniform olmayan iki örnek kulenin normalleştirilmiş hidrodinamik ek kütlesinin kesin ve yaklaşık (Basitleştirilmiş analiz yöntemi) değerlerinin karşılaştırılması

2.4 Su Alma Kulelerinin Davranışında Zemin-Yapı-Su Etkileşimi (4, Syprakos, C. C. ve Xu, C. J., 1997)

2.4.1 Giriş

Syprakos, C. C. ve Xu, C. J. bu çalışmalarında ek kütle kavramına, zemin - yapı etkileşimini de etkileyerek katkıda bulunmaktadır. Çalışmalarında, farklı “zemin cinsleri” ve “kule yüksekliği/temel genişliği” oranları için kulenin çevresinde ve içerisinde su olup olmaması durumlarına göre, nümerik çözümlere dayalı sonuçlar üretmişlerdir. Elde edilen sonuçlara göre, uygulamada sıklıkla karşılaşılabilecek zemin koşullarının dikkate alınması, hidrodinamik davranışta hissedilir farklılıklara neden olmakta; kulenin yanal deplasmanları, moment ve kesme kuvvetleri artarken, temel dönmesinde azalma görülmektedir. İnceleme göstermektedir ki, kazık kuleler için, temel uçlarında zeminden ayrılma görülmezken; narin kulelerde, tam tersi, özellikle sağlam zeminlere oturan temellerde, moment ve sehimlerde önemli azalmalar meydana gelmektedir. Aşağıda bu çalışmada incelenen hususların geniş özeti yapılmıştır.

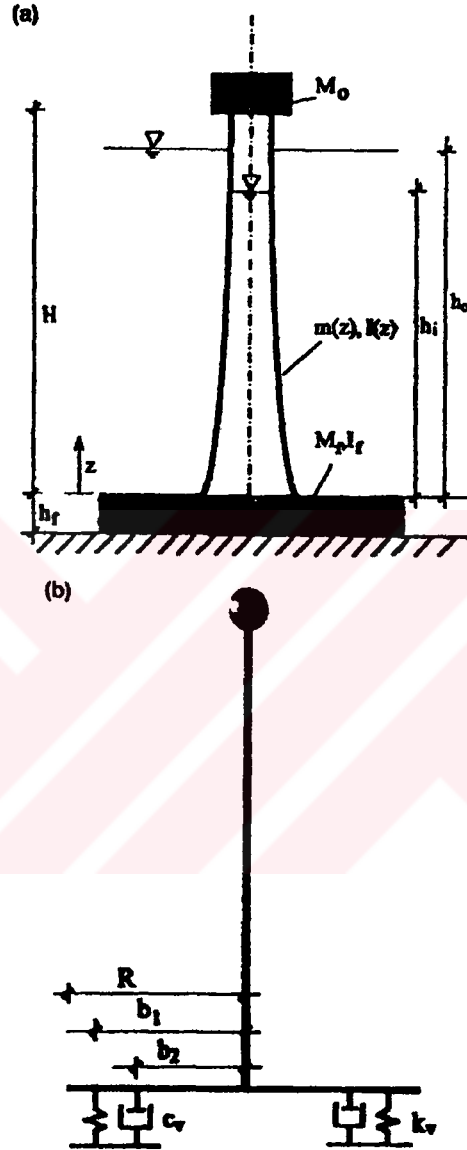
2.4.2 Kule - zemin - su sistemi

Bu çalışmada, H yüksekliğinde su içerisinde ince bir su alma kulesi dikkate alınmıştır. (Şekil 2.4.1a) h_0 , kulenin çevresindeki suyun yüksekliği, h_i , kulenin içerisindeki suyun yüksekliğidir. Kule, $m(z)$ kütlesi ve $I(z)$ atalet momentinin birim uzunluk boyunca dağıtıldığı giderek incelen homojen, izotrop bir kiriş olarak idealleştirilmiştir. Su ve yapı arasındaki etkileşim ek kütle metodu ile ele alınmıştır. Kulenin birim uzunluğundaki toplam $m_t(z)$ kütlesi;

$$m_t(z) = m(z) + m_o(z) + m_i(z) \quad (2.4.1)$$

dir. Burada, $m_o(z)$ ve $m_i(z)$, sırasıyla kulenin çevresindeki ve içerisindeki suyun hidrodinamik etkisini temsil eden ek kütleleridir. Kulenin toplam kütlesi M_b , kule tepesindeki kontrol yapılarını temsil eden kütle de M_o ile

gösterilmiştir. Su alma kulesi, yüksekliği h_f , yarıçapı R olan rijit, dairesel bir temel üzerine oturmuştur. M_f ve I_f , sırasıyla, temelin toplam kütlesi ve kütle atalet momentidir.



Şekil 2.4.1 (a) Su alma kulesi; (b) Basitleştirilmiş yapısal model

Kule temeli eşdeğer elastik yay ve sönümlerle modellenmiştir (Şekil 2.4.1b). Temel-zemin sisteminin rijitlik ve sönüm katsayıları frekans bağımlı olmakla beraber, bu çalışmada Tablo 2.4.1’de verilen bağıntılarla yaklaşık tahmin

yapılmıştır. Bağıntılarda G_s kesme modülünü, γ_s Poisson oranını, ρ_s de zeminin kütle yoğunluğunu göstermektedir.

Tablo 2.4.1 Yay ve sönüm katsayıları

Yay katsayısı		Sönüm	
Düşey k_v	Sallanma k_ϕ	Düşey c_v	Sallanma c_ϕ
$\frac{4G_s R}{1-\nu_s}$	$\frac{8G_s R^3}{3(1-\nu_s)}$	$\frac{3 \cdot 2}{1-\nu_s} \rho_s c_s R^2$	$\frac{0 \cdot 4}{2-\nu_s} \rho_s c_s R^4$

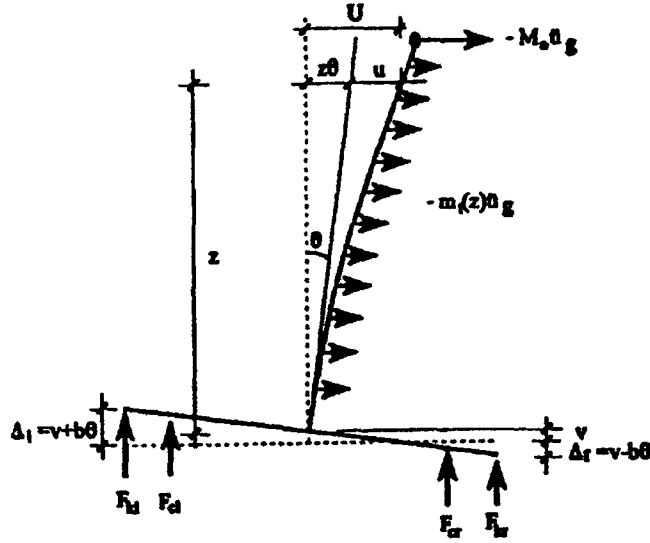
Temelin kaldırma etkisini dikkate almak için, kule temelinin düşey ve sallanma (rocking) yay katsayıları Şekil 2.4.1b'deki gibi alınmıştır;

$$b_1 = \sqrt{\frac{2}{3}} R. \quad (2.4.2)$$

$$b_2 = \sqrt{\frac{1}{8}} R. \quad (2.4.3)$$

dir. Düşey yer hareketi ihmal edilip, sadece $\ddot{u}_g(t)$ yatay yer hareketi sisteme uygulanmıştır. Temel ile zemin arasındaki sürtünmenin yatay kaymayı önleyecek ölçüde büyük olduğu kabul edilerek, oluşan yer değiştirme ve kuvvetler Şekil 2.4.2'de gösterilmiştir; $u(z,t)$ kulenin z ordinatındaki yer değiştirmesi, $\theta(t)$ ise temel dönmesidir.

$$u(z, t) = \sum_{i=1}^N \phi_i(z) q_i(t) \quad (2.4.4)$$



Şekil 2.4.2 Yer değiştirmeler ve kuvvetler

Konsol kirişin deplasman formunun yine konsol kirişin en küçük titreşim modunun şekline benzeyeceği kabul edilmiştir. Sonuç olarak, yapısal sistem Şekil 2.4.2’de gösterildiği gibidir ve $N+2$ sayıda $q_i(t)$ ($i=1....N$), $\theta(t)$ ve $v(t)$ genelleştirilmiş koordinatlarıyla ifade edilmektedir. Burada, $v(t)$, denge konumuna nispetle yapının düşey cevabını göstermektedir.

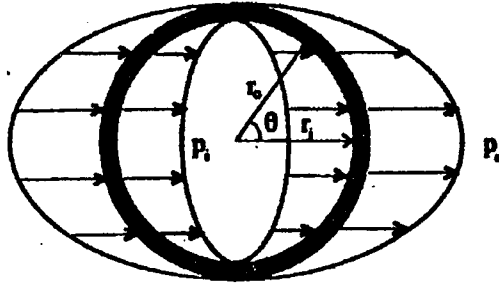
2.4.3 Hidrodinamik etkiler

Su alma kulelerin sismik davranışı, zorlama (yer hareketi) süresince etkiyen hidrodinamik kuvvetlerden önemli derecede etkilenir. Yapı ile su etkileşiminin ek kütle metodu ile tahmini için, su sıkıştırılmaz kabul edilmiştir. Silindirik koordinatlardaki $p(r,\theta,z,t)$ hidrodinamik basıncı için, bilindiği üzere,

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial p}{\partial r} + \frac{\partial^2 p}{\partial z^2} = 0 \quad (2.4.5)$$

yazılabilir.

Şekil 2.4.3’de kule enine kesitindeki p_i iç su basıncı ve p_o dış su basıncının değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.4.3 Hidrodinamik basınç

Silindirik bir kulede, suyun sınır şartları şöyle değişmektedir:

1. Sadece yatay hareket olması durumunda $z = 0$ 'da herhangi bir düşey hareket yoktur;
2. İnce kuleler için yüzeydeki dalgalanma önemli olmadığından, $z=h_i$ ve $z=h_o$ 'da yüzey dalgalarının etkisi ihmal edilebilir;
3. Suyun hareketi ve kulenin hareketi, silindirin iç ve dış yüzey sınırlarında aynıdır;
4. $\theta=0$ düzleminde simetri vardır.

Anılan bu sınır şartları analitik ifadelere dökülürse,

$$\frac{\partial p}{\partial z} = 0$$

$$p(r, \theta, 0, t) = 0$$

$$\frac{\partial p}{\partial r} \Big|_{r=r_o} = m \ddot{u}_i$$

(2.4.6)

$$\frac{\partial p}{\partial \theta} \Big|_{\theta=0} = \frac{\partial p}{\partial \theta} \Big|_{\theta=\pi}$$

olur. Burada; dış su için $r^* = r_o$, iç su için $r^* = r_i$, η_i ise kule kesit merkezinden dışa doğru yönelmiş yüzey normalidir.

Kulenin sadece kendi temel bükülebilir titreşim modunda eğileceği kabul edilmiştir. Böylece, hidrodinamik etkiler kule yüksekliği boyunca dağıtılan ek

kütle sayesinde benzeştirilebilmiştir. Suyun ek kütle ifadeleri aşağıda verilmiştir.

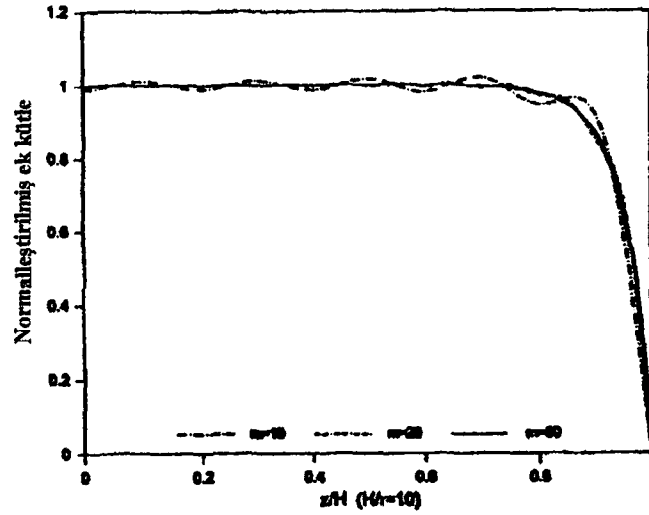
Kulenin çevresindeki suyun hidrodinamik ek kütlesi;

$$m_a^o(z) = m_\infty^o \left[\frac{16}{\pi^2} \frac{h_o}{r_o} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} E_m \right. \\ \left. \times \left(\alpha_m \frac{r_o}{h_o} \right) \cos \left(\alpha_m \frac{z}{h_o} \right) \right] \quad (2.4.7)$$

Kulenin içerisindeki suyun hidrodinamik ek kütlesi;

$$m_a^i(z) = m_\infty^i \left[\frac{16}{\pi^2} \frac{h_i}{r_i} \sum_{m=1}^{\infty} \frac{(-1)^{m-1}}{(2m-1)^2} D_m \right. \\ \left. \times \left(\alpha_m \frac{r_i}{h_i} \right) \cos \left(\alpha_m \frac{z}{h_i} \right) \right] \quad (2.4.8)$$

ile bulunabilir. $m_\infty^o = \rho_w \cdot \pi \cdot r_o^2$ ve $m_\infty^i = \rho_w \cdot \pi \cdot r_i^2$ sırasıyla, sonsuz uzun bir kulenin her birim uzunluğundaki kuleyi çeviren su ve kulenin içerisindeki suyun oluşturduğu ek kütledir. ρ_w suyun kütle yoğunluğu, I_n ve K_n , sırasıyla n . dereceden birinci ve ikinci çeşit değiştirilmiş Bessel fonksiyonudur. Her iki formülde $\alpha_m = (2m - 1) \pi/2$ 'dir. Şekil 2.4.4'de, r sabit yarıçaplı kulenin, $H/r=10$ ve $m = 10, 20$ ve 50 için kulenin içerisindeki suyun (2.4.8) ile hesaplanan $m_a^i(z)/m_\infty^i$ normalleştirilmiş ek kütlesi gösterilmiştir.



2.4.4 Farklı durumlar için kulenin içerisindeki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi

(2.4.7) ve (2.4.8) denklemleri ile bulunacak ek kütleleri kolayca hesaplayabilmek için uygun tek eğri belirlenmiş ve aşağıdaki ifadelere dönüştürülmüştür.

Kulenin çevresindeki suyun hidrodinamik ek kütlesi

$$m_a^o(z) = C_o m_{\infty}^o \ln \left(\frac{\sqrt{1 + \left(a_o \frac{z}{h_o}\right)^2} + h_o \frac{z}{h_o}}{\sqrt{1 + \left(a_o \frac{z}{h_o}\right)^2} - h_o \frac{z}{h_o}} \right) \quad (2.4.11)$$

a_o , b_o ve c_o katsayıları Tablo 2.4.2'de verilmiştir.

Tablo 2.4.2 a_o , b_o , c_o Katsayıları

$h_o/r_o \leq 3$ için	Diğer
$a_o = 27 \frac{h_o}{r_o} - 11$	$a_o = 65 \frac{h_o}{r_o} - 125$
$b_o = 26.96 \frac{h_o}{r_o} - 10.98$	$b_o = 65.198 \frac{h_o}{r_o} - 0.033 \left(\frac{h_o}{r_o}\right)^2 - 125.397$
$c_o = 0.031 + 0.058 \frac{h_o}{r_o} - 0.009 \left(\frac{h_o}{r_o}\right)^2$	$c_o = 0.1074 + 0.0047 \frac{h_o}{r_o}$

(b) Kulenin içerisindeki suyun hidrodinamik ek kütlesi

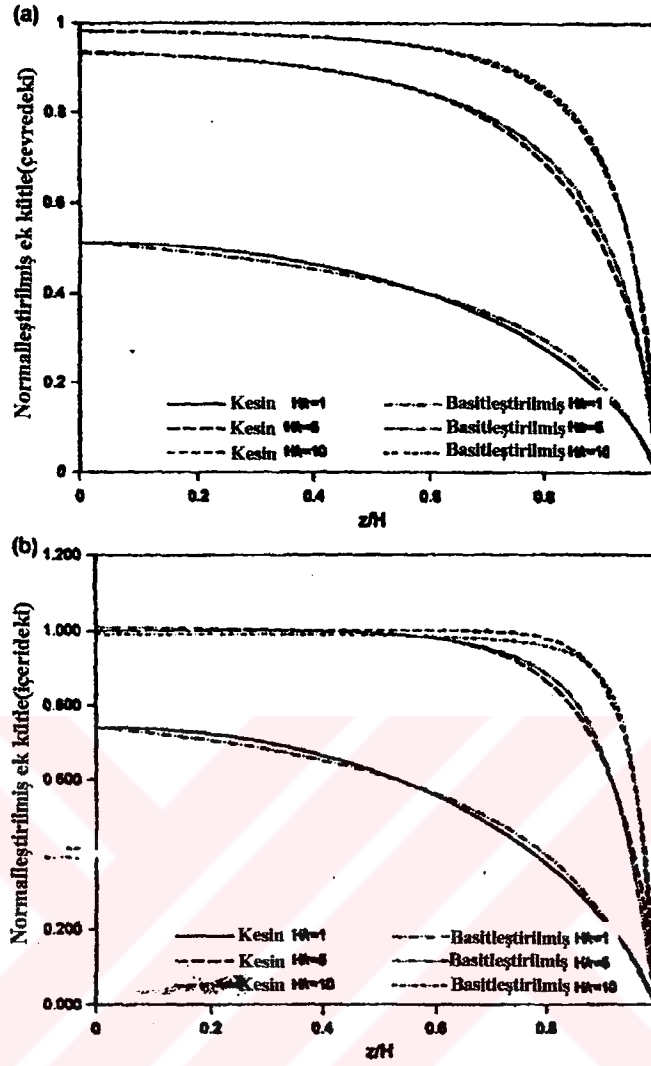
$$m_a^i(z) = C_i m_{\infty}^i \ln \left(\frac{\sqrt{1 + \left(a_i \frac{z}{h_i}\right)^2} + b_i \frac{z}{h_i}}{\sqrt{1 + \left(a_i \frac{z}{h_i}\right)^2} - b_i \frac{z}{h_i}} \right) \quad (2.4.12)$$

a_i , b_i ve c_i katsayıları Tablo 2.4.3’de verilmiştir.

Tablo 2.4.3 a_i , b_i , c_i Katsayıları

$h_i/r_i \leq 3$ için	Diğer
$a_i = 10 \frac{h_i}{r_i}$	$a_i = 41.54 - 11.033 \frac{h_i}{r_i} + 2.6 \left(\frac{h_i}{r_i}\right)^2$
$b_i = 10.92 \frac{h_i}{r_i} - 0.46 \left(\frac{h_i}{r_i}\right)^2 - 0.508$	$b_i = 30$
$c_i = 0.113 \frac{h_i}{r_i} - 0.008 \left(\frac{h_i}{r_i}\right)^2 + 0.034$	$c_i = 0.135 - 0.05 \frac{h_i}{r_i} + 0.035 \left(\frac{h_i}{r_i}\right)^2$

Şekil (2.4.5a) ve Şekil (2.4.5b)’de, dış ve iç suyun hidrodinamik etkisini temsil eden ek kütlelerin, $m=50$ alınarak (2.4.7) ve (2.4.8) denklemleri ile bulunan kesin değerleri ile (2.4.11) ve (2.4.12) denklemleri ile bulunan yaklaşık değerleri karşılaştırılmıştır; görüldüğü üzere sonuçlar oldukça iyi uyushmaktadır.



Şekil 2.4.5 (a) Kesin ve basitleştirilmiş denklemlerden elde edilen çevredeki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi; (b) Kesin ve basitleştirilmiş denklemlerden elde edilen içerideki suyun normalleştirilmiş ek kütlesi

2.4.3 Temel denklemler ve nümerik çözümleri

Lagrange denklemleri, $n+2$ genelleştirilmiş koordinat sistemi için Şekil 2.4.2'de gösterilen hareket denklemini elde etmede kullanılabilir:

$$\frac{\partial T}{\partial q_i'} - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial V}{\partial q_i} = Q_i \quad (i = 1, 2, \dots) \quad (2.4.13)$$

Burada, T ve V sırasıyla, kinetik ve potansiyel enerjiyi, Q_i , genelleştirilmiş kuvvetleri gösterir ve q_i' , $q_i(t)$, $\theta(t)$ ve $V(t)$ 'ye karşılık gelir. C .

Xu, P – Δ etkilerini ihmal edip, yer deşiştirmelerin ve dñnmenin kñçñk olduğunu kabul ederek bir yñntem geliştirilmiştir. Dñzenlenen denklemler şu ùç duruma açıklık getirmek için farklı şekiller alırlar:

- (a) Temelde yñkselmenin olmaması durumu,
- (b) Temel sol kñřesinin yñkselmesi durumu,
- (c) Temel saė kñřesinin yñkselmesi durumu.

Basitlik için ,bu durumlar matrislerle ifade edilmişlerdir;

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{Q\} \quad (2.4.14)$$

Hareket denklemleri, $\delta = 0,5$ ve $\alpha = 0,25$ için, Newmark'ın direkt integrasyon metodu ile çñzñlmñřtñr. Direkt integrasyon metodunda, Δt zaman aralığının seçiminin, çñzñmñn doğruluğu açısından kritik bir ònemi vardır. Òrneklerde, $\Delta t = 0,0005$ s alınmıştır. Sonucun doğruluğu aynı zamanda formülasyondaki modların sayısına da bağlıdır.

2.4.4 Sayısal òrnek

San Francisco Kñrfezi'nin doğusundaki Briones Barajı'nın su alma kulesi òrnek olarak seçilmiştir. Kulenin yñkseklėi=70,10 m, yarıçapı yñkseklık boyunca doğrusal olarak değişmektedir. Kulenin tepe i yarıapı=1,52 m, tepe dış yarıapı=1.86 m, taban i yarıapı=3.05 m, taban dış yarıapı=3.45 m ve temelin yarıapı= 9.14 m'dir. Betonarme kule malzemesi, homojen izotrop kabul edilmiştir; $E=31000$ MPa ve birim ağırlık=2483 kg/m³'dñr. Her modun sñnñmleme oranı, [yani $\xi_i(i=1,...,5)$] 0.05'e eşit alınmıştır. Zeminin kñtle yoğunluğu = 2644 kg/m³, kesme modñlñ $G = 245.6$ MPa, Poisson oranı = 1/3, kesme dalga hızı = 304.8m/s.'dir.

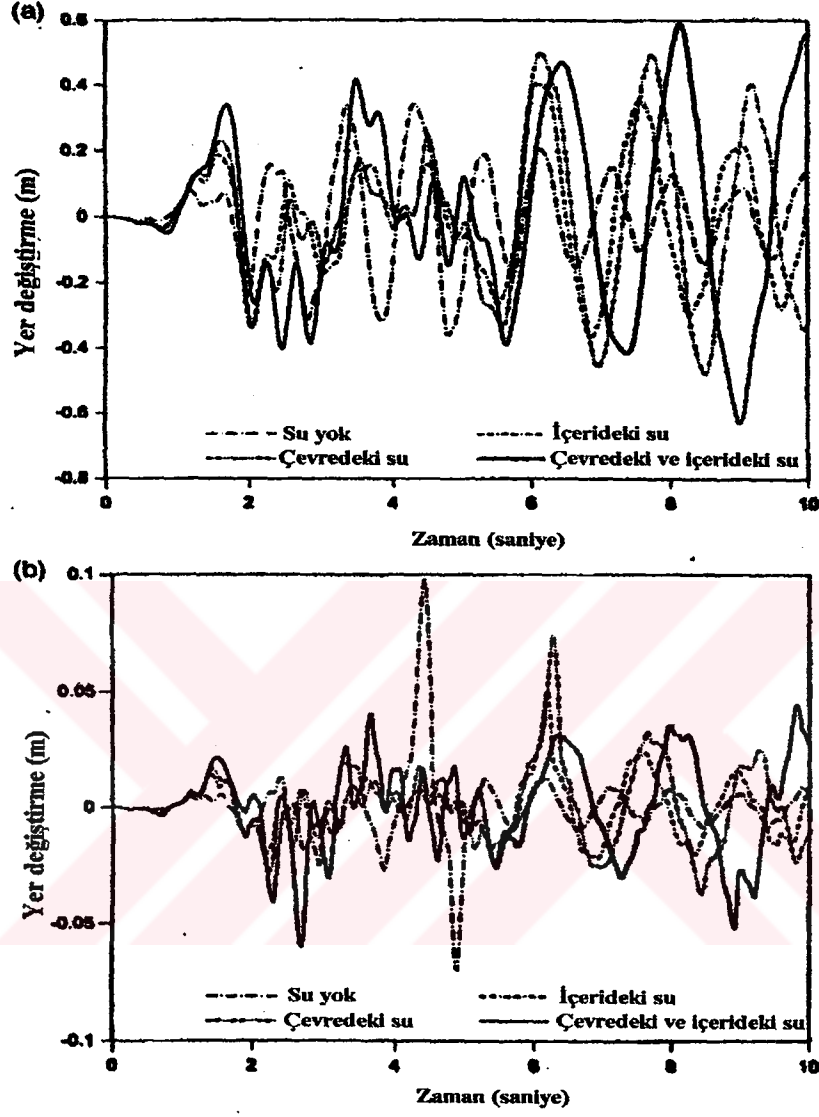
1940 El-Centro depreminin K-G bileşeni deprem hareketi olarak seçilmiştir. Bu depreme ait maksimum yer ivmesi 0.33g'dir

2.4.5 Su yapı karşılıklı etkileşiminin tesirleri

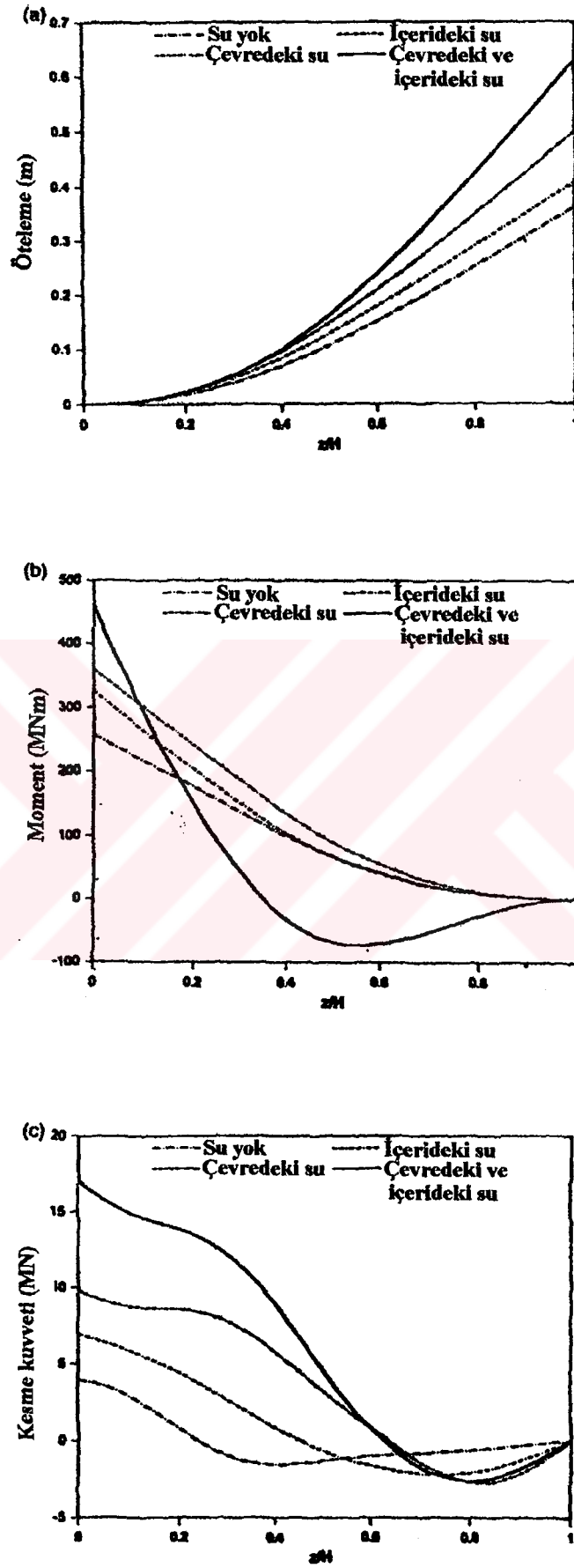
Hidrodinamik kuvvetlerin kulenin davranışı üzerindeki etkileri şu dört duruma göre kararlaştırılır:

- (1) Hiç su olmaması durumu,
- (2) Sadece kulenin çevresinde su olması durumu,
- (3) Sadece kulenin içerisinde su olması durumu,
- (4) Kulenin hem çevresinde, hem de içerisinde su olması durumu.

(2), (3) ve (4) durumlarında, $h_0/H=1$ ve $h_i/H=1$ alınmıştır. Kulenin tepesinde temelin dönmesi ve kulenin kendi eğilmesiyle oluşan toplam yer değiştirmeler Şekil 2.4.6a ve Şekil 2.4 6b'de; maksimum (spektral) cevaplara ilişkin deplasman, moment ve kesme kuvveti dağılımları, Şekil 2.4.7 (a)-(b)-(c)'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4.6 (a) Kule tepesindeki eğilmeden ileri gelen yer değişirmeler; (b) Temelin dönüşünden ileri gelen yer değişirmeler



Şekil 2.4.7 Kule yüksekliği boyunca oluşan (a) Öteleme, (b) Moment, (c) Kesme kuvveti dağılımları

Tablo 2.4.4'de kule tepesinin yer değiştirmesi, eğilme, temel dđnmesi ile oluşan yer değiştirme, maksimum temel momenti ve kesme kuvveti listelenmiştir.

Tablo 2.4.4. Briones Barajı'nın deprem davranışı

Dency şartları	Yer değiştirme (cm)	Eğilme deplasmanı (cm)	Temel dđnmesiyle oluşan yer değiştirme (cm)	Moment (MNm)	Kesme kuvveti (MN)
Su yok	41.27	36.24	9.82	256.60	3.93
Çevrede su var	44.87	40.77	5.16	325.30	6.93
İçeride su var	53.90	50.04	7.34	358.30	9.76
Hem içeride hem de çevrede su var	65.64	62.95	5.98	459.00	17.05

şekil 2.4.6, şekil 2.4.7 ve Tablo 2.4.4'den, suyun kulenin deprem davranışında büyümeye sebep olduğu görölmektedir. Bu, sudan dolayı kule-su sisteminin doğal frekanslarındaki azalma ve El-Centro depreminin K-G bileşeninin Fourier spektrumuna bağlıdır. Kulenin çevresi ve içerisinde su olması durumunda, taban kesme kuvveti, hiç su olmaması durumundaki taban kesme kuvvetinin dört katı, temel momenti ve tepedeki eğilme deplasmanı da hemen hemen iki katına çıkmıştır. Buna rağmen, temelin dđnmesiyle oluşan yer değiştirme küçük kalmaktadır.

Temel genişliği ve zemin cinsinin su- yapı karşılıklı etkileşimine tesirlerini değerlendirmek için Briones Barajı'ndan başka çalışmalar da yapılmıştır. Bu çalışmalarda iki tipik zemin durumu dikkate alınmıştır. Bunlar, kesme modölu sırasıyla $G = 34.5$ ve 245.6 MPa olan yumuşak ve sert zemindir. Kule yüksekliğinin temel genişliğine oranı basık ve ince kuleler için sırasıyla $H/R = 7.7$ ve 20 alınmıştır. Kule çevresindeki ya da içerisindeki suyun analizlere dahil edilip edilmemesine göre elde edilen maksimum cevaplar Tablo 2.4.5' listelenmiştir.

Tablo 2.4.5 Farklı zemin şartları ve H/R oranları için yapının davranışı

G MPa	H/R	Hidro dinamik Kuvvetler	Yer değiştirme (cm)	Eğilme deplasmanı (cm)	Temel dönmesiyle oluşan yer değiştirme (cm)	Moment (MNm)	Kesme kuvveti (MN)
245-6	7-7	Su var	65-64	62-95	5-98	459-00	17-05
		Su yok	41-27	36-24	9-82	256-60	3-93
	20	Su var	185-30	55-84	150-60	209-60	14-44
		Su yok	66-40	17-60	56-02	94-44	2-52
34-5	7-7	Su var	100-50	72-41	36-26	443-30	15-75
		Su yok	40-97	29-06	12-25	186-40	2-84
	20	Su var	137-60	41-87	127-70	107-10	11-61
		Su yok	178-70	15-24	167-80	87-07	2-32

Su ile karşılıklı etkileşim, bütün durumlarda yapının deprem cevabını etkilemektedir. Kule - su karşılıklı etkileşiminin kesme kuvveti üzerindeki etkisi moment ve dönme üzerindeki etkisinden daha büyüktür. Bu davranış, daha yüksek doğal frekansların dikkate alınmamış olması, dolayısıyla daha yüksek genliklerle izah edilebilir; zira bu çalışmada kullanılan deprem kaydı enerjinin önemli bir kısmının 5Hz'den daha düşük frekanslı titreşimlerde toplandığını göstermektedir. Suyun bulunup bulunmaması, zemin - yapı karşı etkileşiminin (ZYE) yapının cevabı üzerindeki etkisini oldukça etkiler. Tablo 2.4.5'de su - yapı karşı etkileşiminin basık kuleler üzerindeki ZYE'ni artırdığı, ince kuleler üzerindeki ZYE etkisini de azalttığı görülmektedir.

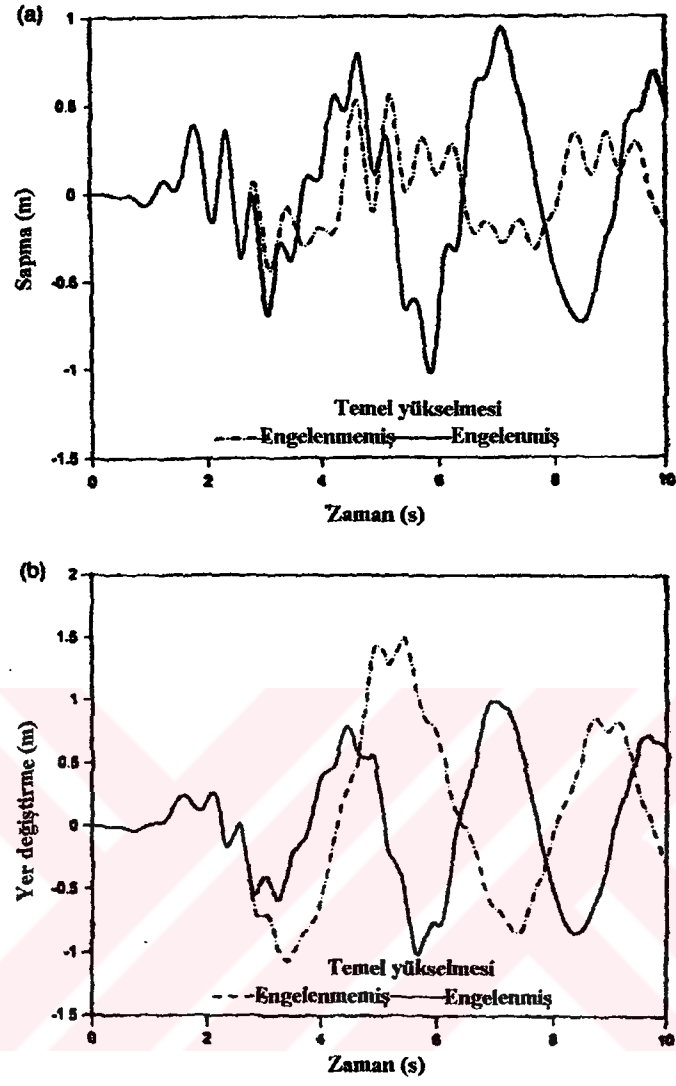
2.4.6 Temel kenarlarının zeminden ayrılmasının etkileri

Bu çalışmada, su alma kulelerinde temel kenarlarının zeminden ayrılmasının etkileri, temel yükselmesinin engellenip engellenmediği durumlar için elde edilen sonuçların karşılaştırılmasıyla incelenmiştir. Her iki durumda çevredeki ve içerideki su dahil edilmiştir. Temel yükselmesinin etkisini incelemek için Tablo 2.4.5'de listelenen parametrik çalışmadaki kule yüksekliğinin temel genişliğine oranları ve zemin rijitliklerinin aynısı dikkate alınmıştır.

Yapılan parametrik çalışmanın sonuçları Tablo 2.4.6'da gösterilmiştir. Zemin sertliğinin küçük olması ve kule yüksekliğinin temel genişliğine oranının dikkate alınmaması durumunda, yükselmenin oluşmadığı gözlenmiştir. Zemin ve yapı arasındaki bağıl rijitlik arttıkça, (yani sert zemin üzerindeki ince kule

durumu) yükselmenin, moment ve eğilme deplasmanının azalmasındaki etkisi daha da belirginleşmektedir.

$G=245.6$ ve $H/R=7.7$ olan Briones Barajı'nın su alma kulesinde temel yükselmesinin etkisi önemli değildir. Tepe yer değiştirmesi, eğilme ötelemesi, temel dönmesiyle oluşan öteleme, moment ve kesme kuvveti Tablo 5.6'nın ilk iki sırasında verilmiştir. Yapının cevapları pratikte aynıdır ve temelin yükselmesinin etkisinin oldukça küçük kaldığını ve bu kulenin analizinde ihmal edilebileceğini gösterir. Ancak H/R oranı 7.7'den 20'ye çıkarsa, yükselmenin etkisi daha önemli hale gelmektedir. Temelin dönmesiyle oluşan tepedeki eğilme ve toplam yer değiştirmeleri Şekil 2.4.8a ve Şekil 2.4.8b'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4.8 Temelin zeminden ayrılmasının engellenip engellenmediği haller için, (a);Kule tepesindeki sapma (b) Kule tepesindeki yer değiştirme

Temel dönmesi kulenin eğilme sehimini azaltırken, temel dönmesinden ileri gelen ötelemede oldukça fazla bir artış oluşturur. Tablo 2.4.6'da tepe deplasmanının, kulenin kendi eğilme sehimi, temelin dönmesinden ileri gelen yer değiştirme, taban momenti ve taban kesme kuvvetinin maksimumları gösterilmiştir. Görüldüğü gibi, temelin zeminden ayrılmasından ileri gelen temel dönmesinin 1/3 artışına karşılık sehim ve momentin sırasıyla 1/2 ve 2/3 nispetinde arttığı görülmektedir. Taban kesme kuvveti ve tepe deplasmanı hemen hemen aynı kalmaktadır.

Tablo 2.4.6 Çeşitli sınır şartları altındaki yapı davranışı

G (MPa)	H/R	Temelin durumu	Yer değiştirme (cm)	Sapama (cm)	Dönmeyle oluşan yer değiştirme (cm)	Moment (MN.m)	Kesme kuvveti (MN)
245-6	7-7	Yükselmiş	65-64	62-95	5-98	459-00	17-05
		Yükselmemiş	66-38	63-74	4-44	478-60	18-01
	20	Yükselmiş	185-30	55-84	150-64	209-60	14-44
		Yükselmemiş	190-30	102-40	101-80	595-90	16-12
34-5	7-7	Hiç yükselme yok					
		Yükselmemiş	100-50	72-41	36-26	443-30	15-75
	20	Hiç yükselme yok					
		Yükselmemiş	137-60	41-87	127-70	107-10	11-61

2.5 İncelenen Çalışmalardan Elde Edilen Sonuçlar

2.5.1 Liaw, C. Y. ve Chopra, A. K., (1974), “Su içindeki kulelerin dinamik özellikleri” [2.1]

Liaw ve Chopra'nın (2.1)'de özetlenen çalışmasında, hidrodinamik etkilerin “ek kütle” kavramı ile temsili konusundaki yaklaşımın esasları verildikten sonra, ki bu yaklaşımdaki temel sadeleştirmeler yüzey dalgalarının ve suyun sıkışabilirliğinin etkilerinin ihmalidir, ulaşılan sonuçların başlıcaları şöyle sıralanabilir:

- Çevredeki suyla etkileşim kulenin temel titreşim periyodunu artırır, modal sönüm oranını azaltır;
- Suyun sıkışabilirliğinin ince kulelerin hidrodinamik etkileşimi üzerinde esasta hiçbir etkisi yoktur;
- Yüzey dalgalarının düşük frekanslar dışında hidrodinamik davranışlar üzerinde etkisi yoktur.

2.5.2 Goyal, A. ve Chopra A.K., (1989), “Su alma kulelerinin deprem davranış analizi” [2.2]

Goyal ve Chopra, bu çalışmalarında, su alma kulelerinin depreme karşı davranışlarını doğrudan deprem tasarım spektrumuyla belirleyecek bir basitleştirilmiş hesap yöntemi geliştirerek, kule-temel-zemin karşılıklı etkileşimlerinin de dahil edildiği çalışmada, kulenin içindeki ve çevresindeki suyun hidrodinamik etkilerini temsil eden ek kütlelere dair ifadeler belirlenmiştir. Elde edilen sonuçların başlıcaları şunlardır:

- Sadece ilk iki titreşim modunun dikkate alındığı kulelerin dinamik analizinde, kesme deformasyonlarının katkısı, basık kulelerin analizine dahil edilebilir; binalarda olduğu gibi, kütlelerin yatay eksenler etrafında dönme ataletleri ihmal edilebilir;
- Ek kütle yaklaşımı, ikinci mod davranışı ve bu sebeple, ikinci mod rezonans periyodunun tahmin edilmesinde çok uygun gözükmemektedir; özellikle kısa kuleler için hata oranı artmaktadır;

2.5.3 Goyal, A. ve Chopra A.K., (1989), “Su alma kulelerinde hidrodinamik ek kütlenin basitleştirilmiş hesap yöntemi ile belirlenmesi” [2.3]

Goyal ve Chopra, bu çalışmalarında üniform elevasyonlu, fakat kesiti daire halkası dışında elips, kare, dikdörtgen olan kulelerin titreşiminde hidrodinamik davranışı temsil eden “ek kütle” yaklaşımı için formüller geliştirmişlerdir. Sonuçlar şöyle sıralanabilir:

- Sonlu uzunluktaki bir kulenin $m_a^o(z)/m_\infty^o$ normalize edilmiş ek hidrodinamik kütlesi kulenin a_o/b_o enine kesit boyutları oranı; A_o enine kesit alanı; enine kesir şekli ve H_o/a_o narinlik oranına bağlı olarak tahmin edilebilir;
- Kulenin çevresindeki suyun normalize edilmiş ek kütlesi, içerisindeki suyun normalize edilmiş ek külesinden bağlı olarak küçüktür.

2.5.4 Syprakos, C.C. ve Xu, C., (1997), “Su alma kulelerinde zemin-yapı-su karşı etkileşimi” [2.4]

Syprakos ve Xu, (2.4)’de özetlenen çalışmalarında, ek kütle yaklaşımına kule temeli altındaki zeminden ayrılmalardan ve temelin ataletinin yapının dinamik davranışına etkilerini de dahil etmişlerdir. Elde edilen başlıca sonuçlar şunlardır:

- Su-yapı karşı etkileşimi kulenin depreme davranışını etkilemektedir;
- Suyun varlığı zemin-yapı karşı etkileşiminin yapının cevabı üzerindeki önemini etkiler; basık kulelerde zemin-yapı karşı etkileşiminin etkisini azaltırken, ince kulelerde ters etkiye sahiptir;
- Temel yükselmesinin etkisi, zemin rijitliği ve kulenin narinliğine bağlı olarak yapının cevabını etkilemektedir;
- Temelin zeminden ayrılmasından dolayı, ankastre temele nisbetle, moment ve deformasyonlarda %50’den fazla azalmalar görülmektedir.

3. ÖRNEK ÇALIŞMALAR

3.1 Giriş

Göl, Haliç, körfez, büyük nehir vb alanları geçmek için kullanılan köprülerde ayakların kazıklı olması, kimi zaman doğrudan kazıkların ayak olarak kullanılması çok karşılaşılan bir uygulama türüdür. Bu tür yapılarda kazıklar su dibinde biriken ve genellikle çamur karakterinde olan sedimentleri geçer. İstanbul-Haliç köprülerindeki kazıkların zemin koşulları buna örnek gösterilebilir.

Bu tür yapılarda, kazıkların;

- Su üstünde kalan kısmında; kazığın kendi kütlesinin,
- Su içinde kalan kısmında; kazığın kendi kütlesinin, içindeki ve çevresindeki suyun hidrodinamik ek kütlelerinin,
- Çamur içinde kalan kısmında; kazığın kendi kütlesinin ve çamurun kütlesinin

dikkate alınması gerektiği düşünülmektedir.

Benzer şekilde, kumlu zeminleri geçen kazıklarda zemin boşluk suyunun dinamik katkısının olması kaçınılmazdır. Uygulamada, boşluk suyu basıncındaki değişimler dikkate alınarak, kumlu zeminlerde dinamik davranışa yer altı suyunun katkısı bir anlamda hesaba katılır. Bununla beraber, bu tür zeminlerde kazık-çevre zemini ve boşluk suyu etkileşimini açıklayan daha özel yaklaşımlara gereksinim olduğu da açıktır.

Bu çalışmada, ek kütle yaklaşımını bu tür köprü ayaklarına uygulamaya dair örneklerle yer verilmiştir. Yer altı suyunun (çamurun) hidrodinamik ek kütlesinin dikkate alınışıyla ilgili teorik yaklaşımlar yapılmamış olmakla birlikte; ek kütle yaklaşımının gerçek sonuçlardan çok farklı neticeler vermeyeceği açıktır. Bu bakımdan, bu örneklerin en azından eğilimleri belirlemede anlamlı olabileceği düşünülmüştür.

Aşağıda, önce kısım (2.4)'de özetlenen çalışmada yer alan Briones Barajı su alma kulesinin, ek kütle yaklaşımının kullanıldığı spektral modal analizi örneklenmiş; daha sonra, İstanbul-Haliç köprüleri ayaklarında olduğu gibi çamurlu zeminleri geçen ayak örneklerine yer verilmiştir.

3.2 Örnek 1

Briones Barajı su alma kulesinin; temel - temel zemini arasında sürekliliğin korunduğu varsayımıyla spektral modal analizi yapılmıştır.

Kulenin yüksekliği, $H = 70.10$ m; tepe iç yarıçapı, $(r_i)_{tepe} = 1.52$ m; tepe dış yarıçapı, $(r_d)_{tepe} = 1.86$ m; taban iç yarıçapı, $(r_i)_{taban} = 3.05$ m; taban dış yarıçapı, $(r_d)_{taban} = 3.45$ m'dir. Temelin yarıçapı, $R = 9.14$ m silindir bir daire olup, kalınlığı, $h_f = 3$ m (Referanstaki örnekte kalınlık belirtilmediğinden, bu örnekte h_f değeri 3 m olarak tahmin edilmiştir) alınmıştır. İç ve dış su yüksekliği Şekil 3.1'de gösterildiği gibidir. Tasarım spektrumu olarak, Türk Deprem Yönetmeliği'nde (Afet Bölgelerinde Yapılacak Yapılar Hakkında Yönetmelik, 1997) verilen spektrum kullanılmıştır. Bilindiği üzere alınan spektrumda, T_A ve T_B , zemin şartlarına bağlı periyotlar; T , yapının doğal titreşim periyodu olmak üzere;

$$T < T_A \text{ için } S = 1 + 1.5(T_A / T)$$

$$T = T_A \text{ için } S = 2.5$$

$$T = T_B \text{ için } S = 2.5$$

$$T > T_B \text{ için } S = 2.5(T_B / T)^{0.8}$$

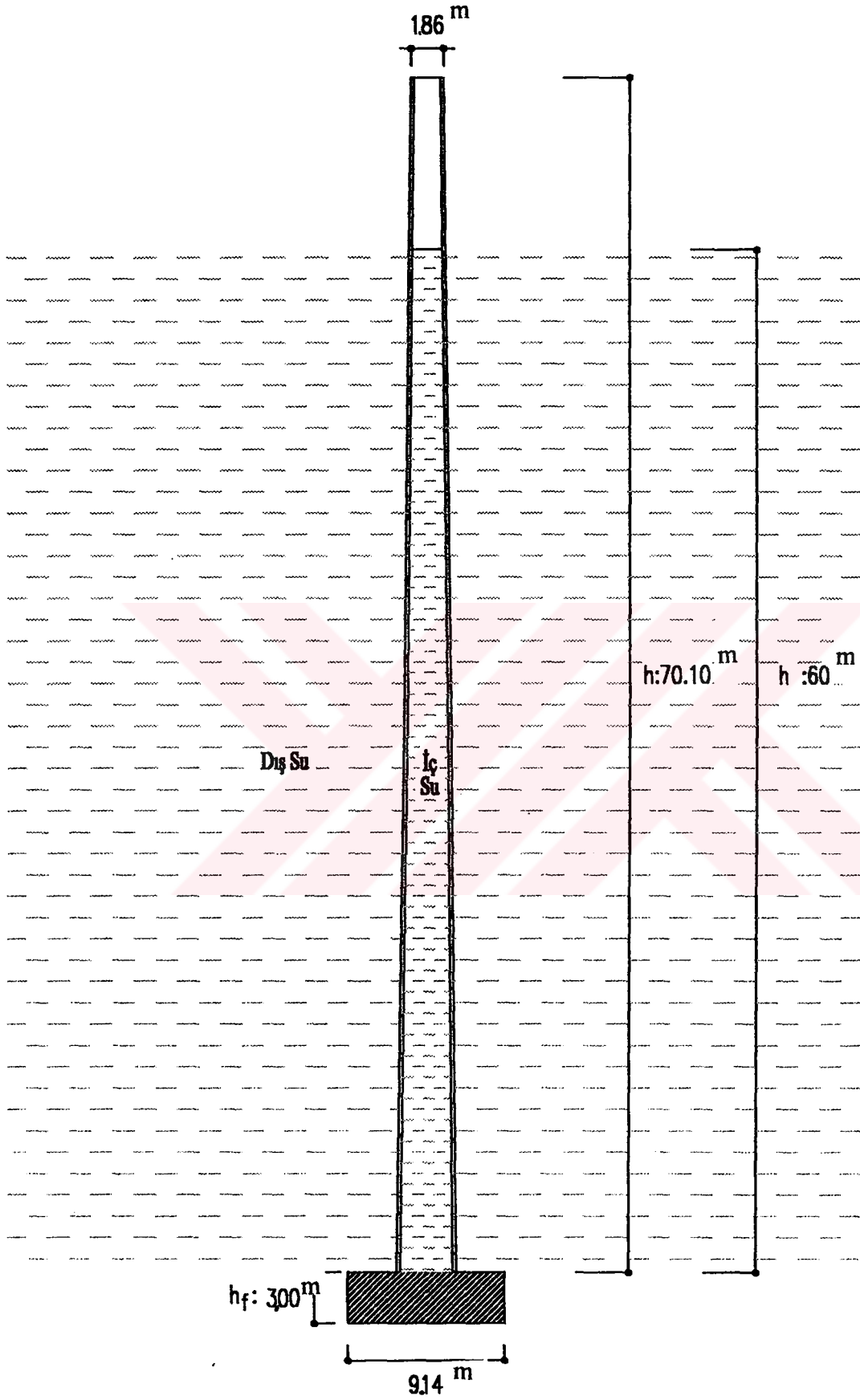
şeklinde verilmiştir. Bu örnekte, $T_A = 0.15s$, $T_B = 0.4s$, deprem hareketi maksimum ivmesi ise, orjinal problemde olduğu gibi $A = 0.33g$ alınmıştır; tasarım spektrumunda diğer bütün katsayılar 1 kabul edilmiştir.

Çözümlerde, temel plağının zeminden ayrılması ve temel plağı üzerindeki suyun, temel plağı hareketine hidrodinamik etkisi (dolayısıyla muhtemel hidrodinamik ek kütlesi) ihmal edilmiştir. Program olarak SAP90 "spec" analizi kullanılmıştır.

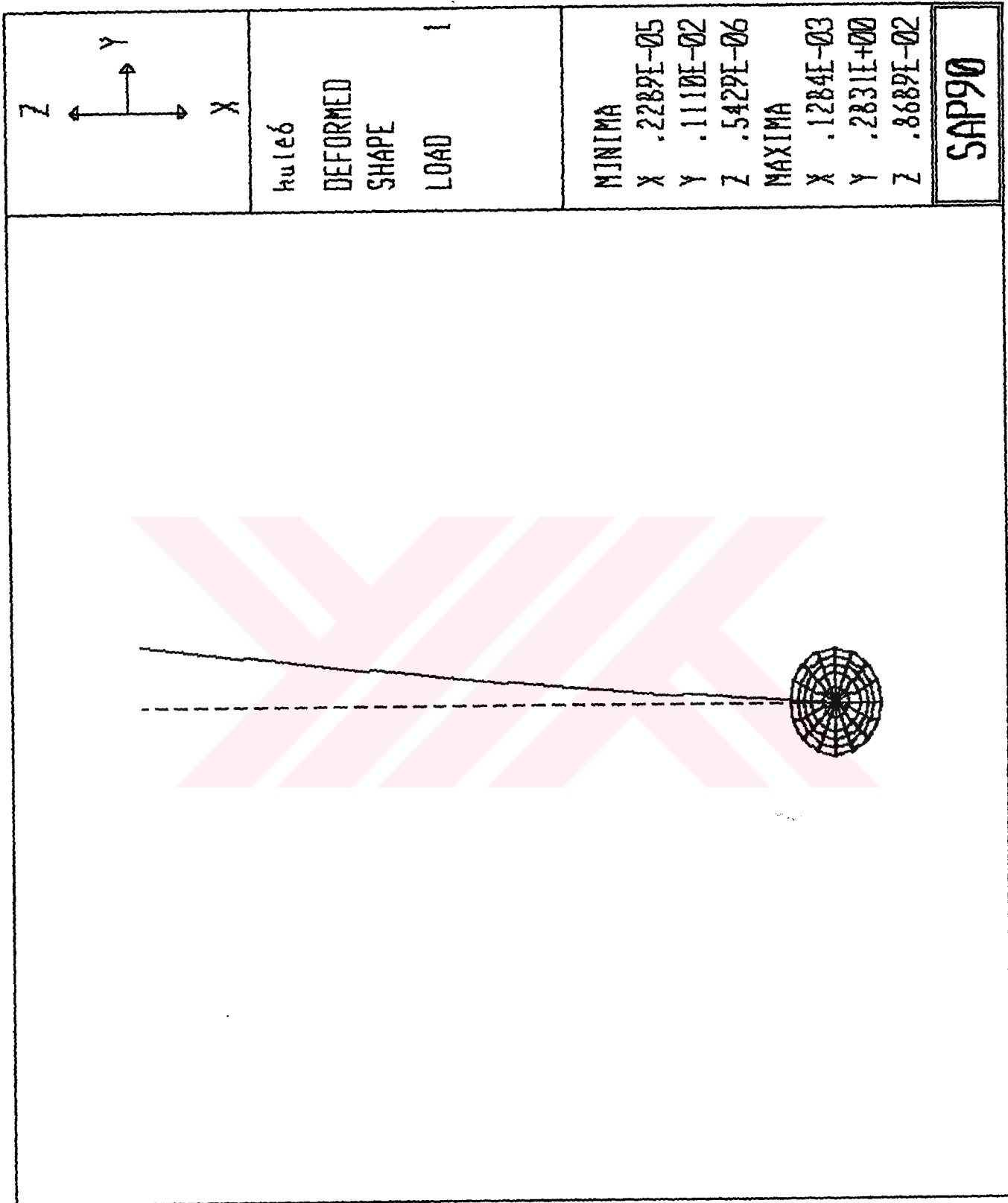
Çözümler,

- (1) İç ve dış suyun hidrodinamik katkısı bütünüyle ihmal edilmek;
- (2) İç suyun hidrodinamik ek kütlesini dikkate almak;
- (3) İç ve dış suyun hidrodinamik ek kütlesini dikkate almak;

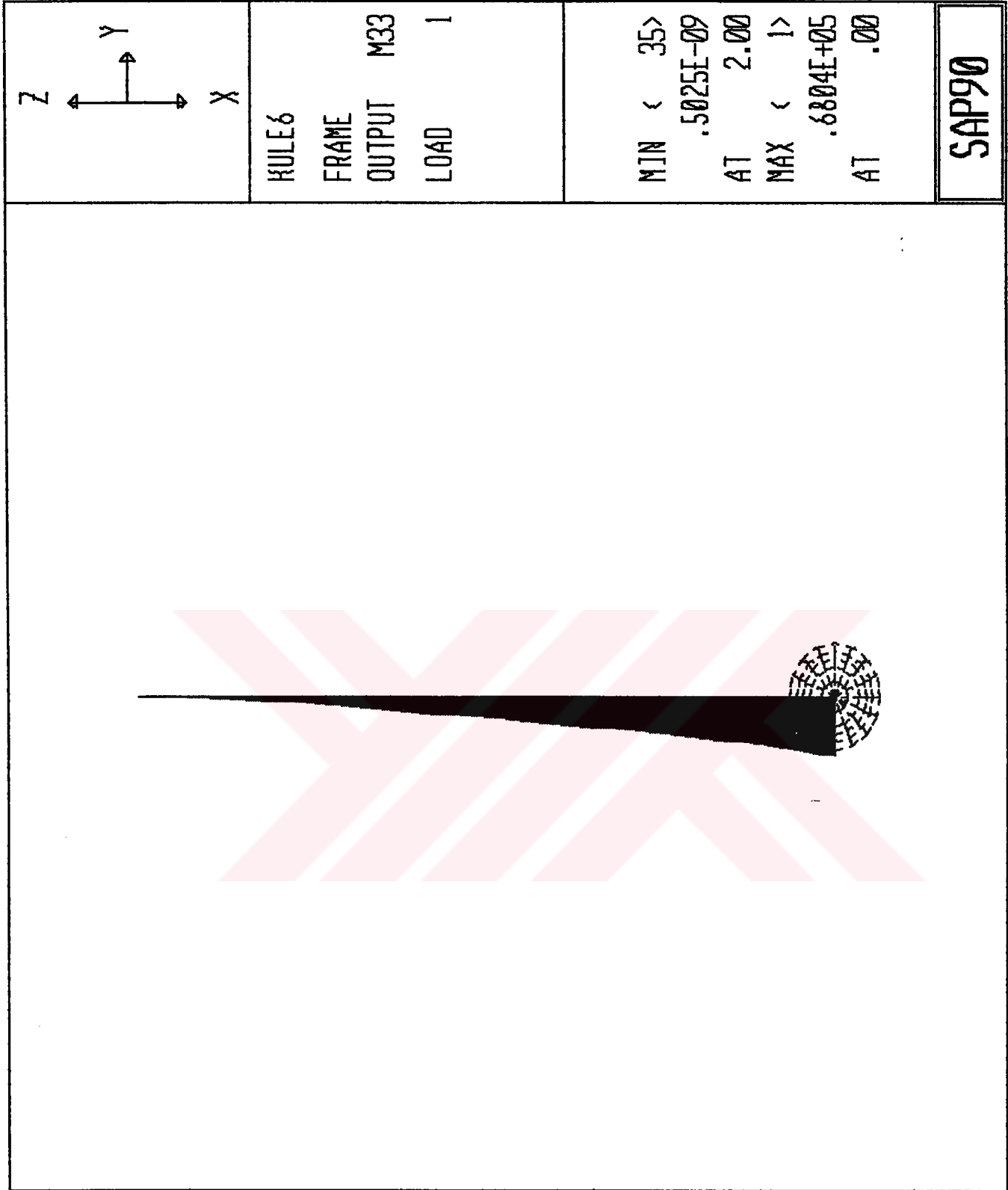
suretiyle yapılmış ve sonuçlar karşılaştırma yapılabilmek amacıyla tablo halinde Tablo 3.1'de verilmiştir.



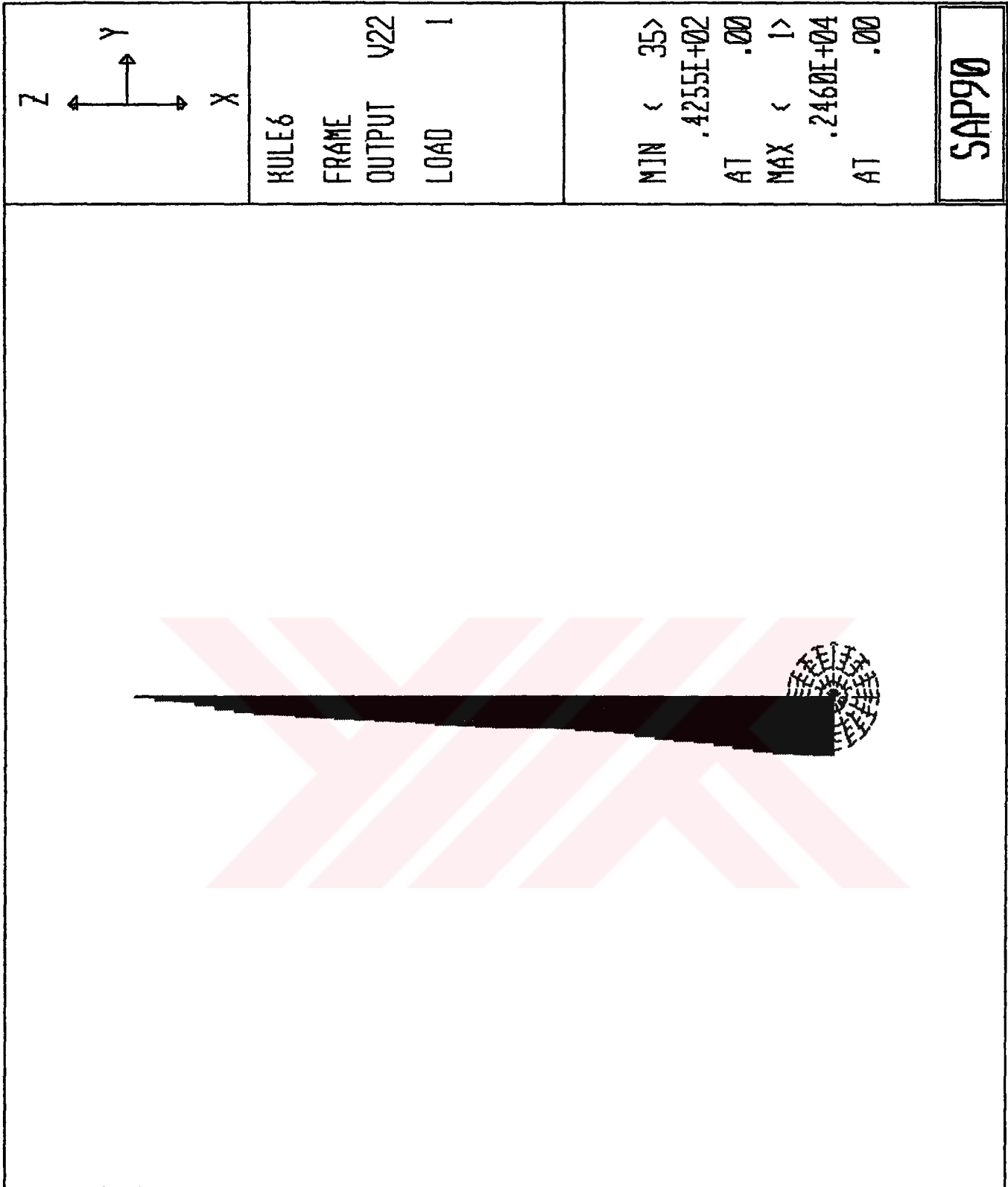
Şekil 3.1 Briones Barajı su alma kulesi boyutları



Şekil 3.2 Tabana elastik ankastre su alma kulesinde temel kütlesi ile iç ve dış suyun hidrodinamik ek kütlelerinin dahil edilmesi halinde oluşan sehimler



Şekil 3.3 Tabana elastik ankastre su alma kulesinde temel kütlesi ile iç ve dış suyun hidrodinamik ek kütlelerinin dahil edilmesi halinde oluşan momentler



Şekil 3.4 Tabana elastik ankastre su alma kulesinde temel kütlesi ile iç ve dış suyun hidrodynamic ek kütlelerinin dahil edilmesi halinde oluşan kesme kuvvetleri

TABLO 3.1 - ÖRNEK 1 SONUÇLARI

Çözüm hali	Taban kesme kuvveti V (kN)	Taban momenti M (KNm)	Tepe yanal ötelemeleri		
			(Δ) Toplam (mm)	(Δ_1) Kule sehim (mm)	(Δ_2) Temel dönmesinden (mm)
Tabana ankastre, Su yok	869	38270	92.45	92.45	—
Tabana ankastre, İç su var, dış su yok	1603	60930	139	139	—
Tabana ankastre, İç ve dış su var	2476	85550	188.8	188.8	—
Tabana elastik ankastre, Temel zemini kütlesi dahil, Su yok	906.6	32500	140.3	92.45	47.85
Tabana elastik ankastre, Temel zemini kütlesi dahil, İç su var	1676	50930	213.9	139	74.9
Tabanda elastik ankastre, Temel zemini kütlesi dahil, İç ve dış su var	2460	68040	283.10	183	100.10

3.3 Örnek 2

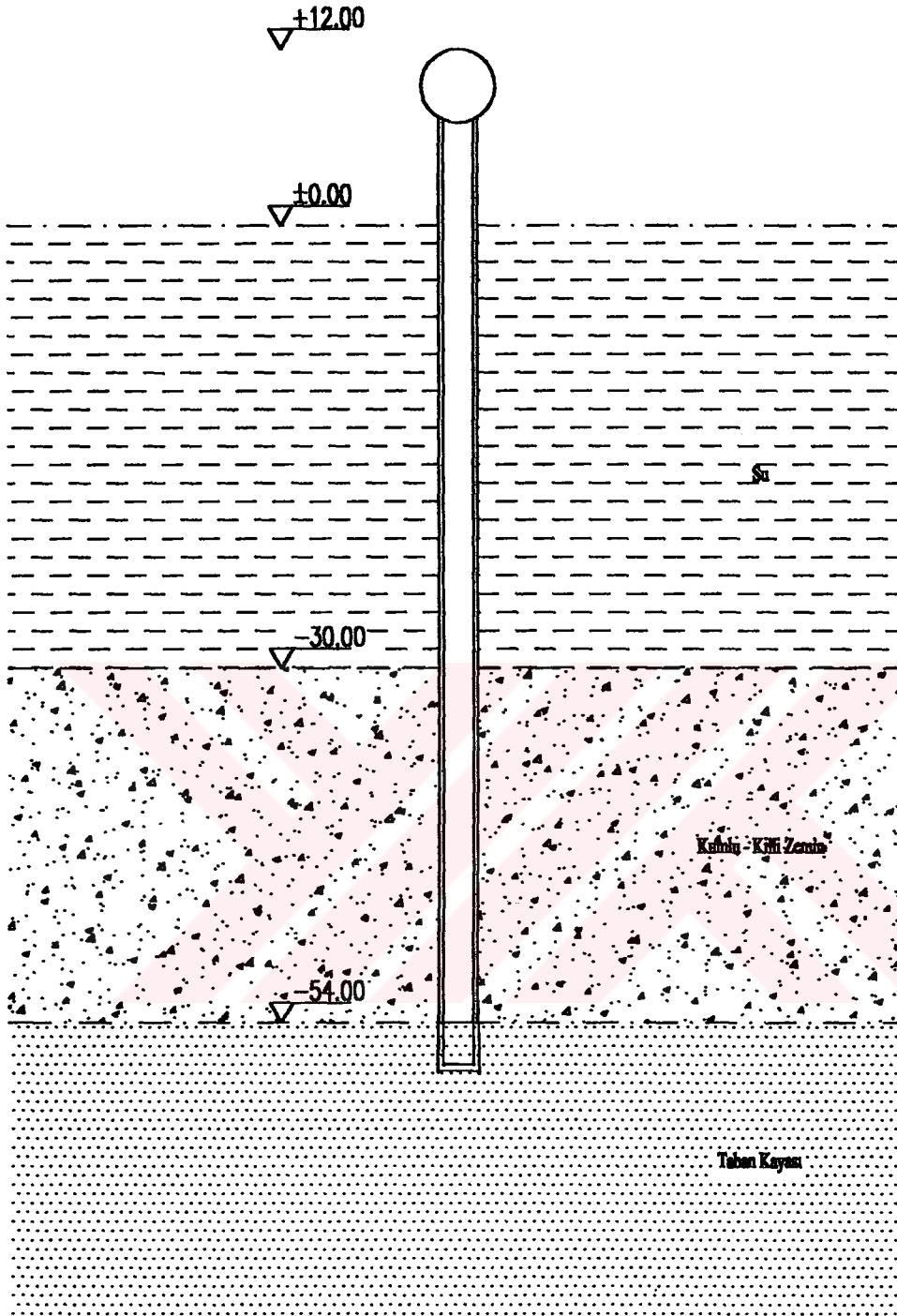
Bu örnekte, İstanbul - Haliç köprüleri ayaklarında olduğu gibi çamurlu ve kumlu zeminleri geçen üniform, silindirik kesitli bir köprü ayağının dinamik davranışları yukarıdaki örnekte olduğu gibi çeşitli parametrik durumlar için belirlenmiştir.

Örnekte dikkate alınan köprü ayağının yapısal modeli Şekil 3.3'de gösterilmiştir. Köprü ayağı, tekil bir silindirik kazıkla temsil edilmiştir. Kesiti daire halkası şeklinde olan ayağın yarıçapı, $r=1.25$; et kalınlığı, $t= 25$ mm'dir ve ayağın yüksekliği boyunca kesit aynı kalmaktadır. Köprü üst yapısının bir orta ayağa karşı gelen kütlesini temsil eden $M=60 \text{ kNs}^2/\text{m}$ 'dir. Tasarım spektrumu olarak Örnek 3.1'de verilen spektrum kullanılmıştır.

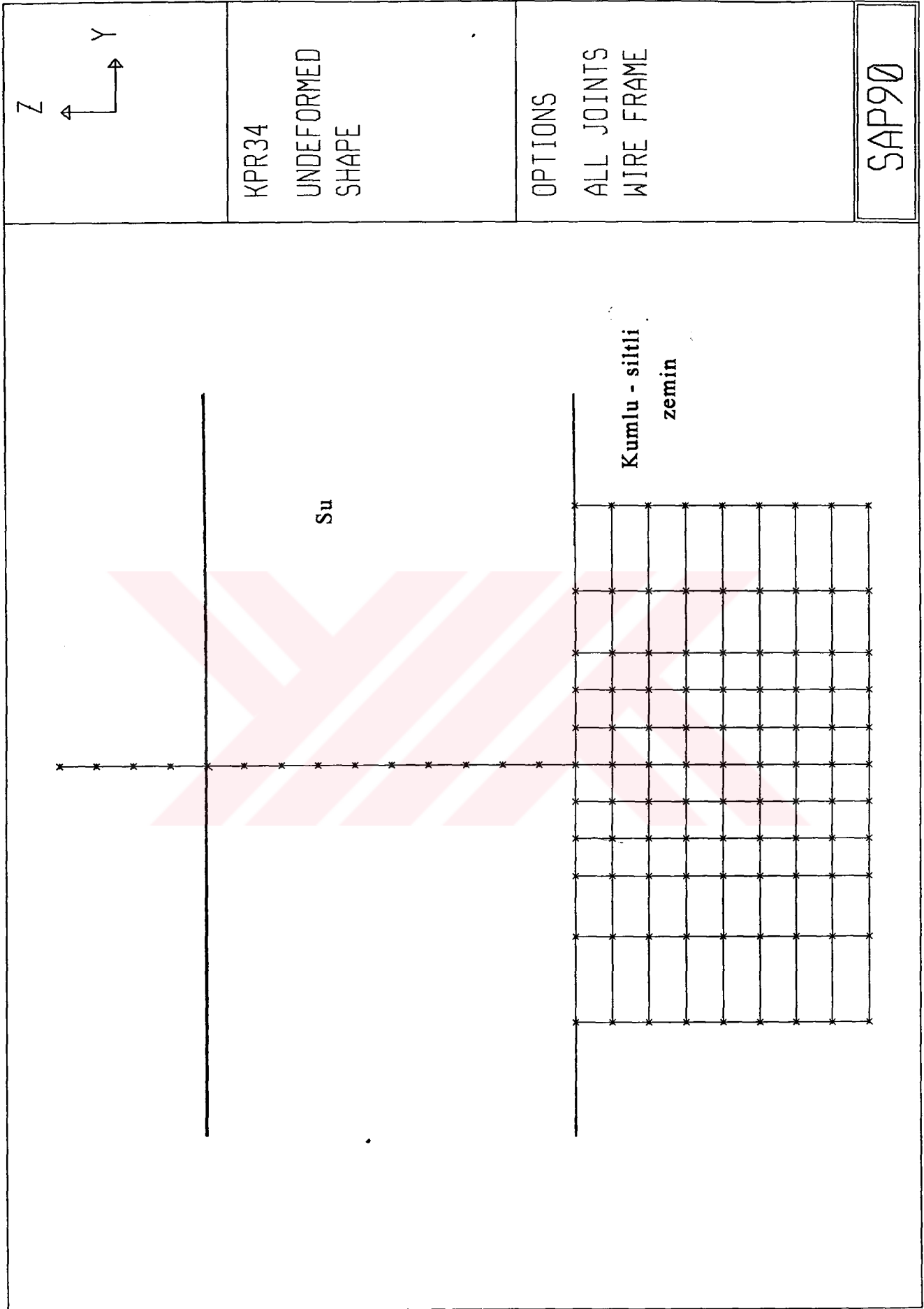
Çözümler,

- (1) Susuz ortamda temel zemini kütlesi ihmal edilerek,
- (2) Susuz ortamda temel zemini kütlesi dikkate alınarak,
- (3) İç ve dış suyun hidrodinamik etkisi dikkate alınırken, temel zemini kütlesi ihmal edilerek,
- (4) İç ve dış suyun hidrodinamik etkisi ve temel zemini kütlesi dikkate alınarak,

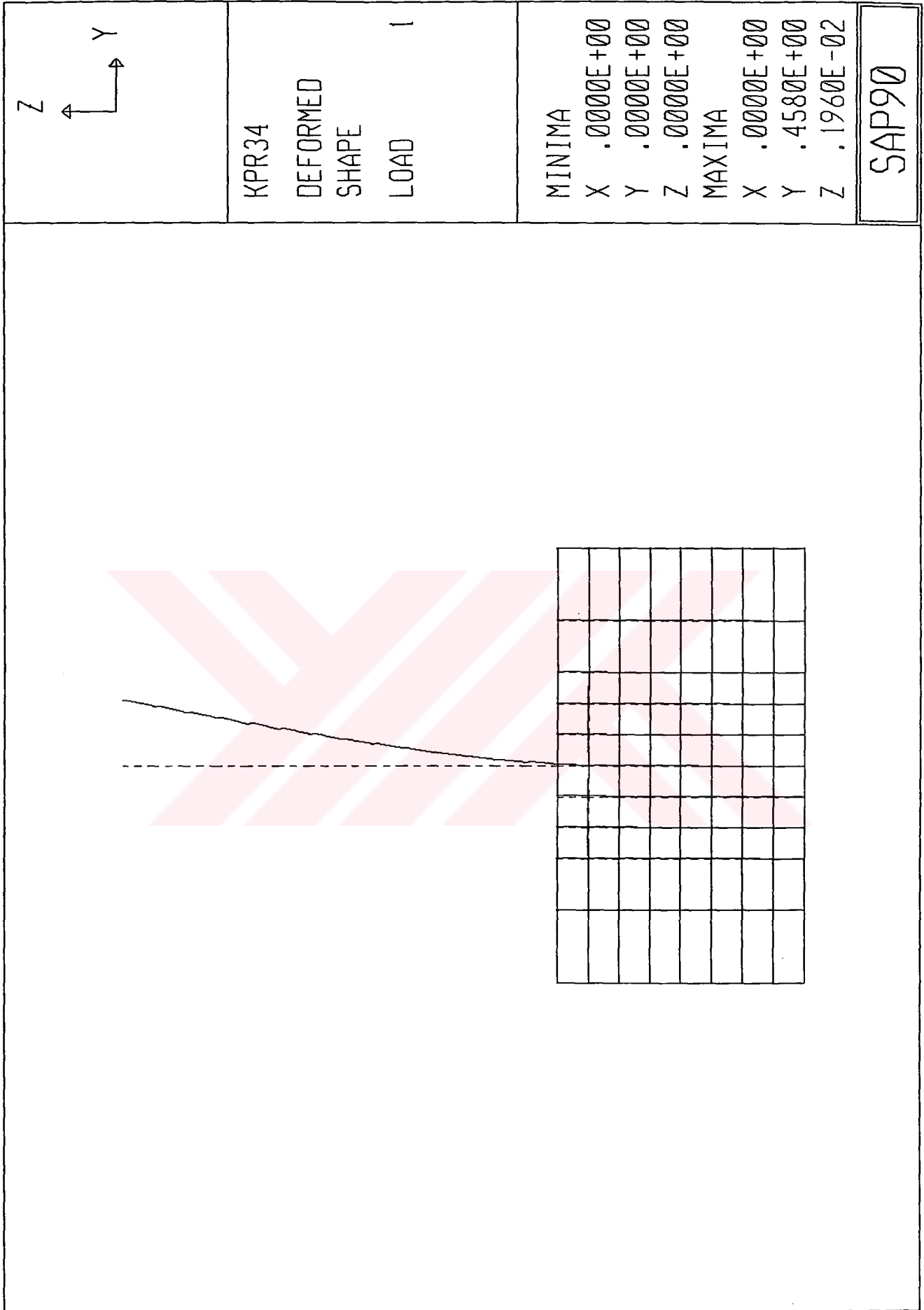
üretilmiştir. Elde edilen spektral değerler Tablo 3.2'de özetlenmiştir



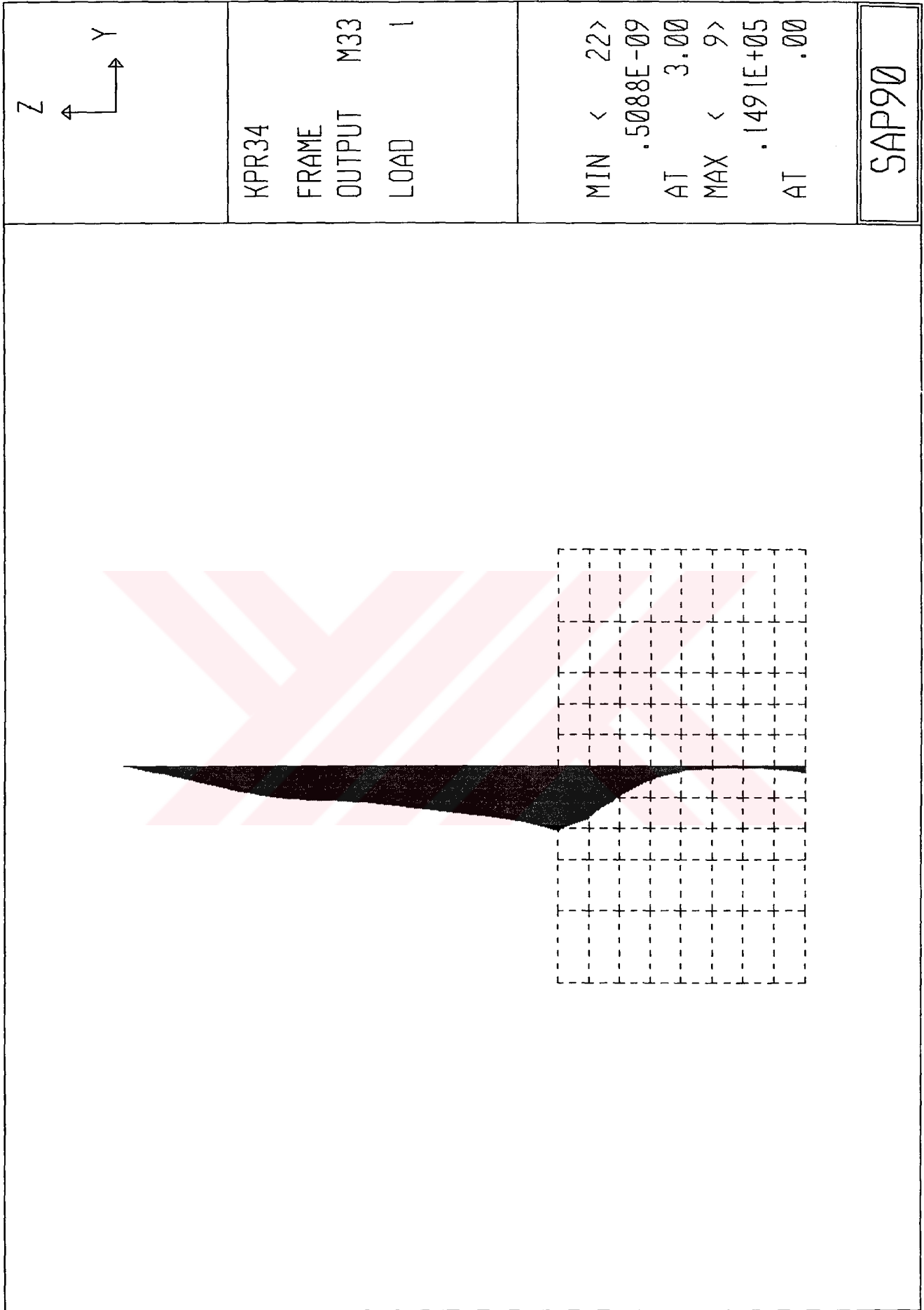
Şekil 3.5 Köprü ayağı yapısal modeli



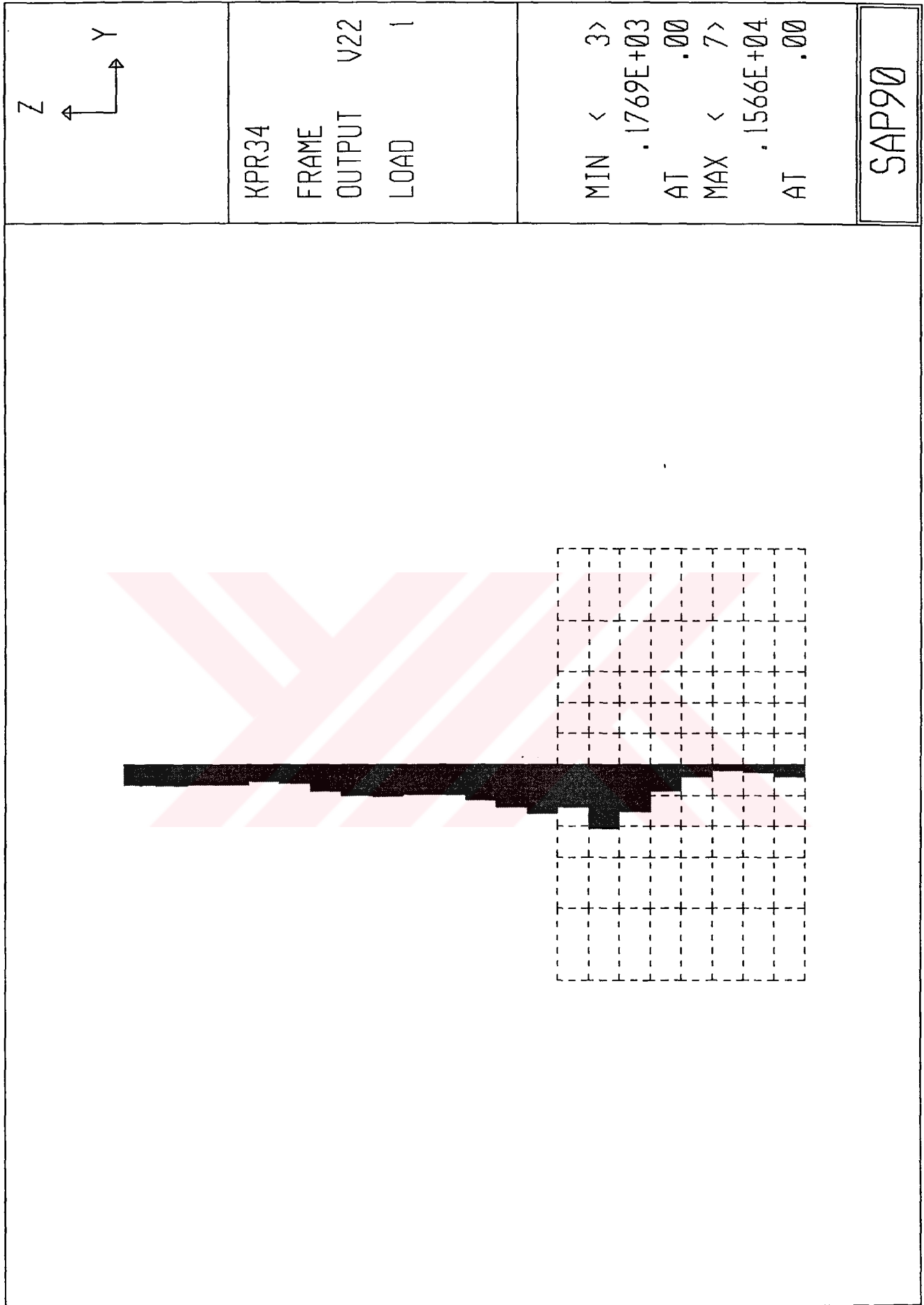
Şekil 3.6 Köprü ayağının sonlu eleman modeli



Şekil 3.7 İç ve dış hidrodinamik su kütleleri ve temel zemini kütlelerinin dahil edilmesi durumunda yapıda oluşan sehimler



Şekil 3.8 İç ve dış hidrodinamik su kütleleri ve temel zemini kütlelerinin dahil edilmesi durumunda yapıda oluşan momentler



Şekil 3.9 İç ve dış hidrodinamik su kütleleri ve temel zemini kütlelerinin dahil edilmesi durumunda yapıda oluşan kesme kuvvetleri

TABLO 3.2 - ÖRNEK 2 SONUÇLARI

Çözüm hali	Maksimum kesme kuvveti $V_{\max}$ (kN)	Maksimum moment $M_{\max}$ (KNm)	Spektral tepe sehim (Δ) (mm)
Susuz ortam, Temel zemini kütlesi ihmal	809.7	7686	263.5
Susuz ortam, Temel zemini kütlesi dahil	861.5	8136	267.5
İç ve dış su kütlesi dahil, Temel zemini kütlesi hariç	1530	14570	453.6
İç ve dış su kütlesi dahil, Temel zemini kütlesi dahil	1566	14910	458

4 SONUÇLAR

4.1 Örnek 1'den Elde Edilen Sonuçlar

Örnek 1'den elde edilen ve Tablo 3.1'de özetlenen değerlere göre;

- Hidrodinamik ek kütlenin ihmali son derece büyük hatalara, hatta yanlışlara neden olmaktadır;
- Temel fleksibilitesinin, bir başka deyimle mesnet şartlarının elastik ankastreliğinin dikkate alınması, kesme kuvvetinde büyümeye, buna mukabil taban momentinde küçülmeye neden olmaktadır. Kesme kuvvetinin büyüdüğü halde momentin küçülmesi, atalet kuvvetlerinin yapı tabanına daha yakın kümelenmesiyle açıklanabilir;
- Temel dönmesinin dikkate alınması, aynı zamanda spektral tepe deplasmanını da artırmaktadır.

4.2 Örnek 2'den Elde Edilen Sonuçlar

Tablo 3.2'de özetlenen Örnek 2 çözümlerinden elde edilen sonuçlar şöyle sıralanabilir;

- Yapının dinamik davranışı açısından yeterli sayıda olmasa da, yine de davranış farklılığına işaret eden ipuçları bulmak mümkündür;
- Hidrodinamik ek kütlenin ihmal edilmesi, ya da bu tür bir yapısal hesaba itibar edilmesi mümkün değildir; örneklerle bu gerçek bir kere daha vurgulanmaktadır;
- Temel zemini kütlesinin dikkate alınıp alınmaması sonuçları etkilemekle beraber, hidrodinamik ek kütleyle nisbetle etkilenme daha azdır; bununla beraber, temel zemini kütlesinin yapısal sistem modeline dahil edilmesi hem kesme kuvvetlerini, hem de spektral deplasmanları artırıcı yönde sonuç vermektedir.

KAYNAKLAR

- (1) Liaw, C. Y. ve Chopra A. K., (1974), “Dynamics of Towers Surrounded By Water ”, , Earthquake Engineering and Structural Dynamics, 3: 33 - 49
- (2) Goyal, A., ve Chopra, A. K. (1989), “Earthquake Response Spectrum Analysis of Intake-Outlet Towers. ” , Journal of Engineering Mechanics, 115(7) : 1413 - 1432
- (3) Chopra, A.K. ve Goyal, A., (1989), “Simplified Evaluation of Added Hydrodynamic Mass For Intake Towers” , Journal of Engineering Mechanics, 115(7) : 1393 - 1412
- (4) Syrakos, C. C. ve Xu, C., (1997), “Soil - Structure - Water Interaction of Intake - Outlet Towers Allowed to Uplift” , 16 : 151 - 159



EK

Örnek 1 ve Örnek 2’deki yapısal sistemlere ait SAP90 verileri

SU ALMA KULESİ 1 - KULE/ TABANA ANKASTRE / YÇ-DİŞ SU YOK
SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

100	X=0	Y=0	Z=0
102	X=0	Y=0	Z=2
103	Z=4		
104	Z=6		
105	Z=8		
106	Z=10		
107	Z=12		
108	Z=14		
109	Z=16		
110	Z=18		
111	Z=20		
112	Z=22		
113	Z=24		
114	Z=26		
115	Z=28		
116	Z=30		
117	Z=32		
118	Z=34		
119	Z=36		
120	Z=38		
121	Z=40		
122	Z=42		
123	Z=44		
124	Z=46		
125	Z=48		
126	Z=50		
127	Z=52		
128	Z=54		
129	Z=56		
130	Z=58		
131	Z=60		
132	Z=62		
133	Z=64		
134	Z=66		
135	Z=68		
136	Z=70		

:

RESTRAINT

100 R=1,1,1,1,1,1

:

FRAME

NM=35

1	SH=P	T=3.45, .2	E=31E7	M=5.1025 :KK
2	SH=P	T=3.41, .1991	E=31E7	M=5.011
3	SH=P	T=3.36, .1983	E=31E7	M=4.92
4	SH=P	T=3.31, .1974	E=31E7	M=4.83
5	SH=P	T=3.27, .1966	E=31E7	M=4.749
6	SH=P	T=3.22, .1957	E=31E7	M=4.65
7	SH=P	T=3.18, .1949	E=31E7	M=4.56
8	SH=P	T=3.13, .194	E=31E7	M=4.47
9	SH=P	T=3.08, .1931	E=31E7	M=4.39

10	SH=P	T=3.04,.1923	E=31E7	M=4.3
11	SH=P	T=2.99,.1914	E=31E7	M=4.21
12	SH=P	T=2.95,.1906	E=31E7	M=4.13
13	SH=P	T=2.9,.1897	E=31E7	M=4.04
14	SH=P	T=2.86,.1889	E=31E7	M=3.96
15	SH=P	T=2.81,.188	E=31E7	M=3.88
16	SH=P	T=2.77,.1871	E=31E7	M=3.79
17	SH=P	T=2.72,.1863	E=31E7	M=3.71
18	SH=P	T=2.68,.1854	E=31E7	M=3.63
19	SH=P	T=2.63,.1846	E=31E7	M=3.55
20	SH=P	T=2.59,.1837	E=31E7	M=3.47
21	SH=P	T=2.54,.1829	E=31E7	M=3.39
22	SH=P	T=2.50,.182	E=31E7	M=3.31
23	SH=P	T=2.45,.1811	E=31E7	M=3.23
24	SH=P	T=2.41,.1803	E=31E7	M=3.15
25	SH=P	T=2.36,.1794	E=31E7	M=3.07
26	SH=P	T=2.31,.1786	E=31E7	M=2.99
27	SH=P	T=2.27,.1777	E=31E7	M=2.92
28	SH=P	T=2.22,.1769	E=31E7	M=2.84
29	SH=P	T=2.18,.176	E=31E7	M=2.77
30	SH=P	T=2.13,.1751	E=31E7	M=2.69
31	SH=P	T=2.09,.1743	E=31E7	M=2.62
32	SH=P	T=2.04,.1734	E=31E7	M=2.54
33	SH=P	T=1.99,.1726	E=31E7	M=2.47
34	SH=P	T=1.95,.1717	E=31E7	M=2.39
35	SH=P	T=1.91,.1709	E=31E7	M=2.33
1,100,102	M=1	LP=3,0		
2,102,103	M=2	LP=3,0		
3,103,104	M=3	LP=3,0		
4,104,105	M=4	LP=3,0		
5,105,106	M=5	LP=3,0		
6,106,107	M=6	LP=3,0		
7,107,108	M=7	LP=3,0		
8,108,109	M=8	LP=3,0		
9,109,110	M=9	LP=3,0		
10,110,111	M=10	LP=3,0		
11,111,112	M=11	LP=3,0		
12,112,113	M=12	LP=3,0		
13,113,114	M=13	LP=3,0		
14,114,115	M=14	LP=3,0		
15,115,116	M=15	LP=3,0		
16,116,117	M=16	LP=3,0		
17,117,118	M=17	LP=3,0		
18,118,119	M=18	LP=3,0		
19,119,120	M=19	LP=3,0		
20,120,121	M=20	LP=3,0		
21,121,122	M=21	LP=3,0		
22,122,123	M=22	LP=3,0		
23,123,124	M=23	LP=3,0		
24,124,125	M=24	LP=3,0		
25,125,126	M=25	LP=3,0		
26,126,127	M=26	LP=3,0		
27,127,128	M=27	LP=3,0		
28,128,129	M=28	LP=3,0		
29,129,130	M=29	LP=3,0		
30,130,131	M=30	LP=3,0		
31,131,132	M=31	LP=3,0		
32,132,133	M=32	LP=3,0		
33,133,134	M=33	LP=3,0		
34,134,135	M=34	LP=3,0		
35,135,136	M=35	LP=3,0		

SPEC
 C DEPREM YÖNETMELİĞİ, 1997
 A=90 S=.33*9.81 D=0.05
 0 1.00
 0.15 2.50
 0.4 2.50
 0.45 2.275
 0.5 2.091
 0.55 1.938
 0.6 1.808
 0.65 1.695
 0.7 1.598
 0.75 1.512
 0.8 1.436
 0.85 1.368
 0.9 1.307
 0.95 1.251
 1 1.201
 1.10 1.113
 1.25 1.005
 1.5 0.868
 2 0.689
 2.5 0.577
 3 0.399
 3.5 0.441
 4 0.396
 4.5 0.361
 5 0.331
 :
 COMBO
 1 D=1
 :

SU ALMA KULESÿ 2 - KULE/ TABANA ANKASTRE / ŸÇ SU VAR
SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

100	X=0	Y=0	Z=0
102	X=0	Y=0	Z=2
103	Z=4		
104	Z=6		
105	Z=8		
106	Z=10		
107	Z=12		
108	Z=14		
109	Z=16		
110	Z=18		
111	Z=20		
112	Z=22		
113	Z=24		
114	Z=26		
115	Z=28		
116	Z=30		
117	Z=32		
118	Z=34		
119	Z=36		
120	Z=38		
121	Z=40		
122	Z=42		
123	Z=44		
124	Z=46		
125	Z=48		
126	Z=50		
127	Z=52		
128	Z=54		
129	Z=56		
130	Z=58		
131	Z=60		
132	Z=62		
133	Z=64		
134	Z=66		
135	Z=68		
136	Z=70		

:

RESTRAINT

100 R=1,1,1,1,1,1

:

FRAME

NM=35

1	SH=P	T=3.45, .2	E=31E7	M=5.1025+7.3 :KK+ŸSK
2	SH=P	T=3.41, .1991	E=31E7	M=5.011+7.1
3	SH=P	T=3.36, .1983	E=31E7	M=4.92+6.89
4	SH=P	T=3.31, .1974	E=31E7	M=4.83+6.69
5	SH=P	T=3.27, .1966	E=31E7	M=4.749+6.49
6	SH=P	T=3.22, .1957	E=31E7	M=4.65+6.29
7	SH=P	T=3.18, .1949	E=31E7	M=4.56+6.10
8	SH=P	T=3.13, .194	E=31E7	M=4.47+5.91
9	SH=P	T=3.08, .1931	E=31E7	M=4.39+5.72

10	SH=P	T=3.04,.1923	E=31E7	M=4.3+5.54
11	SH=P	T=2.99,.1914	E=31E7	M=4.21+5.36
12	SH=P	T=2.95,.1906	E=31E7	M=4.13+5.18
13	SH=P	T=2.9,.1897	E=31E7	M=4.04+5.01
14	SH=P	T=2.86,.1889	E=31E7	M=3.96+4.83
15	SH=P	T=2.81,.188	E=31E7	M=3.88+4.67
16	SH=P	T=2.77,.1871	E=31E7	M=3.79+4.5+
17	SH=P	T=2.72,.1863	E=31E7	M=3.71+4.34+
18	SH=P	T=2.68,.1854	E=31E7	M=3.63+4.18+
19	SH=P	T=2.63,.1846	E=31E7	M=3.55+4.02
20	SH=P	T=2.59,.1837	E=31E7	M=3.47+3.87
21	SH=P	T=2.54,.1829	E=31E7	M=3.39+3.72
22	SH=P	T=2.50,.182	E=31E7	M=3.31+3.57
23	SH=P	T=2.45,.1811	E=31E7	M=3.23+3.42
24	SH=P	T=2.41,.1803	E=31E7	M=3.15+3.28
25	SH=P	T=2.36,.1794	E=31E7	M=3.07+3.14
26	SH=P	T=2.31,.1786	E=31E7	M=2.99+3
27	SH=P	T=2.27,.1777	E=31E7	M=2.92+2.87
28	SH=P	T=2.22,.1769	E=31E7	M=2.84+2.74
29	SH=P	T=2.18,.176	E=31E7	M=2.77+2.42
30	SH=P	T=2.13,.1751	E=31E7	M=2.69+2.25
31	SH=P	T=2.09,.1743	E=31E7	M=2.62+2.03
32	SH=P	T=2.04,.1734	E=31E7	M=2.54+1.82
33	SH=P	T=1.99,.1726	E=31E7	M=2.47+1.43
34	SH=P	T=1.95,.1717	E=31E7	M=2.39+.67
35	SH=P	T=1.91,.1709	E=31E7	M=2.33+0
1,100,102	M=1	LP=3,0		
2,102,103	M=2	LP=3,0		
3,103,104	M=3	LP=3,0		
4,104,105	M=4	LP=3,0		
5,105,106	M=5	LP=3,0		
6,106,107	M=6	LP=3,0		
7,107,108	M=7	LP=3,0		
8,108,109	M=8	LP=3,0		
9,109,110	M=9	LP=3,0		
10,110,111	M=10	LP=3,0		
11,111,112	M=11	LP=3,0		
12,112,113	M=12	LP=3,0		
13,113,114	M=13	LP=3,0		
14,114,115	M=14	LP=3,0		
15,115,116	M=15	LP=3,0		
16,116,117	M=16	LP=3,0		
17,117,118	M=17	LP=3,0		
18,118,119	M=18	LP=3,0		
19,119,120	M=19	LP=3,0		
20,120,121	M=20	LP=3,0		
21,121,122	M=21	LP=3,0		
22,122,123	M=22	LP=3,0		
23,123,124	M=23	LP=3,0		
24,124,125	M=24	LP=3,0		
25,125,126	M=25	LP=3,0		
26,126,127	M=26	LP=3,0		
27,127,128	M=27	LP=3,0		
28,128,129	M=28	LP=3,0		
29,129,130	M=29	LP=3,0		
30,130,131	M=30	LP=3,0		
31,131,132	M=31	LP=3,0		
32,132,133	M=32	LP=3,0		
33,133,134	M=33	LP=3,0		
34,134,135	M=34	LP=3,0		
35,135,136	M=35	LP=3,0		

SPEC

C DEPREM YÖNETMELİ, 1997

A=90 S=.33*9.81 D=0.05

0	1.00
0.15	2.50
0.4	2.50
0.45	2.275
0.5	2.091
0.55	1.938
0.6	1.808
0.65	1.695
0.7	1.598
0.75	1.512
0.8	1.436
0.85	1.368
0.9	1.307
0.95	1.251
1	1.201
1.10	1.113
1.25	1.005
1.5	0.868
2	0.689
2.5	0.577
3	0.399
3.5	0.441
4	0.396
4.5	0.361
5	0.331

:

COMBO

1 D=1

:

SU ALMA KULESÿ 3 - KULE/ TABANA ANKASTRE / ŸÇ-Dİİ SU VAR
SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

100	X=0	Y=0	Z=0
102	X=0	Y=0	Z=2
103	Z=4		
104	Z=6		
105	Z=8		
106	Z=10		
107	Z=12		
108	Z=14		
109	Z=16		
110	Z=18		
111	Z=20		
112	Z=22		
113	Z=24		
114	Z=26		
115	Z=28		
116	Z=30		
117	Z=32		
118	Z=34		
119	Z=36		
120	Z=38		
121	Z=40		
122	Z=42		
123	Z=44		
124	Z=46		
125	Z=48		
126	Z=50		
127	Z=52		
128	Z=54		
129	Z=56		
130	Z=58		
131	Z=60		
132	Z=62		
133	Z=64		
134	Z=66		
135	Z=68		
136	Z=70		

:

RESTRAINT

100 R=1,1,1,1,1,1

:

FRAME

NM=35

1	SH=P	T=3.45,.2	E=31E7	M=5.1025+7.3+9.34 :KK+ŸSK+
2	SH=P	T=3.41,.1991	E=31E7	M=5.011+7.1+9.10
3	SH=P	T=3.36,.1983	E=31E7	M=4.92+6.89+8.86
4	SH=P	T=3.31,.1974	E=31E7	M=4.83+6.69+8.62
5	SH=P	T=3.27,.1966	E=31E7	M=4.749+6.49+8.39
6	SH=P	T=3.22,.1957	E=31E7	M=4.65+6.29+8.15
7	SH=P	T=3.18,.1949	E=31E7	M=4.56+6.10+7.93
8	SH=P	T=3.13,.194	E=31E7	M=4.47+5.91+7.7
9	SH=P	T=3.08,.1931	E=31E7	M=4.39+5.72+7.48

10	SH=P	T=3.04, .1923	E=31E7	M=4.3+5.54+7.26
11	SH=P	T=2.99, .1914	E=31E7	M=4.21+5.36+7.04
12	SH=P	T=2.95, .1906	E=31E7	M=4.13+5.18+6.62
13	SH=P	T=2.9, .1897	E=31E7	M=4.04+5.01+6.62
14	SH=P	T=2.86, .1889	E=31E7	M=3.96+4.83+6.42
15	SH=P	T=2.81, .188	E=31E7	M=3.88+4.67+6.22
16	SH=P	T=2.77, .1871	E=31E7	M=3.79+4.5+6.02
17	SH=P	T=2.72, .1863	E=31E7	M=3.71+4.34+5.82
18	SH=P	T=2.68, .1854	E=31E7	M=3.63+4.18+5.63
19	SH=P	T=2.63, .1846	E=31E7	M=3.55+4.02+5.44
20	SH=P	T=2.59, .1837	E=31E7	M=3.47+3.87+5.25
21	SH=P	T=2.54, .1829	E=31E7	M=3.39+3.72+5.07
22	SH=P	T=2.50, .182	E=31E7	M=3.31+3.57+4.89
23	SH=P	T=2.45, .1811	E=31E7	M=3.23+3.42+4.71
24	SH=P	T=2.41, .1803	E=31E7	M=3.15+3.28+4.37
25	SH=P	T=2.36, .1794	E=31E7	M=3.07+3.14+4.20
26	SH=P	T=2.31, .1786	E=31E7	M=2.99+3+4.20
27	SH=P	T=2.27, .1777	E=31E7	M=2.92+2.87+4.04
28	SH=P	T=2.22, .1769	E=31E7	M=2.84+2.74+3.88
29	SH=P	T=2.18, .176	E=31E7	M=2.77+2.42+3.05
30	SH=P	T=2.13, .1751	E=31E7	M=2.69+2.25+2.86
31	SH=P	T=2.09, .1743	E=31E7	M=2.62+2.03+2.53
32	SH=P	T=2.04, .1734	E=31E7	M=2.54+1.82+2.35
33	SH=P	T=1.99, .1726	E=31E7	M=2.47+1.43+1.91
34	SH=P	T=1.95, .1717	E=31E7	M=2.39+.67+1.23
35	SH=P	T=1.91, .1709	E=31E7	M=2.33+0+0
1,100,102		M=1	LP=3,0	
2,102,103		M=2	LP=3,0	
3,103,104		M=3	LP=3,0	
4,104,105		M=4	LP=3,0	
5,105,106		M=5	LP=3,0	
6,106,107		M=6	LP=3,0	
7,107,108		M=7	LP=3,0	
8,108,109	M=8		LP=3,0	
9,109,110	M=9		LP=3,0	
10,110,111	M=10		LP=3,0	
11,111,112	M=11		LP=3,0	
12,112,113	M=12		LP=3,0	
13,113,114	M=13		LP=3,0	
14,114,115	M=14		LP=3,0	
15,115,116	M=15		LP=3,0	
16,116,117	M=16		LP=3,0	
17,117,118	M=17		LP=3,0	
18,118,119	M=18		LP=3,0	
19,119,120	M=19		LP=3,0	
20,120,121	M=20		LP=3,0	
21,121,122	M=21		LP=3,0	
22,122,123	M=22		LP=3,0	
23,123,124	M=23		LP=3,0	
24,124,125	M=24		LP=3,0	
25,125,126	M=25		LP=3,0	
26,126,127	M=26		LP=3,0	
27,127,128	M=27		LP=3,0	
28,128,129	M=28		LP=3,0	
29,129,130	M=29		LP=3,0	
30,130,131	M=30		LP=3,0	
31,131,132	M=31		LP=3,0	
32,132,133	M=32		LP=3,0	
33,133,134	M=33		LP=3,0	
34,134,135	M=34		LP=3,0	

SPEC
C DEPREM YÖNETMELİĞİ, 1997
A=90 S=.33*9.81 D=0.05
0 1.00
0.15 2.50
0.4 2.50
0.45 2.275
0.5 2.091
0.55 1.938
0.6 1.808
0.65 1.695
0.7 1.598
0.75 1.512
0.8 1.436
0.85 1.368
0.9 1.307
0.95 1.251
1 1.201
1.10 1.113
1.25 1.005
1.5 0.868
2 0.689
2.5 0.577
3 0.399
3.5 0.441
4 0.396
4.5 0.361
5 0.331
:
COMBO
1 D=1
:

SU ALMA KULESİ 4 - KULE/ TABANA ELASTİK ANKASTRE /TEMEL K DAHİL SU

SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

100	X=0	Y=0	Z=0	
101	X=0		Z=4.57	
1	X=4.57	Y=0	Z=0	A=100,101,1,15,1,22.5
17	X=3.82414			A=100,101,17,15,1,22.5
33	X=3.2357			A=100,101,33,15,1,22.5
49	X=2.5053			A=100,101,49,15,1,22.5
65	X=1.3007			A=100,101,65,15,1,22.5
102	X=0	Y=0	Z=2	
103	Z=4			
104	Z=6			
105	Z=8			
106	Z=10			
107	Z=12			
108	Z=14			
109	Z=16			
110	Z=18			
111	Z=20			
112	Z=22			
113	Z=24			
114	Z=26			
115	Z=28			
116	Z=30			
117	Z=32			
118	Z=34			
119	Z=36			
120	Z=38			
121	Z=40			
122	Z=42			
123	Z=44			
124	Z=46			
125	Z=48			
126	Z=50			
127	Z=52			
128	Z=54			
129	Z=56			
130	Z=58			
131	Z=60			
132	Z=62			
133	Z=64			
134	Z=66			
135	Z=68			
136	Z=70			

:

SPRINGS

1,80,1	K=41570,41570,83140
100	K=41570,41570,83140

:

FRAME

NM=35

1	SH=P	T=3.45,.2	E=31E7	M=5.1025 :KK
2	SH=P	T=3.41,.1991	E=31E7	M=5.011
3	SH=P	T=3.36,.1983	E=31E7	M=4.92

4	SH=P	T=3.31, .1974	E=31E7	M=4.83
5	SH=P	T=3.27, .1966	E=31E7	M=4.749
6	SH=P	T=3.22, .1957	E=31E7	M=4.65
7	SH=P	T=3.18, .1949	E=31E7	M=4.56
8	SH=P	T=3.13, .194	E=31E7	M=4.47
9	SH=P	T=3.08, .1931	E=31E7	M=4.39
10	SH=P	T=3.04, .1923	E=31E7	M=4.3
11	SH=P	T=2.99, .1914	E=31E7	M=4.21
12	SH=P	T=2.95, .1906	E=31E7	M=4.13
13	SH=P	T=2.9, .1897	E=31E7	M=4.04
14	SH=P	T=2.86, .1889	E=31E7	M=3.96
15	SH=P	T=2.81, .188	E=31E7	M=3.88
16	SH=P	T=2.77, .1871	E=31E7	M=3.79
17	SH=P	T=2.72, .1863	E=31E7	M=3.71
18	SH=P	T=2.68, .1854	E=31E7	M=3.63
19	SH=P	T=2.63, .1846	E=31E7	M=3.55
20	SH=P	T=2.59, .1837	E=31E7	M=3.47
21	SH=P	T=2.54, .1829	E=31E7	M=3.39
22	SH=P	T=2.50, .182	E=31E7	M=3.31
23	SH=P	T=2.45, .1811	E=31E7	M=3.23
24	SH=P	T=2.41, .1803	E=31E7	M=3.15
25	SH=P	T=2.36, .1794	E=31E7	M=3.07
26	SH=P	T=2.31, .1786	E=31E7	M=2.99
27	SH=P	T=2.27, .1777	E=31E7	M=2.92
28	SH=P	T=2.22, .1769	E=31E7	M=2.84
29	SH=P	T=2.18, .176	E=31E7	M=2.77
30	SH=P	T=2.13, .1751	E=31E7	M=2.69
31	SH=P	T=2.09, .1743	E=31E7	M=2.62
32	SH=P	T=2.04, .1734	E=31E7	M=2.54
33	SH=P	T=1.99, .1726	E=31E7	M=2.47
34	SH=P	T=1.95, .1717	E=31E7	M=2.39
35	SH=P	T=1.91, .1709	E=31E7	M=2.33
1,100,102	M=1	LP=3,0		
2,102,103	M=2	LP=3,0		
3,103,104	M=3	LP=3,0		
4,104,105	M=4	LP=3,0		
5,105,106	M=5	LP=3,0		
6,106,107	M=6	LP=3,0		
7,107,108	M=7	LP=3,0		
8,108,109	M=8	LP=3,0		
9,109,110	M=9	LP=3,0		
10,110,111	M=10	LP=3,0		
11,111,112	M=11	LP=3,0		
12,112,113	M=12	LP=3,0		
13,113,114	M=13	LP=3,0		
14,114,115	M=14	LP=3,0		
15,115,116	M=15	LP=3,0		
16,116,117	M=16	LP=3,0		
17,117,118	M=17	LP=3,0		
18,118,119	M=18	LP=3,0		
19,119,120	M=19	LP=3,0		
20,120,121	M=20	LP=3,0		
21,121,122	M=21	LP=3,0		
22,122,123	M=22	LP=3,0		
23,123,124	M=23	LP=3,0		
24,124,125	M=24	LP=3,0		

```

25,125,126    M=25    LP=3,0
26,126,127    M=26    LP=3,0
27,127,128    M=27    LP=3,0
28,128,129    M=28    LP=3,0
29,129,130    M=29    LP=3,0
30,130,131    M=30    LP=3,0
31,131,132    M=31    LP=3,0
32,132,133    M=32    LP=3,0
33,133,134    M=33    LP=3,0
34,134,135    M=34    LP=3,0
35,135,136    M=35    LP=3,0

```

```

:
```

```

SHELL

```

```

NM=1

```

```

1      E=31E7  U=.15    M=2.5
1      JQ=1,2,17,18    LP=0    ETYPE=0 TH=3    G=15,4
61     JQ=65,66,100
62     JQ=66,67,100
63     JQ=67,68,100
64     JQ=68,69,100
65     JQ=69,70,100
66     JQ=70,71,100
67     JQ=71,72,100
68     JQ=72,73,100
69     JQ=73,74,100
70     JQ=74,75,100
71     JQ=75,76,100
72     JQ=76,77,100
73     JQ=77,78,100
74     JQ=78,79,100
75     JQ=79,80,100
76     JQ=16,1,32,17    G=1,4
80     JQ=79,65,100

```

```

:
```

```

SPEC

```

```

C  DEPREM YÖNETMELİ 1997

```

```

A=90 S=.33*9.81 D=0.05

```

```

0      1.00
0.15   2.50
0.4     2.50
0.45   2.275
0.5     2.091
0.55   1.938
0.6     1.808
0.65   1.695
0.7     1.598
0.75   1.512
0.8     1.436
0.85   1.368
0.9     1.307
0.95   1.251
1       1.201
1.10   1.113
1.25   1.005
1.5    0.868
2       0.689
2.5    0.577
3       0.399
3.5    0.441
4       0.396
4.5    0.361

```

SU ALMA KULESİ 5-KULE/TABANA ELASTİK ANKASTRE/ÿÇ SU VAR
SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

100	X=0	Y=0	Z=0	
101	X=0		Z=4.57	
1	X=4.57	Y=0	Z=0	A=100,101,1,15,1,22.5
17	X=3.82414			A=100,101,17,15,1,22.5
33	X=3.2357			A=100,101,33,15,1,22.5
49	X=2.5053			A=100,101,49,15,1,22.5
65	X=1.3007			A=100,101,65,15,1,22.5
102	X=0	Y=0	Z=2	
103	Z=4			
104	Z=6			
105	Z=8			
106	Z=10			
107	Z=12			
108	Z=14			
109	Z=16			
110	Z=18			
111	Z=20			
112	Z=22			
113	Z=24			
114	Z=26			
115	Z=28			
116	Z=30			
117	Z=32			
118	Z=34			
119	Z=36			
120	Z=38			
121	Z=40			
122	Z=42			
123	Z=44			
124	Z=46			
125	Z=48			
126	Z=50			
127	Z=52			
128	Z=54			
129	Z=56			
130	Z=58			
131	Z=60			
132	Z=62			
133	Z=64			
134	Z=66			
135	Z=68			
136	Z=70			

:

SPRINGS

1,80,1	K=41570,41570,83140
100	K=41570,41570,83140

:

FRAME

NM=35

1	SH=P	T=3.45,.2	E=31E7	M=5.1025+7.3	:KK+ÿSK
2	SH=P	T=3.41,.1991	E=31E7	M=5.011+7.1	
3	SH=P	T=3.36,.1983	E=31E7	M=4.92+6.89	

4	SH=P	T=3.31,.1974	E=31E7	M=4.83+6.69
5	SH=P	T=3.27,.1966	E=31E7	M=4.749+6.49
6	SH=P	T=3.22,.1957	E=31E7	M=4.65+6.29
7	SH=P	T=3.18,.1949	E=31E7	M=4.56+6.10
8	SH=P	T=3.13,.194	E=31E7	M=4.47+5.91
9	SH=P	T=3.08,.1931	E=31E7	M=4.39+5.72
10	SH=P	T=3.04,.1923	E=31E7	M=4.3+5.54
11	SH=P	T=2.99,.1914	E=31E7	M=4.21+5.36
12	SH=P	T=2.95,.1906	E=31E7	M=4.13+5.18
13	SH=P	T=2.9,.1897	E=31E7	M=4.04+5.01
14	SH=P	T=2.86,.1889	E=31E7	M=3.96+4.83
15	SH=P	T=2.81,.188	E=31E7	M=3.88+4.67
16	SH=P	T=2.77,.1871	E=31E7	M=3.79+4.5
17	SH=P	T=2.72,.1863	E=31E7	M=3.71+4.34
18	SH=P	T=2.68,.1854	E=31E7	M=3.63+4.18
19	SH=P	T=2.63,.1846	E=31E7	M=3.55+4.02
20	SH=P	T=2.59,.1837	E=31E7	M=3.47+3.87
21	SH=P	T=2.54,.1829	E=31E7	M=3.39+3.72
22	SH=P	T=2.50,.182	E=31E7	M=3.31+3.57
23	SH=P	T=2.45,.1811	E=31E7	M=3.23+3.42
24	SH=P	T=2.41,.1803	E=31E7	M=3.15+3.28
25	SH=P	T=2.36,.1794	E=31E7	M=3.07+3.14
26	SH=P	T=2.31,.1786	E=31E7	M=2.99+3
27	SH=P	T=2.27,.1777	E=31E7	M=2.92+2.87
28	SH=P	T=2.22,.1769	E=31E7	M=2.84+2.74
29	SH=P	T=2.18,.176	E=31E7	M=2.77+2.42
30	SH=P	T=2.13,.1751	E=31E7	M=2.69+2.25
31	SH=P	T=2.09,.1743	E=31E7	M=2.62+2.03
32	SH=P	T=2.04,.1734	E=31E7	M=2.54+1.82
33	SH=P	T=1.99,.1726	E=31E7	M=2.47+1.43
34	SH=P	T=1.95,.1717	E=31E7	M=2.39+.67
35	SH=P	T=1.91,.1709	E=31E7	M=2.33+0
1,100,102		M=1	LP=3,0	
2,102,103		M=2	LP=3,0	
3,103,104		M=3	LP=3,0	
4,104,105		M=4	LP=3,0	
5,105,106		M=5	LP=3,0	
6,106,107		M=6	LP=3,0	
7,107,108		M=7	LP=3,0	
8,108,109	M=8		LP=3,0	
9,109,110	M=9		LP=3,0	
10,110,111	M=10		LP=3,0	
11,111,112	M=11		LP=3,0	
12,112,113	M=12		LP=3,0	
13,113,114	M=13		LP=3,0	
14,114,115	M=14		LP=3,0	
15,115,116	M=15		LP=3,0	
16,116,117	M=16		LP=3,0	
17,117,118	M=17		LP=3,0	
18,118,119	M=18		LP=3,0	
19,119,120	M=19		LP=3,0	
20,120,121	M=20		LP=3,0	
21,121,122	M=21		LP=3,0	
22,122,123	M=22		LP=3,0	
23,123,124	M=23		LP=3,0	
24,124,125	M=24		LP=3,0	

25,125,126	M=25	LP=3,0
26,126,127	M=26	LP=3,0
27,127,128	M=27	LP=3,0
28,128,129	M=28	LP=3,0
29,129,130	M=29	LP=3,0
30,130,131	M=30	LP=3,0
31,131,132	M=31	LP=3,0
32,132,133	M=32	LP=3,0
33,133,134	M=33	LP=3,0
34,134,135	M=34	LP=3,0
35,135,136	M=35	LP=3,0

:

SHELL

NM=1

1	E=31E7	U=.15	M=2.5		
1	JQ=1,2,17,18	LP=0	ETYPE=0	TH=3	G=15,4
61	JQ=65,66,100				
62	JQ=66,67,100				
63	JQ=67,68,100				
64	JQ=68,69,100				
65	JQ=69,70,100				
66	JQ=70,71,100				
67	JQ=71,72,100				
68	JQ=72,73,100				
69	JQ=73,74,100				
70	JQ=74,75,100				
71	JQ=75,76,100				
72	JQ=76,77,100				
73	JQ=77,78,100				
74	JQ=78,79,100				
75	JQ=79,80,100				
76	JQ=16,1,32,17	G=1,4			
80	JQ=79,65,100				

:

SPEC

C DEPREM YÖNETMELİ^{ay},1997

A=90 S=.33*9.81 D=0.05

0	1.00
0.15	2.50
0.4	2.50
0.45	2.275
0.5	2.091
0.55	1.938
0.6	1.808
0.65	1.695
0.7	1.598
0.75	1.512
0.8	1.436
0.85	1.368
0.9	1.307
0.95	1.251
1	1.201
1.10	1.113
1.25	1.005
1.5	0.868
2	0.689
2.5	0.577
3	0.399
3.5	0.441
4	0.396
4.5	0.361
5	0.331

:

SU ALMA KULESİ/6/TABANA ELAST ANK/TEMEL ZEM KÜTL, YÇ VE DİNE SU VAR
SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

100	X=0	Y=0	Z=0	
101	X=0		Z=4.57	
1	X=4.57	Y=0	Z=0	A=100,101,1,15,1,22.5
17	X=3.82414			A=100,101,17,15,1,22.5
33	X=3.2357			A=100,101,33,15,1,22.5
49	X=2.5053			A=100,101,49,15,1,22.5
65	X=1.3007			A=100,101,65,15,1,22.5
102	X=0	Y=0	Z=2	
103	Z=4			
104	Z=6			
105	Z=8			
106	Z=10			
107	Z=12			
108	Z=14			
109	Z=16			
110	Z=18			
111	Z=20			
112	Z=22			
113	Z=24			
114	Z=26			
115	Z=28			
116	Z=30			
117	Z=32			
118	Z=34			
119	Z=36			
120	Z=38			
121	Z=40			
122	Z=42			
123	Z=44			
124	Z=46			
125	Z=48			
126	Z=50			
127	Z=52			
128	Z=54			
129	Z=56			
130	Z=58			
131	Z=60			
132	Z=62			
133	Z=64			
134	Z=66			
135	Z=68			
136	Z=70			

:

SPRINGS

1,80,1	K=41570,41570,83140
100	K=41570,41570,83140

:

FRAME

NM=35

1	SH=P	T=3.45,.2	E=31E7	M=5.1025+7.3+9.34 :KK+YSK+DSK
2	SH=P	T=3.41,.1991	E=31E7	M=5.011+7.1+9.10
3	SH=P	T=3.36,.1983	E=31E7	M=4.92+6.89+8.86

4	SH=P	T=3.31,.1974	E=31E7	M=4.83+6.69+8.62
5	SH=P	T=3.27,.1966	E=31E7	M=4.749+6.49+8.39
6	SH=P	T=3.22,.1957	E=31E7	M=4.65+6.29+8.15
7	SH=P	T=3.18,.1949	E=31E7	M=4.56+6.10+7.93
8	SH=P	T=3.13,.194	E=31E7	M=4.47+5.91+7.7
9	SH=P	T=3.08,.1931	E=31E7	M=4.39+5.72+7.48
10	SH=P	T=3.04,.1923	E=31E7	M=4.3+5.54+7.26
11	SH=P	T=2.99,.1914	E=31E7	M=4.21+5.36+7.04
12	SH=P	T=2.95,.1906	E=31E7	M=4.13+5.18+6.62
13	SH=P	T=2.9,.1897	E=31E7	M=4.04+5.01+6.62
14	SH=P	T=2.86,.1889	E=31E7	M=3.96+4.83+6.42
15	SH=P	T=2.81,.188	E=31E7	M=3.88+4.67+6.22
16	SH=P	T=2.77,.1871	E=31E7	M=3.79+4.5+
17	SH=P	T=2.72,.1863	E=31E7	M=3.71+4.34+
18	SH=P	T=2.68,.1854	E=31E7	M=3.63+4.18+
19	SH=P	T=2.63,.1846	E=31E7	M=3.55+4.02+5.44
20	SH=P	T=2.59,.1837	E=31E7	M=3.47+3.87+5.25
21	SH=P	T=2.54,.1829	E=31E7	M=3.39+3.72+5.07
22	SH=P	T=2.50,.182	E=31E7	M=3.31+3.57+4.89
23	SH=P	T=2.45,.1811	E=31E7	M=3.23+3.42+4.71
24	SH=P	T=2.41,.1803	E=31E7	M=3.15+3.28+4.37
25	SH=P	T=2.36,.1794	E=31E7	M=3.07+3.14+4.20
26	SH=P	T=2.31,.1786	E=31E7	M=2.99+3+4.20
27	SH=P	T=2.27,.1777	E=31E7	M=2.92+2.87+4.04
28	SH=P	T=2.22,.1769	E=31E7	M=2.84+2.74+3.88
29	SH=P	T=2.18,.176	E=31E7	M=2.77+2.42+3.05
30	SH=P	T=2.13,.1751	E=31E7	M=2.69+2.25+2.86
31	SH=P	T=2.09,.1743	E=31E7	M=2.62+2.03+2.53
32	SH=P	T=2.04,.1734	E=31E7	M=2.54+1.82+2.35
33	SH=P	T=1.99,.1726	E=31E7	M=2.47+1.43+1.91
34	SH=P	T=1.95,.1717	E=31E7	M=2.39+.67+1.23
35	SH=P	T=1.91,.1709	E=31E7	M=2.33+0+0
1,100,102		M=1	LP=3,0	
2,102,103		M=2	LP=3,0	
3,103,104		M=3	LP=3,0	
4,104,105		M=4	LP=3,0	
5,105,106		M=5	LP=3,0	
6,106,107		M=6	LP=3,0	
7,107,108		M=7	LP=3,0	
8,108,109	M=8		LP=3,0	
9,109,110	M=9		LP=3,0	
10,110,111	M=10		LP=3,0	
11,111,112	M=11		LP=3,0	
12,112,113	M=12		LP=3,0	
13,113,114	M=13		LP=3,0	
14,114,115	M=14		LP=3,0	
15,115,116	M=15		LP=3,0	
16,116,117	M=16		LP=3,0	
17,117,118	M=17		LP=3,0	
18,118,119	M=18		LP=3,0	
19,119,120	M=19		LP=3,0	
20,120,121	M=20		LP=3,0	
21,121,122	M=21		LP=3,0	
22,122,123	M=22		LP=3,0	
23,123,124	M=23		LP=3,0	
24,124,125	M=24		LP=3,0	

25,125,126	M=25	LP=3,0
26,126,127	M=26	LP=3,0
27,127,128	M=27	LP=3,0
28,128,129	M=28	LP=3,0
29,129,130	M=29	LP=3,0
30,130,131	M=30	LP=3,0
31,131,132	M=31	LP=3,0
32,132,133	M=32	LP=3,0
33,133,134	M=33	LP=3,0
34,134,135	M=34	LP=3,0
35,135,136	M=35	LP=3,0

:

SHELL

NM=1

1	E=31E7	U=.15	M=2.5		
1	JQ=1,2,17,18	LP=0	ETYPE=0	TH=3	G=15,4
61	JQ=65,66,100				
62	JQ=66,67,100				
63	JQ=67,68,100				
64	JQ=68,69,100				
65	JQ=69,70,100				
66	JQ=70,71,100				
67	JQ=71,72,100				
68	JQ=72,73,100				
69	JQ=73,74,100				
70	JQ=74,75,100				
71	JQ=75,76,100				
72	JQ=76,77,100				
73	JQ=77,78,100				
74	JQ=78,79,100				
75	JQ=79,80,100				
76	JQ=16,1,32,17	G=1,4			
80	JQ=79,65,100				

:

SPEC

C DEPREM YÖNETMELİ a.ş. 1997

A=90 S=.33*9.81 D=0.05

0	1.00
0.15	2.50
0.4	2.50
0.45	2.275
0.5	2.091
0.55	1.938
0.6	1.808
0.65	1.695
0.7	1.598
0.75	1.512
0.8	1.436
0.85	1.368
0.9	1.307
0.95	1.251
1	1.201
1.10	1.113
1.25	1.005
1.5	0.868
2	0.689
2.5	0.577
3	0.399
3.5	0.441
4	0.396
4.5	0.361
5	0.331

:

KÖPRÜ31 - ÖRNEK3.2 / SUSUZ ORTAM, TEMEL ZEMİNİ KÜTLESİ YİMAL
SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

1 X=0 Y=-21 Z=-54
89 Z=-30 G=1,89,11
2 Y=-14 Z=-54
90 Z=-30 G=2,90,11
3 Y=-9 Z=-54
9 Y=9
91 Y=-9 Z=-30
97 Y=9 Q=3,9,91,97,1,11
10 Y=14 Z=-54
98 Z=-30 G=10,98,11
11 Y=21 Z=-54
99 Z=-30 G=11,99,11
100 Y=0 Z=-27
113 Z=12 G=100,113,1

:

RESTRAINTS

1,113,1 R=1,0,0,0,1,1
1,11,1 R=1,1,1,1,1,1
12,89,11 R=1,1,1,1,1,1
22,99,11 R=1,1,1,1,1,1

:

MASSES

113 M=0,60,60

:

SHELL

NM=8

1 E=1E6 U=.20
2 E=.9E6 U=.22
3 E=.8E6 U=.24
4 E=.7E6 U=.26
5 E=.6E6 U=.28
6 E=.5E6 U=.30
7 E=.4E6 U=.32
8 E=.3E6 U=.34
1 JQ=1,2,12,13 M=1 G=10,1
11 JQ=12,13,23,24 M=2 G=10,1
21 JQ=23,24,34,35 M=3 G=10,1
31 JQ=34,35,45,46 M=4 G=10,1
41 JQ=45,46,56,57 M=5 G=10,1
51 JQ=56,57,67,68 M=6 G=10,1
61 JQ=67,68,78,79 M=7 G=10,1
71 JQ=78,79,89,90 M=8 G=10,1

:

FRAME

NM=3

1 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23 : KENDİ KÜTLESİ
2 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23
3 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23
1,6,17 LP=3,0 M=1 G=7,1,11,11
9,94,100 M=2
10,100,101 M=2 G=8,1,1,1
19,109,110 M=3 G=3,1,1,1
:

SPEC

C DEPREM YÖNETMELİĞİ

A=90 S=.33*9.81 D=0.05

0	1.00
0.15	2.50
0.4	2.50
0.45	2.275
0.5	2.091
0.55	1.938
0.6	1.808
0.65	1.695
0.7	1.598
0.75	1.512
0.8	1.436
0.85	1.368
0.9	1.307
0.95	1.251
1	1.201
1.10	1.113
1.25	1.005
1.5	0.868
2	0.689
2.5	0.577
3	0.399
3.5	0.441
4	0.396
4.5	0.361
5	0.331
:	
COMBO	
1 D=1	
:	

KÖPRÜ32 ÖRNEK2 / SUSUZ ORTAM, TEMEL ZEMİNİ KÜTLESİ DAHİL
SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

1 X=0 Y=-21 Z=-54
89 Z=-30 G=1,89,11
2 Y=-14 Z=-54
90 Z=-30 G=2,90,11
3 Y=-9 Z=-54
9 Y=9
91 Y=-9 Z=-30
97 Y=9 Q=3,9,91,97,1,11
10 Y=14 Z=-54
98 Z=-30 G=10,98,11
11 Y=21 Z=-54
99 Z=-30 G=11,99,11
100 Y=0 Z=-27
113 Z=12 G=100,113,1

:

RESTRAINTS

1,113,1 R=1,0,0,0,1,1
1,11,1 R=1,1,1,1,1,1
12,89,11 R=1,1,1,1,1,1
22,99,11 R=1,1,1,1,1,1

:

MASSES

113 M=0,60,60

:

SHELL

NM=8

1 E=1E6 U=.20 M=1.8 : ZEMİN KÜTLESİ
2 E=.9E6 U=.22 M=1.8
3 E=.8E6 U=.24 M=1.8
4 E=.7E6 U=.26 M=1.8
5 E=.6E6 U=.28 M=1.8
6 E=.5E6 U=.30 M=1.8
7 E=.4E6 U=.32 M=1.8
8 E=.3E6 U=.34 M=1.8
1 JQ=1,2,12,13 M=1 G=10,1
11 JQ=12,13,23,24 M=2 G=10,1
21 JQ=23,24,34,35 M=3 G=10,1
31 JQ=34,35,45,46 M=4 G=10,1
41 JQ=45,46,56,57 M=5 G=10,1
51 JQ=56,57,67,68 M=6 G=10,1
61 JQ=67,68,78,79 M=7 G=10,1
71 JQ=78,79,89,90 M=8 G=10,1

:

FRAME

NM=3

1 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23 : KENDİ KÜTLESİ
2 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23
3 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23
1,6,17 LP=3,0 M=1 G=7,1,11,11
9,94,100 M=2
10,100,101 M=2 G=8,1,1,1
19,109,110 M=3 G=3,1,1,1
:

SPEC

C DEPREM YÖNETMELİĞİ

A=90 S=.33*9.81 D=0.05

0	1.00
0.15	2.50
0.4	2.50
0.45	2.275
0.5	2.091
0.55	1.938
0.6	1.808
0.65	1.695
0.7	1.598
0.75	1.512
0.8	1.436
0.85	1.368
0.9	1.307
0.95	1.251
1	1.201
1.10	1.113
1.25	1.005
1.5	0.868
2	0.689
2.5	0.577
3	0.399
3.5	0.441
4	0.396
4.5	0.361
5	0.331
:	
COMBO	
1 D=1	
:	

KÖPRÜ33 ÖRNEK 2 / YÇ VE DIŞ SU DAHİL, TEMEL ZEMİNİ KÜTLESİ HARİÇ
SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

1 X=0 Y=-21 Z=-54
89 Z=-30 G=1,89,11
2 Y=-14 Z=-54
90 Z=-30 G=2,90,11
3 Y=-9 Z=-54
9 Y=9
91 Y=-9 Z=-30
97 Y=9 Q=3,9,91,97,1,11
10 Y=14 Z=-54
98 Z=-30 G=10,98,11
11 Y=21 Z=-54
99 Z=-30 G=11,99,11
100 Y=0 Z=-27
113 Z=12 G=100,113,1

:

RESTRAINTS

1,113,1 R=1,0,0,0,1,1
1,11,1 R=1,1,1,1,1,1
12,89,11 R=1,1,1,1,1,1
22,99,11 R=1,1,1,1,1,1

:

MASSES

113 M=0,60,60

:

SHELL

NM=8

1 E=1E6 U=.20
2 E=.9E6 U=.22
3 E=.8E6 U=.24
4 E=.7E6 U=.26
5 E=.6E6 U=.28
6 E=.5E6 U=.30
7 E=.4E6 U=.32
8 E=.3E6 U=.34
1 JQ=1,2,12,13 M=1 G=10,1
11 JQ=12,13,23,24 M=2 G=10,1
21 JQ=23,24,34,35 M=3 G=10,1
31 JQ=34,35,45,46 M=4 G=10,1
41 JQ=45,46,56,57 M=5 G=10,1
51 JQ=56,57,67,68 M=6 G=10,1
61 JQ=67,68,78,79 M=7 G=10,1
71 JQ=78,79,89,90 M=8 G=10,1

:

FRAME

NM=3

1 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23+4.84 :KENDİ KÜTL+YÇ SU
2 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23+4.84+5 :KENDİ KÜTL+YÇ SU+DIŞ SU
3 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23
1,6,17 LP=3,0 M=1 G=7,1,11,11
9,94,100 M=2
10,100,101 M=2 G=8,1,1,1
19,109,110 M=3 G=3,1,1,1
:

SPEC
 C DEPREM YÖNETMELİĞİ
 A=90 S=.33*9.81 D=0.05
 0 1.00
 0.15 2.50
 0.4 2.50
 0.45 2.275
 0.5 2.091
 0.55 1.938
 0.6 1.808
 0.65 1.695
 0.7 1.598
 0.75 1.512
 0.8 1.436
 0.85 1.368
 0.9 1.307
 0.95 1.251
 1 1.201
 1.10 1.113
 1.25 1.005
 1.5 0.868
 2 0.689
 2.5 0.577
 3 0.399
 3.5 0.441
 4 0.396
 4.5 0.361
 5 0.331
 :
 COMBO
 1 D=1
 :

KÖPRÜ34 ÖRNEK 2 / YÇ VE DIŞ SU YLE TEMEL ZEMYN KÜTLESY DAHYL
SYSTEM

Z=10

:

JOINTS

1 X=0 Y=-21 Z=-54
89 Z=-30 G=1,89,11
2 Y=-14 Z=-54
90 Z=-30 G=2,90,11
3 Y=-9 Z=-54
9 Y=9
91 Y=-9 Z=-30
97 Y=9 Q=3,9,91,97,1,11
10 Y=14 Z=-54
98 Z=-30 G=10,98,11
11 Y=21 Z=-54
99 Z=-30 G=11,99,11
100 Y=0 Z=-27
113 Z=12 G=100,113,1

:

RESTRAINTS

1,113,1 R=1,0,0,0,1,1
1,11,1 R=1,1,1,1,1,1
12,89,11 R=1,1,1,1,1,1
22,99,11 R=1,1,1,1,1,1

:

MASSES

113 M=0,60,60

:

SHELL

NM=8

1 E=1E6 U=.20 M=1.8 : ZEMYN KÜTLESY
2 E=.9E6 U=.22 M=1.8
3 E=.8E6 U=.24 M=1.8
4 E=.7E6 U=.26 M=1.8
5 E=.6E6 U=.28 M=1.8
6 E=.5E6 U=.30 M=1.8
7 E=.4E6 U=.32 M=1.8
8 E=.3E6 U=.34 M=1.8
1 JQ=1,2,12,13 M=1 G=10,1
11 JQ=12,13,23,24 M=2 G=10,1
21 JQ=23,24,34,35 M=3 G=10,1
31 JQ=34,35,45,46 M=4 G=10,1
41 JQ=45,46,56,57 M=5 G=10,1
51 JQ=56,57,67,68 M=6 G=10,1
61 JQ=67,68,78,79 M=7 G=10,1
71 JQ=78,79,89,90 M=8 G=10,1

:

FRAME

NM=3

1 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23+4.84 : KENDY KÜTL+YÇ SU
2 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23+4.84+5 : KENDY KÜTL+YÇ SU+DIŞ SU
3 SH=P T=2.5,0.02 E=2E8 M=1.23 : KENDY KÜTL
1,6,17 LP=3,0 M=1 G=7,1,11,11
9,94,100 M=2
10,100,101 M=2 G=8,1,1,1
19,109,110 M=3 G=3,1,1,1

:

SPEC

C DEPREM YÖNETMELİĞİ

A=90 S=.33*9.81 D=0.05

0	1.00
0.15	2.50
0.4	2.50
0.45	2.275
0.5	2.091
0.55	1.938
0.6	1.808
0.65	1.695
0.7	1.598
0.75	1.512
0.8	1.436
0.85	1.368
0.9	1.307
0.95	1.251
1	1.201
1.10	1.113
1.25	1.005
1.5	0.868
2	0.689
2.5	0.577
3	0.399
3.5	0.441
4	0.396
4.5	0.361
5	0.331
:	
COMBO	
1 D=1	
:	

ÖZGEÇMİŞ

Doğum Tarihi 17.11.1974

Doğum Yeri Samsun

Lise 1988 - 1991

Ordu Lisesi

Lisans 1991 - 1995

Yıldız Teknik Üniversitesi İnşaat Fakültesi

İnşaat Mühendisliği Bölümü



TC YÜKSEKÖĞRETİM KURULU
DOKÜMAN YAYIN MERKEZİ