İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA TEMELLERİNİN TASARIMI VE TİTREŞİMLERİN YALITIMI

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ferhat GÜL

Anabilim Dalı: İnşaat Mühendisliği

Programı: Yapı Mühendisliği

OCAK 2007

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

MAKİNA TEMELLERİNİN TASARIMI VE TİTREŞİMLERİN İZOLASYONU

YÜKSEK LİSANS TEZİ

İnş. Müh. Ferhat GÜL
(501041046)

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 25 Aralık 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 30 Ocak 2007

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Turgut ÖZTÜRK
Diğer Jüri Üyeleri: Doç.Dr. Necdet TORUNBALCI
Yrd.Doç.Dr. Kutlu DARILMAZ (İ.T.Ü.)

OCAK 2007

ÖNSÖZ

Tez çalışmalarım boyunca ilgi, teşvik ve bilgilerinden yararlandığım tez danışmanım ve değerli hocam Doç. Dr. Turgut ÖZTÜRK' e teşekkürü bir borç bilirim.

Ocak-2007

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR vı
TABLO LİSTESİ vıı
ŞEKİL LİSTESİ vııı
SEMBOL LİSTESİ xıı
ÖZET xıv
SUMMARY xv

1. GİRİŞ 1
1.1. Makina Temellerinin Önemi 1
1.2. Amaç ve Kapsam 2

2. YAPI DİNAMİĞİ İLE İLGİLİ ÖZET BİLGİLER 4
2.1. Giriş 4
2.2. Zorlayıcı Tesir – Dinamik Kuvvet Tesirleri 4
2.3. Serbestlik Derecesi 5
2.4. Bir Serbestlik Dereceli Sistemler 5
2.4.1. Sönümsüz Sistemlerin Serbest Titreşimleri 7
2.4.2. Sönümsüz Sistemlerin Zorlanmış Titreşimleri 7
2.4.3. Sönümlü Sistemlerin Serbest Titreşimleri 14
2.4.4. Sönümlü Sistemlerin Zorlanmış Titreşimleri 17
2.5. Çok Serbestlik Dereceli Sistemler 20
2.5.1. Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Serbest Titreşimleri 21
2.5.2. Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Zorlanmış Titreşimleri 22
2.6. İki Serbestlik Dereceli Sistemler 23
2.6.1. Serbest Titreşim Durumu 24
2.6.2. Zorlanmış Titreşim Durumu 25

3. MAKİNALARIN VE MAKİNA TEMELLERİNİN TİPLERİ 28
3.1. Makina Tipleri 28
3.1.1. İmpakt Kuvveti Oluşturan Makinalar 28
3.1.2. Çok Düşük Hızlı Makinalar 28
3.1.3. Düşük Hızlı Makinalar 28
3.1.4. Devir Sayıları Dakikada 600- 1500 Arasında Olan Makinalar 28
3.1.5. Yüksek Devirli Makinalar 28
3.2. Makina Temellerinin Tipleri 29
3.3. Temel Tipinin Seçimi 30
3.4. Makina Temelinin Kabul Edilebilecek Titreşim Genlikleri 30
3.5. Zemin ve Zemin Yay Katsayıları 31

4. BLOK TİPİ MAKİNA TEMELLERİ 33
4.1. Blok Temellerin Hesabı 33

4.2. Diferansiyel Denklemlerin Çözümü 35
4.2.1. Düşey Titreşimler 35
4.2.2. Düşey Eksen Etrafında Dönme Hareketi 36
4.2.3. Kayma ve Sallanma Hareketi 36

5.PİSTONLU MAKİNALARIN TEMELLERİ 38
5.1. Temele Etkiyen Kuvvetler 38
5.2. Sönümleyiciler Üzerine Oturan Temeller 40
5.2.1. Sönümleyicilerin Kısa Teorisi 40

6. İMPAKT TESİRLERİNE MARUZ TEMELLER 42
6.1. Zemin Üzerine Oturan Temellerin Hesabı 42
6.1.1. Temelin Minimum Ağırlığının ve Gerekli Oturma Alanının Tespit Edilmesi 42
6.1.2. Düşey Titreşimlerin Hesabı 43
6.1.3. Kesit Hesapları 46

7. YÜKSEK HIZLI MAKİNALAR İÇİN ÇERÇEVE TEMELLER 51
7.1. Dinamik Analiz 52

8. TİTREŞİMLERİN SÖNÜMLENMESİ VE YALITIMI 54
8.1. Titreşimlerin Sönümlenmesi 55
8.2. Sönümleyici Çeşitleri 58
8.2.1. Çelik Ya da Metal Yastıklar 58
8.2.2. Mantar 60
8.2.3. Kauçuk 61
8.2.4. Ahşap 62
8.2.5. Neopren 62
8.2.6. Pnömatik Sönümleyici 62
8.3. Sönümleyiciler Üzerindeki Temel İçin Tasarım Prosedürü 64
8.4. Hendek Bariyerler İle Titreşimlerin Yalıtımı 64
8.4.1. Hendek Bariyerler 66
8.4.2. Kazık Bariyerler 71
8.5. Hendek Bariyerler İle İlgili Yapılan Sayısal Çalışmalar 73
8.5.1. Açık Hendekler İle Makina Temellerinin Aktif Yalıtımı 73
8.5.2. Dolgulu Hendek Bariyerler İle Makina Temellerinin Aktif Yalıtımı 93
8.5.3. Makina Temellerinde Titreşimlerin Periyodik Hendekler İle Yalıtımı 112
8.6. Açık ve Dolgulu Hendeklerin Yalıtım Etkinliği Açısından Karşılaştırması 123
8.7. Uygulamalar 126

9. MAKİNA TEMELLERİNİN YAPIM DETAYLARI **133**
9.1. Temel Betonunun Dökülmesi 133
9.2. Donatı Düzenlemesi 133
9.3. Birleşim Elemanları 136

10. SONUÇLAR VE TARTIŞMA **138**

KAYNAKLAR **142**

ÖZGEÇMİŞ **144**

KISALTMALAR

DBÇ	: Dinamik Büyütme Çarpanı
GAF	: Genlik Azalması Faktörü
BEST3D	: Banerjee ve Ahmad (1985) ve Ahmad (1986) tarafından raporlanan Üç Boyutlu Sınır Elemanlar Metodu Kodu
BENAS	: BEST3D nin geliştirilmiş versiyonu

TABLO LİSTESİ

No		Sayfa
Tablo 3.1	Makina tiplerine göre sınır titreşim genlikleri ……...…	31
Tablo 3.2	Müsaade edilen C_z değerleri …….....	32
Tablo 6.1	Minimum temel kalınlığı ……..….	43
Tablo 8.1	Test sahasında Rayleigh dalgası uzunlukları ve hızları ……...	67
Tablo 8.2	Sınır elemanlar sonuçları ile tasarım formülünün karşılaştırılması .	90
Tablo 8.3	Woods'un saha testi verileri ile tasarım formülünün karşılaştırılması …….……..	90
Tablo 8.4	Dairesel temellerin aktif yalıtımı için tasarım formülü ile sınır elemanlar yönteminin karşılaştırması ……..	93

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1 : Dinamik zorlayıcı kuvvetler …..... 5
Şekil 2.2 : Bir serbestlik dereceli sönümlü sistemin dış kuvvet ve mesnet hareketi ile zorlanması …….. 6
Şekil 2.3 : Dinamik büyütme çarpanı – Sinüzoidal kuvvet hali …… 10
Şekil 2.4 : Sönümsüz sistemde rezonans ……... 11
Şekil 2.5 : Dönme hareketinde merkez kaç kuvvetinin eksantrik kütleye etkisi ……. 12
Şekil 2.6 : Dönme hareketinde dinamik büyütme çarpanı …… 13
Şekil 2.7 : Serbest titreşimler halinde sönüm eğrisi ……..... 16
Şekil 2.8 : Kritik sönüm altı hareket …… 16
Şekil 2.9 : Başlangıç yer değiştirmesi ile sistemin üç sönüm hali için davranışı ……..…….. 17
Şekil 2.10 : Bir serbestlik dereceli sönümlü sistemin sabit kuvvet ve dönen kütle halinde mukabelesi …… 19
Şekil 2.11 : Sönümsüz iki serbestlik dereceli sistem ……..…… 23
Şekil 2.12 : Sönümsüz İki Serbestlik Dereceli Bir Sistem İçin $k_2/m_2 = k_1/m_1$ ve $m_2/m_1 = 0.2$ olması hali için $\chi_1(\eta)$ ve $\chi_2(\eta)$ değişim eğrisi …… 27
Şekil 3.1 : Makina temellerinin tipleri a) Blok tipi b) Sandık tipi c) Duvar tipi d) Çerçeve tipi …… 29
Şekil 4.1 : Titreşen kuvvetlere maruz temelin xz düzleminde deplasmanları 33
Şekil 4.2 : Çeşitli mesnetler üzerine oturan temel için s değerleri a) Zemin üzerine b) Elastik yatak üzerine c) Yaylar üzerine d) Kazıklar üzerine ……..…… 35
Şekil 5.1 : Atalet kuvvetlerinin dağılımı ……..... 38
Şekil 5.2 : Sönümleyicilerin etkinlik bölgesi …….…….. 41
Şekil 6.1 : Tipik Şahmerdan Temeli a) Elastik mesnetler üzerinde b) Zemin üzerinde ……. 42
Şekil 6.2 : Dinamik analiz için örs ve temelin teşkil ettiği model sistemi …. 44
Şekil 6.3 : Bir şahmerdan temelinde donatım şekli a) Örs bloğu b) Betonarme temel ……. 47
Şekil 6.4 : Bir şahmerdan temeline etkiyen kuvvetler a) A-A kesiti b) Plan ……. 47
Şekil 6.5 : Örsün temel tabanına oturması a) Rijit olarak b) Arada elastik tabaka olmak üzere ……. 48
Şekil 6.6 : Yaylar üzerine oturan şahmerdan temeli a) Koç b) Örs c) Üst temel bloğu d) Yay tabakası e) Alt temel bloğu f) Zeminin teşkil ettiği yay tabakası …….. 48
Şekil 6.7 : Kutuları içinde yaylardan oluşan sönümleyici……... 49
Şekil 6.8 : 3, 4 tonluk dövme şahmerdanın temeli a) y-y kesiti b) x-x kesiti c) Plan ……. 49
Şekil 6.9 : Yaylar üzerine oturan 3, 4 tonluk şahmerdanın temeli a) y-y kesiti b) B-B seviyesinde plan …… 50
Şekil 7.1 : Tipik çerçeve temel a) Alt döşeme b) Kolon c) Üst döşeme ……. 51

Şekil 7.2 : Türbo jeneratörlerin makina holünde yerleştirilmesi
a) Boyuna düzen b) Enine Düzen …….. 51
Şekil 7.3 : Türbo jeneratör için çerçeve temel
a) Türbin b) Jeneratör c) Çerçeve temel …… 52
Şekil 8.1 : a) Sönümleyiciler üzerinde bir temelin şematik diyagramı
: b) Temel sönümleyici sisteminin eşdeğer iki yay kütle sistemi
: c) Serbest cisim diyagramı …… 55
Şekil 8.2 : Bir yaya sahip yay absorber a) Housing ile
: b) Housing olmadan ……. 59
Şekil 8.3 : Multi yay sönümleyici……..…… 59
Şekil 8.4 : Asılmış tip sönümleyici ile makina temeli …….. 59
Şekil 8.5 : Tipik mantar sönümleyici kullanımı a) Hafif makinalarda yükün mantara aktarılması için kanallar kullanımı b) Ağır makina ve temeller için mantarın sürekli tabakası c) Tabanın altındaki temel üzerinde yalıtım için mantar …… 60
Şekil 8.6 : Kauçuk yastıklar a) İki metal plaka arasında b) Oyuk silindir formu c) Çelik şitler ile çevrelenmiş ……. 62
Şekil 8.7 : Multi tabakalı ahşap yastıklar a) İki tabakalı b) Üç tabakalı 62
Şekil 8.8 : Pnömatik sönümleyicinin çalışma prensibi ……..…… 63
Şekil 8.9 : Titreşim kaynağı çevresine dairesel hendek kullanarak titreşim yalıtımı – Aktif yalıtım…. ……..…….. 65
Şekil 8.10 : Pasif yalıtım ……. 66
Şekil 8.11 : Aktif yalıtım için genlik azalması faktörü diyagramları a) Tam daire hendek b) Daire parçası hendek …….. 68
Şekil 8.12 : Pasif yalıtım testleri için test sahasının şematik gösterimi ….. 69
Şekil 8.13 : Pasif yalıtım için genlik azalması faktörü diyagramları ……... 70
Şekil 8.14 : Silindirik boş bariyerler için parametreler …… 72
Şekil 8.15 : Kazık çapı ve kazıklar arası boşluğun fonksiyonu olarak yalıtım etkinliği ……. 72
Şekil 8.16 : Açık hendekler ile aktif yalıtım a) Kesit b) Plan …….. 75
Şekil 8.17 : Sınır eleman modeli a) Zemin yüzeyi b) Açık hendek modeli …. 76
Şekil 8.18 : Açık hendeklerle parçalar bütünü yakınsaklığı çalışması (B_f=1, L'=1.8, W=0.1 D=1) ……. 77
Şekil 8.19 : Zemin profili ve Woods'un saha testi için zemin özellikleri (Woods 1968) ……..…….. 78
Şekil 8.20 : Açık hendekle aktif yalıtım için karşılaştırma (L'=0.726, W=0.182, D=1.452, f=300 hz.) ……... 79
Şekil 8.21 : Kaynak ve hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzunluk L nin B_f=0.1 için genlik azalması üzerindeki etkisi …… 81
Şekil 8.22 : Kaynak ve hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzunluk L nin B_f=0.3 için genlik azalması üzerindeki etkisi …… 81
Şekil 8.23 : Kaynak ve hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzunluk L nin B_f=0.5 için genlik azalması üzerindeki etkisi …… 82
Şekil 8.24 : Kaynak ve hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzunluk L nin B_f=1.0 için genlik azalması üzerindeki etkisi …… 82
Şekil 8.25 : Kaynak ve hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzunluk L nin B_f=2.5 için genlik azalması üzerindeki etkisi …… 83
Şekil 8.26 : Normalleştirilmiş Pabuç Yarıçapı B_f nin (D=1) genlik azalması üzerindeki etkisi …… 83
Şekil 8.27 : Rijit dairesel temelin dik harmonik titreşimlerinden dolayı

yüzey yer değiştirmesi …….. 85
Şekil 8.28 : Zeminin Poisson oranının genlik azalması üzerindeki etkisi …..... 86
Şekil 8.29 : Daire parçası hendek ve perdeleme bölgesi için plan görünüşü ... 87
Şekil 8.30 : Daire parçası hendeğin açısal uzunluğunun perdeleme etkisi üzerine etkisi ……. 88
Şekil 8.31 : Açık hendekler ile dairesel temelin aktif yalıtımı a) Plan b) A-A kesiti ……. 92
Şekil 8.32 : Dolgulu hendeklerle aktif yalıtım a) Kesit b) Plan …….. 96
Şekil 8.33 : (W=0.3, D=1, L= B_f) ile beton bariyer için genlik azalması üzerinde normalleştirilmiş pabuç yarıçapı B_f nin etkisi …… 98
Şekil 8.34 : (V_{sb} /V_{ss} =5) ile beton bariyer için kaynak ile dolgulu hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzaklık L nin etkisi ……... 99
Şekil 8.35 : (V_{sb} /V_{ss} =7.5) ile beton bariyer için kaynak ile dolgulu hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzaklık L nin etkisi ……..…….. 99
Şekil 8.36 : (V_{sb} /V_{ss} =10) ile beton bariyer için kaynak ile dolgulu hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzaklık L nin etkisi ……..…….. 100
Şekil 8.37 : (V_{sb} /V_{ss} =20) ile beton bariyer için kaynak ile dolgulu hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzaklık L nin etkisi ……..…….. 101
Şekil 8.38 : Optimum aralıktaki L ve W=0.3 ile beton bariyer için (D) normalleştirilmiş hendek derinliğinin genlik azalmasına etkisi 102
Şekil 8.39 : Optimum aralıktaki L ve W=0.5 ile beton bariyer için (D) normalleştirilmiş hendek derinliğinin genlik azalmasına etkisi ...102
Şekil 8.40 : Optimum aralıktaki L ile beton bariyer için W ve V_{sb} /V_{ss} nin bir fonksiyonu olarak optimum bariyer derinliği D_{opt} ……. 103
Şekil 8.41 : L=0.1 ile beton bariyer için normalleştirilmiş hendek genişliğinin (W) genlik azalmasına etkisi ……. 104
Şekil 8.42 : L=0.25 ile beton bariyer için normalleştirilmiş hendek genişliğinin (W) genlik azalmasına etkisi ……. 104
Şekil 8.43 : Optimum aralıkta L ve D ≥ D_{opt} ile beton bariyer için kayma dalgası hızı oranının genlik azalmasına etkisi ……..…. 105
Şekil 8.44 : L=0.25 ve 0.375 için beton bariyer ile, zeminin Poisson oranının genlik azalmasına etkisi ……..……..…. 107
Şekil 8.45 : Daire parçası beton bariyerler ve perdeleme bölgesi a) Plan b) Açısal uzunluğun etkisi …….…….…….…….…107
Şekil 8.46 : V_{sb} /V_{ss} =0.2 olan zemin - bentonit bariyer durumda normalleştirilmiş hendek derinliğinin,D, genlik azalmasına etkisi 108
Şekil 8.47 : V_{sb} /V_{ss} =0.1 olan zemin - bentonit bariyer durumda normalleştirilmiş hendek derinliğinin,D, genlik azalmasına etkisi 109
Şekil 8.48 : V_{sb} /V_{ss} =0.05 olan zemin - bentonit bariyer durumda normalleştirilmiş hendek derinliğinin,D, genlik azalmasına etkisi a) W=0.3 b) 0.5, 0.7 …….. 110
Şekil 8.49 : Zeminin Poisson oranının zemin - bentonit bariyer durumunda genlik azalmasına etkisi …… 111
Şekil 8.50 : Periyodik hendeklerle elastik temel ……..114
Şekil 8.51 : Kesme dalgalarının dağılım eğrileri ……..…... 121
Şekil 8.52 : Mod 1 için yansıma katsayısı - frekans ilişkisi a) ε=0.05 b) ε=0.1 c) ε=0.15 ……. 121
Şekil 8.53 : Yansıma katsayısı - elastik tabakanın periyodik kısmının rezonant dalga numarası uzunluğu ……..……..……..122
Şekil 8.54 : Mod 1 ve 3 için yansıma katsayısı - frekans ilişkisi

a) ε=0.1 b) ε=0.12 122
Şekil 8.55 : Uygulama..... 129
Şekil 9.1 :Çerçeve temelin taban döşemesinde tipik donatı detayı..... 134
Şekil 9.2 : a boşluğu çevresinde tipik donatı detayı 134
Şekil 9.3 :: Çerçeve temel için tipik kiriş donatı detayı 134
Şekil 9.4 : Boyuna kiriş tipik donatı detayı..... 135
Şekil 9.5 : Tipik kolon detayı 135
Şekil 9.6 : Kolon-kiriş birleşim detayı 135
Şekil 9.7 : Ankraj bulonu yerleşim detayı..... 136
Şekil 9.8 : Köşeye Yakın Ankraj Bulonu Deliği Detayı 137
Şekil 9.9 : Tipik ankraj bulonu bağlantı detayı 137
Şekil 9.10 : Tipik bir köşe detayı..... 137

SEMBOL LİSTESİ

$\mathbf{a_n}$: Sönümleyicilerin hareket genlikleri
$\mathbf{a_x}$: Yatay doğrultuda genlik
$\mathbf{a_{\theta y}}$: Dönme hareketinde genlik
$\mathbf{a_z}$: Düşey doğrultuda genlik
$\mathbf{A_f}$: Temel taban alanı
$\mathbf{A_j}$, $\mathbf{a_j}$: j. moddaki genlik değeri
$\mathbf{A_{min}}$: Temel alanının en küçük değeri
$\mathbf{A_n}$: Kütlelerin genlikleri
$\mathbf{A_{rr}}$: Genlik Azalması oranı
$\mathbf{B_f}$: Hendek genişliği
$\mathbf{B_j}$: Birinci mertebe çözüm katsayısı
$\mathbf{c}$: Sönüm katsayısı
$\mathbf{c_c}$: Kritik sönüm değeri
$\mathbf{c_t}$: Kayma dalgası hızı
$\mathbf{C_\tau}$: Zeminin elastik üniform kayma tasman katsayısı
$\mathbf{C_\theta}$: Üniform olmayan basınç tasman katsayısı
$\mathbf{C_w}$: Üniform olmayan kayma tasman katsayısı
$\mathbf{C_z}$: Zeminin elastik üniform basınç tasman katsayısı
$\mathbf{D}$: Hendek derinliği
$\mathbf{e}$: Eksantrisite
$\mathbf{f}$: Frekans
$\mathbf{F_n(t)}$: Çeşitli doğrultularda etkiyen dinamik zorlayıcı kuvvet
$\mathbf{H}$: Yükseklik
$\mathbf{G}$: Ağırlık merkezi
$\mathbf{G_s}$: Kayma modülü
$\mathbf{I_{mn}}$: Çeşitli doğrultularda etkiyen kütle atalet momenti
$\mathbf{k_j}$: Yayılan modda dalga numarası
$\mathbf{k_n}$: Yay katsayıları
$\mathbf{k_0}$: Sinüzoidal mesnet hareketinin sabit katsayısı
$\mathbf{k_s}$: Hendeklerin dalga numarası
$\mathbf{L}$: Hendek uzunluğu
$\mathbf{n_x}$, $\mathbf{n_z}$: Birim vektör bileşenleri
$\mathbf{m_n}$: Kütleler
$\mathbf{M_n(t)}$: Çeşitli doğrultularda etkiyen dinamik zorlayıcı moment
$\mathbf{O}$: Dönme merkezi
$\mathbf{P}$: Basınç
$\mathbf{r}$: Frekans oranları
$\mathbf{R_j}$: j. mod yansıma katsayısı
$\mathbf{s}$: Ağırlık merkezinin temel taban alanı merkezinden yüksekliği
$\mathbf{t}$: Zaman
$\mathbf{T}$: Periyot
$\mathbf{T_D}$: Dairesel periyot
$\mathbf{v}$: Hız
$\mathbf{V}$: Hacim
$\mathbf{w}$: Açısal frekans
$\mathbf{w_D}$: Dairesel frekans
$\mathbf{w_m}$: Kuvvetin açısal frekansı

$\mathbf{w_n}$ **:** Özel açısal frekanslar
$\mathbf{W_a}$ **:** Örsün ağırlığı
$\mathbf{W_{st}}$ **:** Şahmardan standının ağırlığı
$\mathbf{W_t}$ **:** Düşen koçun ağırlığı
x(t) **:** Kütlenin yaya göre göreceli zamana bağlı deplasmanı, mesnet har.
y(t) **:** Yayın zamanla değişen uzaması
Y(t) **:** Yay kuvveti
z **:** Düşey doğrultuda yer değiştirme
Z **:** Zemine geçen kuvvet
$\boldsymbol{\alpha}$ **:** Kütleler oranı
$\boldsymbol{\beta}$ **:** Absorbsiyon derecesi
$\boldsymbol{\beta_s}$ **:** Malzeme sönüm katsayısı
$\boldsymbol{\delta}$ **:** Logaritmik azalım katsayısı
$\boldsymbol{\gamma}$ **:** Birim ağırlık
$\boldsymbol{\lambda}$ **:** Dalga uzunluğu
$\boldsymbol{\varepsilon}$ **:** Boyutsuz küçük parametre
$\boldsymbol{\mu}$ **:** Rijitlik modülü
$\boldsymbol{\rho}$ **:** Özkütle
$\boldsymbol{\Phi_n}$ **:** Birinci mertebe çözüm katsayısı
$\boldsymbol{\zeta}$ **:** Sönüm oranı
$\boldsymbol{\xi}$ **:** Kuvvet ile sistemin özel açısal frekansları oranı
$\boldsymbol{\sigma}$ **:** Gerilme
$\boldsymbol{\sigma_p}$ **:** Müsaade edilen gerilme
$\boldsymbol{\varphi}$ **:** Dönme
$\boldsymbol{\upsilon_s}$ **:** Poisson oranı
$\boldsymbol{\chi}$ **:** Dinamik büyütme çarpanı

ÖZET

Bu çalışma, yapı dinamiği ile ilgili özet bilgileri, makina ve makina temellerinin tipleri, temel tasarımı ve doğru temel tipinin seçilmesi, istenmeyen titreşimleri engellemek için temel altında sönümleyici kullanılması veya hendekler ile titreşimlerin yalıtımı konularını içermektedir.

Temel tasarımında, frekans ve genlik mukayeseleri yapılarak uygun temel seçilir. Rezonansın önlenmesi için makina ile temel sisteminin özel frekansının uygun seçilmesi, ve izin verilen genlik değerinin aşılmaması tasarımda esas teşkil eder. Temel tasarımı yapılırken, eğer komşu yapı ve ekipmana zarar verebilecek titreşimler öngörülmüş ise bu titreşimlerden korunmak için uygun sönümleyici kullanılması gerekir. Bunun için kauçuk, neopren, çelik yay, ahşap, pnömatik sönümleyici vs. gibi malzemeler kullanılabilir. Sönümleyici kullanılmasına rağmen istenen genlikler elde edilemiyorsa, hendek bariyer ile titreşimlerin yalıtımı yöntemi kullanılır. Eğer bu titreşim kaynağında yapılıyorsa aktif yalıtım, kaynaktan uzakta bir ekipmanı veya yapıyı korumak için bu yapı çevresine yapılıyorsa pasif yalıtım olarak adlandırılır. Hendek bariyerler açık ya da beton veya bentonit – zemin gibi karışımlar ile dolgulu olabilir. Açık ve dolgulu hendek bariyerlerin üç boyutlu analizi için sınır elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Tasarım sonucu hendek derinliği fazla bulunmuş ise, bunun yerine kazık bariyerler kullanmak uygun olur.

SUMMARY

This study includes basic principles of structural dynamics, machine and machine foundation types, the design of machine foundations and the most correct design for foundations, using absorber under foundations or vibration isolation by using trenches to avoid disturbance of vibrations generated by machine foundations.

In the design of machine foundations, the most correct foundation type is chosen by comparison of frequencies and amplitudes. To prevent resonance the frequency of foundation must be chosen correctly and amplitudes must be chosen within acceptable limits. If probable disturbance of vibrations to near structures or equipment is understood during design, absorbers must be used in the design to avoid harmful effect of vibrations. Rubber, neoprene, springs, pneumatic absorbers, timber can be used for this purpose. If there is a situation where absorbers are inadequate to obtain desired amplitudes, the method of vibration isolation by trench barriers is used. Providing a barrier in the vicinity of the source is defined as active isolation and a barrier remote from vibration source to protect a structure or equipment is defined as passive isolation. There are situations both open trenches and in-filled trenches by concrete or bentonite – soil mixture used. The boundary elements method is used for three dimensional analysis of open or in-filled trench barriers. If the depth of a trench is very high, pile barriers can be used for isolation of vibrations.

1. GİRİŞ

1.1 Makina Temellerinin Önemi

Ülke ekonomilerinde, sanayileşme çok önemli bir yer tutar. Sanayileşme çalışmaları, beraberinde sanayi yapılarının inşasını ve sanayileşmede önemli bir kısma sahip olan makina temellerinin projelendirilmesini, bununla birlikte uygulamasını doğurur. Bu uygulama esnasında, temelin diğer yapı elemanlarından yalıtımını sağlamak da verimli çalışma açısından günümüzde önem arz eder.

Makina temelleri, birer mühendislik problemi olmakla beraber, diğer yandan tecrübe ve sağduyuya da dayanır. Projelendirmede ve montaj esnasında diğer mühendislerin tecrübelerinden, ekipmanın üreticilerinin tavsiyelerinden yararlanılmalıdır. Bunun yanı sıra, söz konusu etüd bir yandan makina mühendisini, diğer yandan da inşaat mühendisini ilgilendirdiğinden, ikisinin iş birliği yapması hem hesaplar hem de montaj hususunda önem arz eder.

Makina temellerinin diğer yapı elemanlarına göre önem arz etmesinin sebebi, temelin üzerinde bulunan makinadan gelen dinamik kuvvetlerin etkisidir. Bilindiği gibi, dinamik kuvvetler zamana göre değişkendir. Makinanın çalışması esnasında, statik kuvvetlerle beraber bu zamana göre değişen kuvvetler de makinadan temele, temelden de zemine geçer. Bu geçiş esnasında ara elemanlar da kullanılabileceği için, yapılması gereken etüd karşılıklı etkileşimlerden oluşan elemanlar ve olaylar sisteminin etüdüdür. Bu anlamda problem, temelin etki edecek statik ve dinamik kuvvetlere göre yapı dinamiği esaslarına uygun olarak seçilmesi ve projelendirilmesidir.

Makina temelleri, doğru inşa edilmemesi durumunda makinanın ve tesisin zarar görmesine sebep verir. Doğru uygulama, titreşimlerin çok önemli olduğu durumlarda yalıtımı gerektirir. Bu ise, gerek diğer yapı elemanlarını makinadan kaynaklanan titreşimlerden yalıtmak, gerekse temeli çevredeki bir titreşim kaynağından yalıtmayı gerektirebilir. Bu bakımdan da, temelin sismik dizaynı yapı ve ekipman açısından önemli konumdadır.

1.2 Amaç ve Kapsam

Makina temellerini dizayn ederken, bazı önemli hususlar göz önüne alınmalıdır. Bunlar genel olarak oturmalar, devrilme, torsiyon, titreşimler ve yalıtımdır.

Hareketli yüklerden, şok ve impuls kuvvetleri tarafından meydana getirilecek deformasyonları asgariye indirmek adına, mühendisler çok kez zemini emniyetli taşıma gücünün % 40-60'ı kadar taban basıncına maruz bırakırlar. Farklı oturmalar da makinaya ciddi zararlar verebilir. Bunu önlemek için de, temelin oturduğu alanın ağırlık merkezi ile temele etkiyen bütün kuvvetlerin bileşkesi mümkün olduğu kadar yakın düşürülür.

Makinalardan kaynaklanan büyük torklar, makina temellerini devrilmeye ve burulmaya zorlayabilir. Momentin etki ettiği doğrultuda temel boyutunu artırmak ve esnek kavramalar kullanmak çözüm yollarından biridir.

Makina temellerinde titreşimler, temeli bir titreşim kaynağı haline getirip zemin aracılığı ile diğer yapılara ve insanlara zararlı tesirler verecek duruma getirebilir. Rezonansı önlemek için, temelin frekansını makinanın frekansına yakın seçmemek gerekir. Mesela, makina frekansının 0,8 katı ile 1,25 katı arasında bir değer seçmek uygun olabileceği gibi, bazı kere 0,3 katı veya 2-3 katını seçmek doğru olabilir. Fakat küçük seçilince, temelin ve makinanın frekansları makina çalışırken bir an için eşit olsa bile bunlar anlık olduğu için, ihmal edilebilecek derecede küçük olması söz konusudur. Titreşimler genellikle titreşim tekniğine uygun olarak bulunan kuvvetlerle istenilen değerlere getirilebilir. Birçok durumda, yaylar kullanarak titreşimler sönümlenir.

İşte bu zararlı olabilecek titreşimlerin zararlı etkisini azaltmak ve çalışmalarda verimin aynı kalmasını sağlamak adına, temellerin yalıtımı önem kazanır. Makinayı döşemeye rijit bağlamak makinanın titreşimini azaltmasına karşın, döşemeye geçen titreşimlerin büyümesine neden olur. Temelin altına esnek bir mesnet kullanmakla döşemeye geçen titreşimler küçülür. Fakat makinanın kendisinde önemli titreşimler olur. Bunun için, temel için uygun bir frekans seçmek gerekir. Uygun bir doğal frekans seçilerek, istenilen yalıtım derecesi elde edilebilir. Yalıtım için, uygulamada son yıllarda önemli çalışmalar yapılmış ve çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Bu tez çalışmasında, önce makina temellerinin önemi, yapı dinamiğinin temel prensipleri, makina ve temel tipleri, makinadan kaynaklanan titreşimlerin zararlı etkilerinden kurtulmak için sönümleyici sistemler ve yalıtım yöntemleri, bazı uygulamalar ve son olarak da makina temellerinin yapım detayları anlatılmıştır.

Tezin amacı, literatürde çok fazla yer almayan yalıtım yöntemlerinin anlaşılması, özellikle yalıtım yöntemlerinden açık ve dolgulu hendekler ile yapılan aktif yalıtım yöntemlerinin karşılaştırılması ve yalıtıma etkiyen parametrelerin irdelenmesidir.

2. YAPI DİNAMİĞİ İLE İLGİLİ ÖZET BİLGİLER

2.1 Giriş

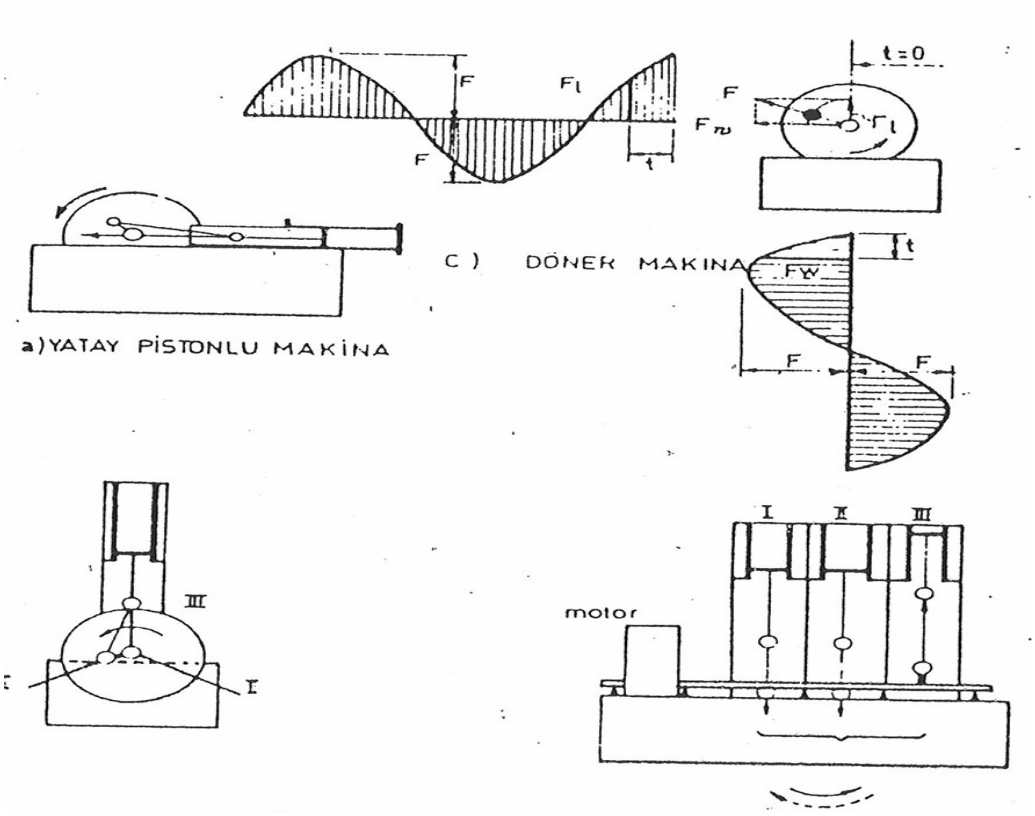
Makina temelleri projelendirilirken, yapı dinamiği esaslarından yararlanılır. Daha önce belirtildiği gibi, makina temellerinde dinamik kuvvetler önemli olduğundan projelendirmede diğer yapı elemanlarına nazaran önem arz eder. Bu dinamik yükler, makina temellerine etkiyen hareketli, periyodik ve impakt tesirleridir. Eğer bir sistem zamanla değişen kuvvetlerle yüklenirse deformasyonları da zamanla değişir. Dolası ile, sistemin kütleleri birer ivmeli hareket yapar. Bu da, atalet kuvvetlerinin oluşmasına ve sisteme etkiyen kuvvetlerle beraber atalet kuvvetlerinin de hesaba katılması durumunu doğurur. Yani, sistemde oluşan deformasyonları ve zorlamaları belirtmek için, atalet kuvvetleri de göz önüne alınmalıdır.

Bu bölümde, zorlayıcı tesir, serbestlik derecesi, bir serbestlik dereceli sistemlerin sönümsüz ve sönümlü olma durumlarında serbest ve zorlanmış titreşimleri, çok serbestlik dereceli sistemlerin de serbest ve zorlanmış titreşimleri incelenmiştir.

2.2 Zorlayıcı Tesir – Dinamik Kuvvet Tesirleri

Sistemde zorlamaların ve deformasyonların oluşmasına neden olan tesirlerdir. Dinamik zorlama zamana göre değişkendir veya sabit değerine bir değişkenlik süresi sonunda erişir. İleri geri giden pistonlu makinaların kuvvetleri, döner kütleli makinaların merkez kaç kuvvetleri veya birbirine dik titreşen iki kuvvetin titreşim bileşenleri zorlanmış titreşimler oluştururlar.

Makina temeline etkiyen dinamik tesirlerin kaynağı sadece makinalar olmayabilir. Dışarıdan etkiyen kuvvetler; örneğin rüzgar kuvveti, veya çarpmalar da titreşime sebep olurlar. Diğer bir yanda, deprem esnasında da yapı aynı hareketi yapmak durumda olacağından bu da zorlayıcı bir tesirdir. Aynı zamanda, atalet kuvvetleri de zorlayıcı tesir durumu yaratabilir, bu literatürde iç tesir olarak geçer.



Şekil 2.1: Dinamik Zorlayıcı Kuvvetler

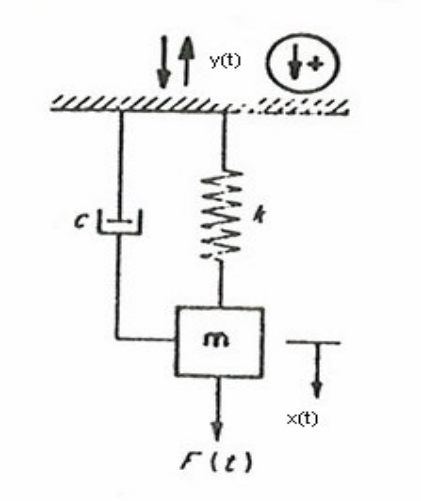
2.3 Serbestlik Derecesi

Bir sistemin konfigürasyonunun tamamen belirlenmesi için bilinmesi gereken parametrelerin, büyüklüklerin sayısına denir. Bir başka tanımla, taşıyıcı bir sistemin tüm yerdeğiştirmesi, kabul edilebilir bir yaklaşımla belirlenen bazı noktaların yerdeğiştirmesi ile ortaya çıkar. Bu noktaların sayısına sistemin serbestlik derecesi denir.

2.4 Bir Serbestlik Dereceli Sistemler

Bir serbestlik dereceli sistemlerin herhangi bir andaki konfigürasyonunun belirlenmesi için tek bir büyüklüğün bilinmesine ihtiyaç vardır.

Bu tür bir sistemin kütle, yay ve sönüm olmak üzere üç karakteristiği vardır. Şekil 2.2. de gösterildiği gibi sistem genel bir F(t) kuvveti ile x(t) mesnet hareketinin etkisi altındadır. Sistemin sönümünün sistemin iç bünyesindeki göreceli hızla orantılı olduğu, yani viskoz olduğu kabul edilmiştir.



Şekil 2.2: Bir Serbestlik Dereceli Sönümlü Sistemin Dış Kuvvet ve Mesnet Hareketi İle Zorlanması (Demir ve Öztürk, 1992)

$y(t)$: Yayın zamanla değişen uzaması

$[x(t)+y(t)]$: Kütlenin deplasmanı

$[x(t)+y(t)]^{\cdot\cdot}$: Kütlenin ivmesi

$c.y^{\cdot}(t)$: Sönüm Kuvveti

$k.y(t)$: Yay Kuvvetidir.

Sistemin hareket denklemi de,

$$F(t)=m.[x(t)+y(t)]^{\cdot\cdot}+c.y^{\cdot}(t)+k.y(t) \qquad \textbf{(2.1)}$$

veya

$$F(t)-mx^{\cdot\cdot}=my^{\cdot\cdot}+c.y^{\cdot}+ky \qquad \textbf{(2.2)}$$

olur. Bu denklem, sönümlü sistemin zorlanmış titreşimlerine ait diferansiyel denklemdir. Denklem matematiksel olarak, ikinci mertebeden, lineer, sabit katsayılı adi diferansiyel denklemdir. Bu denklemden $y(t)$ belirlenecektir. Denklemin çözümünden iki integrasyon sabiti elde edilir. Bunlar genellikle başlangıç deplasmanı ve hızıdır (Demir ve Öztürk, 1992).

2.4.1 Sönümsüz Sistemlerin Serbest Titreşimleri

Dış etkinin bulunmadığı sistemler serbest titreşim olarak adlandırılırlar. Yani, yukarıdaki sistemde $F(t)$ kuvveti ve $x(t)$ mesnet hareketi kaldırılırsa, sistem serbest titreşir. Sistemi sönümsüz duruma getirmek için de, sönüm katsayısı c=0 alınırsa sistem sönümsüz olarak düşünülür. Bu hale ait diferansiyel denklem,

$$my'' + ky = 0 \qquad \textbf{(2.3)}$$

olur. Buradan,

$$w^2 = k/m \qquad \textbf{(2.4)}$$

$$y'' + w^2 y = 0 \qquad \textbf{(2.5)}$$

olarak bulunur. Bu diferansiyel denklemin çözümü de,

$$y = A.\cos wt + B\sin wt \qquad \textbf{(2.6)}$$

$y' = w[-A\sin wt + B\cos wt]$ dir. t=0 anında $y\ (0) = y_0$, $y'(0) = y_0'$ ise,

$$y(t) = y_0 \cos wt + \frac{y_0'}{w}\sin wt \qquad \textbf{(2.7)}$$

$$y'(t) = -wy_0 \sin wt + y_0' \cos wt \qquad \textbf{(2.8)}$$

$$y''(t) = -w^2 y(t) \qquad \textbf{(2.9)}$$

olarak bulunur. 2.7. ile oluşan hareket sinüzoidal bir harekettir. Sistemin peryodu ve frekansı da,

$$T = 2\pi/w = 2\pi\sqrt{m/k}\ ,\ f = 1/T = (1/2\pi)\sqrt{k/m} \qquad \textbf{(2.10)}$$

olarak bulunmuş olur.

2.4.2 Sönümsüz Sistemlerin Zorlanmış Titreşimleri

Bu durumda hareket denklemi,

$$my'' + ky = F(t) \qquad \textbf{(2.11)}$$

veya,

$$y'' + w^2 y = F(t)/m \qquad \textbf{(2.12)}$$

olarak karşımıza çıkar. Bu diferansiyel denklemin genel çözümü de,

$$y = A\cos wt + B\sin wt + \frac{1}{mw}\int_0^t F(\tau)\sin w(t-\tau)d\tau \qquad \textbf{(2.13)}$$

Burada, ilk iki terim denklemin homojen çözümü, son terimde başlangıç şartları sıfır olan özel çözümdür. Başlangıç şartları $y(0) = y_0$ ve $y'(0) = y_0'$ olarak alınıp denklemde, A ve B bulunursa,

$$y = y_0\cos wt + \frac{y_0'}{w}\sin wt + \frac{1}{mw}\int_0^t F(\tau)\sin w(t-\tau)d\tau \qquad \textbf{(2.14)}$$

olarak bulunmuş olur.

F(t) kuvvetinin, yani zorlayıcı tesirin sinüzoidal kuvvet olması makina temellerinde çok kere karşımıza çıkan bir durumdur. Şimdi bu durum incelenecektir.

Sinüzoidal Kuvvet Hali

Sisteme,

$$F(t) = F_0\sin \bar{w}t \qquad \textbf{(2.15)}$$

kuvvetinin etkimesi durumunda, bu kuvvetin en büyük değeri F_0, açısal frekansı $\bar{w}$, periyodu $T = 2\pi/\bar{w}$, frekansı $f = \bar{w}/2\pi$ olur ve sisteme sinüzoidal etki yapar. Hareket denklemi de,

$$y'' + w^2 y = \frac{F_0\sin \bar{w}t}{m} \qquad \textbf{(2.16)}$$

olarak bulunmuş olur. Denklemin çözümü (2.14) de $F(t)$ fonksiyonu yerine $F(t) = F_0\sin \bar{w}t$ almak kadar kolaydır. Dolayısı ile çözüm,

$$y = y_0\cos wt + \frac{y_0'}{w}\sin wt + \frac{1}{mw}\int_0^t F_0\sin \bar{w}\tau\sin w(t-\tau)d\tau \qquad \textbf{(2.17)}$$

olarak bulunur. Denklemde $y_{st} = F_0/k$ değerini mukayese büyüklüğü olarak alırsak,

$$y = y_0 \cos wt + \frac{\dot{y_0}}{w} \sin wt + y_{st} . \frac{\sin \bar{w} t - \frac{\bar{w}}{w} \sin wt}{1 - (\frac{\bar{w}}{w})^2} \qquad \textbf{(2.18)}$$

olarak yazılabilir. Bu denklemi biraz daha açarsak,

$$y = y_0 \cos wt + \frac{\dot{y_0}}{w} \sin wt - y_{st} . \frac{\frac{\bar{w}}{w}}{1 - (\frac{\bar{w}}{w})^2} \sin wt + y_{st} \frac{1}{1 - (\frac{\bar{w}}{w})^2} \sin \bar{w} t \qquad \textbf{(2.19)}$$

yazılır. Bu denklemde de ilk üç terim sistemin özel frekansı, son terim de dış etkinin frekansı etkisi altındadır. Sönümlü sistemlerde, ilk üç terim dış etki tarafından beslenmediği için bir süre sonra sönerler. Bunu düşünerek ilk üç terimi çıkarırsak,

$$y = y_{st} \frac{1}{1 - (\frac{\bar{w}}{w})^2} \sin \bar{w} t \qquad \textbf{(2.20)}$$

buradan da,

$$y = \frac{1}{k} \frac{1}{1 - (\frac{\bar{w}}{w})^2} F(t) \qquad \textbf{(2.21)}$$

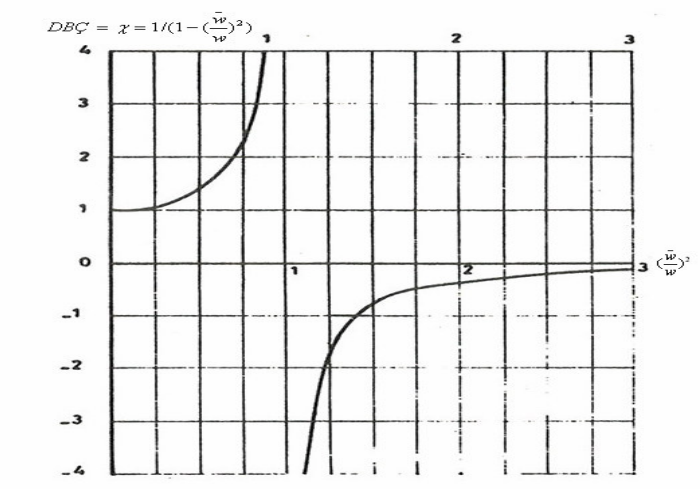
elde edilir. Yay kuvvetinin $Y = ky$ olduğu düşünülerek,

$$Y(t) = \frac{1}{1 - (\frac{\bar{w}}{w})^2} F(t) \qquad \textbf{(2.22)}$$

yazılır. Bu denklemde, $\bar{w} < w$ ise kütlenin deplasmanı ve yay kuvveti dış kuvvete uygun, $\bar{w} > w$ ise ters yönlüdür. $1/(1 - (\frac{\bar{w}}{w})^2)$ katsayısını dinamik büyütme çarpanı olarak tanımlarsak, $F(t)$ kuvvetinin statik olarak etkimesi halinde sebep olacağı deformasyon ve yay kuvveti dinamik büyütme çarpanı ile çarpılmalıdır.

$$DBÇ = \chi = 1/(1-(\frac{\bar{w}}{w})^2) \qquad \textbf{(2.23)}$$

olarak yazarız. Aşağıda grafik halde DBÇ' nin değişimi gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Dinamik Büyütme Çarpanı – Sinüzoidal Kuvvet Hali

(Demir ve Öztürk, 1992)

Bu grafikten anlaşılan, $\bar{w}, w$ dan çok küçük ise, ve dış etki yavaş değişiyorsa sistem statik bir etki altında gibidir. Fakat, $\bar{w}, w$ dan çok büyükse, sistemde zorlamalar ve dolası ile deformasyonlar çok küçük olur. Bu değerler birbirine ne kadar yakınsa dinamik büyütme çarpanı o kadar büyük olur (Demir ve Öztürk, 1992).

Rezonans Hali

Bu kısımda, $\bar{w} = w$ durumu incelenecektir. Bir önceki kısımdaki çözüm $\bar{w} = w$ durumu için geçerli olmasa bile, birbirine yakın değerler alınarak, limit hesabı yapılabilir. Çözümde 0/0 belirsizliği için L'Hospital kuralı uygulanır. Pay ve paydanın $\bar{w}$ ya göre türevi alınır, $\bar{w} = w$ konur.

$$y = y_0 \cos wt + \frac{\dot{y_0}}{w} \sin wt + \frac{y_{st}}{2}(\sin wt - wt \cos wt) \qquad \textbf{(2.24)}$$

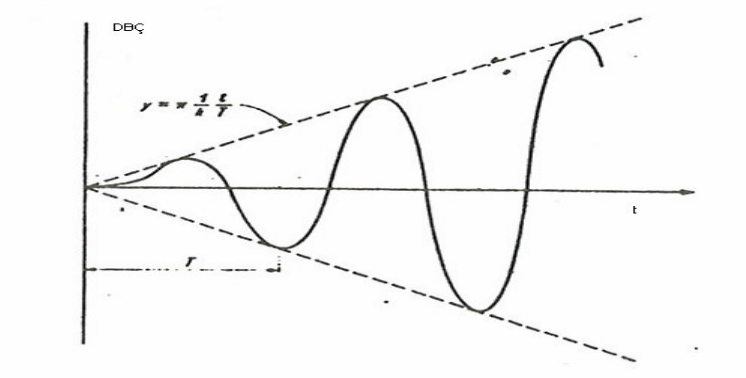
Hareketsiz ,sönümsüz bir sisteme $\bar{w} = w$ olan bir etki gelirse,

$$y = \frac{y_{st}}{2}(\sin wt - wt \cos wt) \qquad \textbf{(2.25)}$$

$$y^{\cdot} = \frac{y_{st}}{2} w^2 .t \sin wt \qquad \textbf{(2.26)}$$

olur. Buradan deplasmanların ve hızın birden sonsuz olmayacağı fakat zamanla artacağı anlaşılır.

Böyle bir durumda, gerçekte sistem hareketini sonsuz süre devam ettiremez ve kesit zorları kırılma değerine ulaştığında kırılır (Demir ve Öztürk, 1992).



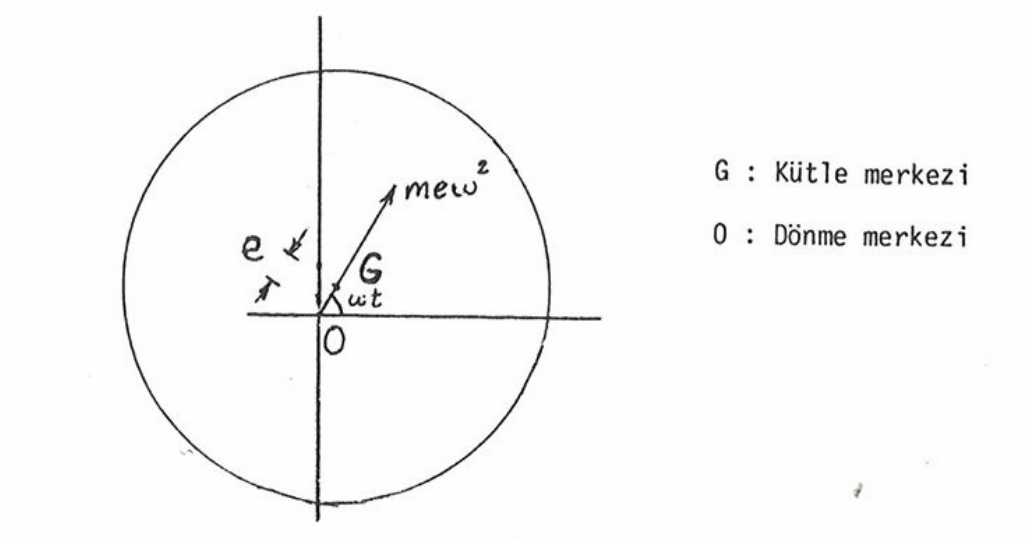
Şekil 2.4: Sönümsüz Sistemde Rezonans (Demir ve Öztürk, 1992)

Pratikte, dönen kısımlara sahip makinalar temellerine sinüzoidal kuvvet etkirler. Pistonlu makinaların da etkisi bu türdendir. Dönen kısımları olan makinalarda, makinaların m kütlesi ve e eksantrisitesi söz konusudur. Makinanın w açısal hızı ile dönmesi durumunda $me\bar{w}^2$ merkez kaç kuvveti ortaya çıkar ve bir eksen doğrultusunda bileşeni sinüzoidal olarak değişir. Bu durumda (2.22) den,

$$Y(t) = \frac{1}{1-(\frac{\bar{w}}{w})^2} me\bar{w}^2 \sin \bar{w}t = \frac{(\bar{w}/w)^2}{1-(\bar{w}/w)^2} w^2 me \sin \bar{w}t \qquad \textbf{(2.27)}$$

$$y(t) = \frac{(\bar{w}/w)^2}{1-(\bar{w}/w)^2} e \sin \bar{w}t \qquad \textbf{(2.28)}$$

olarak yazılır.



Şekil 2.5: Dönme Hareketinde Merkez Kaç Kuvvetinin Eksantrik Kütleye Etkisi (Demir ve Öztürk, 1992)

$$\xi = \bar{w}/w \qquad \textbf{(2.29)}$$

dersek,

$$DBÇ = \chi = 1/(1-(\frac{\bar{w}}{w})^2) = 1/1-\xi^2 \qquad \textbf{(2.30)}$$

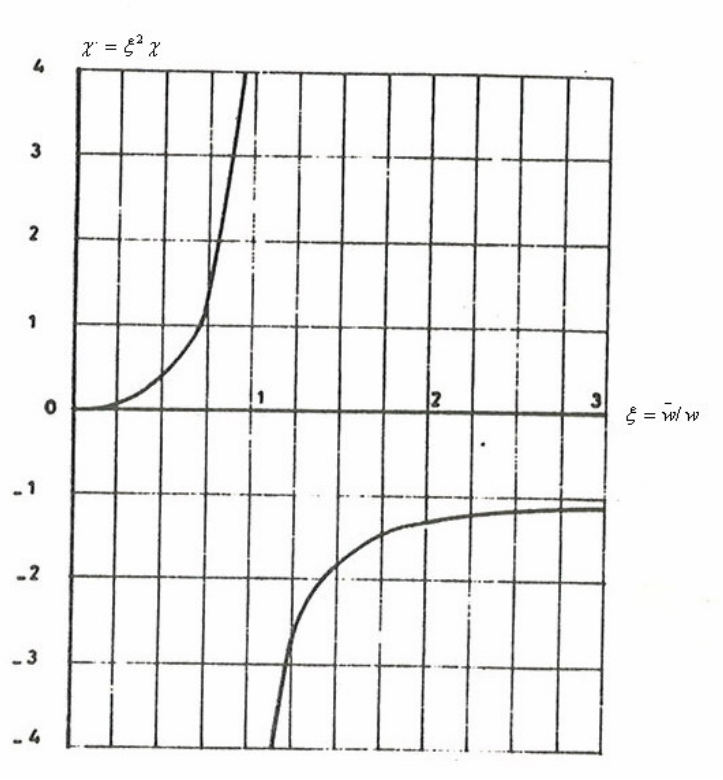
$$\chi^{\cdot} = \xi^2 \chi \qquad \textbf{(2.31)}$$

olur. Böylece,

$$Y_{\max} = \chi^{\cdot}.mew^2 \qquad \textbf{(2.32)}$$

$$y_{\max} = \chi^{\cdot}.e \qquad \textbf{(2.33)}$$

olarak yazılır. Bu değerlerin değişimi grafikteki gibidir.



Şekil 2.6: Dönme Hareketinde Dinamik Büyütme Çarpanı (Demir ve Öztürk, 1992)

Mesnetlerin Hareket Etmesi Hali

Mesnetin,

$$x(t) = k_0 \sin \bar{w} t \tag{2.34}$$

hareketini yaptığını varsayalım. Bu durumda,

$$F(t) = -mx^{\cdot\cdot}(t) = mk_0 \bar{w}^2 \sin \bar{w} t \tag{2.35}$$

etkiyen kuvvettir. Yani yukarıdaki denklemde ($w^2 me \sin \bar{w} t$), e yerine k_0 konur.

$$Y(t) = \frac{(\bar{w}/w)^2}{1-(\bar{w}/w)^2} w^2 m k_0 \sin \bar{w} t \tag{2.36}$$

$$y(t) = \frac{(\bar{w}/w)^2}{1-(\bar{w}/w)^2} k_0 \sin \bar{w} t \tag{2.37}$$

$$Y_{\max} = \chi . m k_0 w^2 \quad \textbf{(2.38)}$$

$$y_{\max} = \chi . k_0 \quad \textbf{(2.39)}$$

olarak bulunur.

2.4.3 Sönümlü Sistemlerin Serbest Titreşimleri

Bu halde sistemin hareket denklemi,

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = 0 \quad \textbf{(2.40)}$$

dır. Sabit katsayılı homojen diferansiyel denklemdir.

$$p = c/2m\,,\ w^2 = k/m\,,\ w = \sqrt{k/m} \quad \textbf{(2.41)}$$

yazılırsa,

$$\ddot{y} + 2p\dot{y} + w^2 y = 0 \quad \textbf{(2.42)}$$

$$y = Ge^{at} \quad \textbf{(2.43)}$$

dönüşümü yapılırsa,

$$a^2 + \frac{c}{m}a + w^2 = 0\,, \quad a = -c/(2m) \pm \sqrt{c/(2m)^2 - w^2} \quad \textbf{(2.44)}$$

karakteristik denklemi elde edilir. Bu denklemde, kök içindeki ifadenin pozitif, negatif ve sıfır olması durumuna göre üç türlü sönümlü hareket ortaya çıkar.

Kritik Sönümlü Hareket

Bu durumda, (2.44) deki kök içindeki ifade sıfırdır. Böylece bulunan sönüm değerine kritik sönüm adı verilir.

$$\sqrt{c/(2m)^2 - w^2} = 0\,,\ c = c_c = 2mw \text{ (kritik sönüm değeri)} \quad \textbf{(2.45)}$$

Diferansiyel denklemin çözümü de,

$$y = (A + Bt)e^{-wt} \quad \textbf{(2.46)}$$

olarak bulunur. Sistemin, t=0 anında y(0) yer değiştirmesi ve y'(0) hızına sahip olduğu düşünülürse çözüm,

$$y = \left[y(0)(1 + wt) + y^{\cdot}(0)t \right] e^{-wt} \quad \textbf{(2.47)}$$

olarak elde edilir. Burada, yer değiştirmenin zamanla değişiminden, hareketin bir titreşim hareketi olmamakla beraber, başlangıç durumundan denge konumuna asimptotik olarak gelmesi şeklinde sönümlü bir hareket olduğu ortaya çıkar. Bu tür harekete eşit sönüm hali de denir.

Kritik Sönüm Üstü Hareket

Bu halde, (2.44) deki kök içindeki ifade sıfırdan büyüktür. Bir başka değişle sönüm kritik sönüm değerinden büyüktür.

$$c > c_c = 2mw,\ \zeta = c / c_c \text{ (sönüm oranı)} \quad \textbf{(2.48)}$$

$$\varpi = w\sqrt{\zeta^2 - 1} \quad \textbf{(2.49)}$$

(2.49) denklemi ile karakteristik denklemin kökleri,

$$a = -\zeta w \pm \varpi \quad \textbf{(2.50)}$$

ve hareket denkleminin çözümü de,

$$y = e^{-\zeta wt} (A \sinh \varpi t + B \cosh \varpi t) \quad \textbf{(2.51)}$$

olarak bulunur. Burada A ve B değerleri Başlangıç şartlarından bulunabilir. Bu tür hareket de, kritik sönümlü harekete benzer. Titreşim hareketi yoktur. Bununla birlikte, sistem denge konumuna asimptotik olarak yaklaşır. Bu harekete kuvvetli sönüm hali de denir.

Kritik Sönüm Altı Hareket

İnşaat mühendisliğinde karşılaşılan haldir. Bu halde, sönüm kritik sönüm değerinden küçüktür. Zayıf sönüm hali de denir.

$$c < c_c = 2mw,\ w_D = w\sqrt{1 - \zeta^2} \text{ (sönümlü titreşim frekansı)} \quad \textbf{(2.52)}$$

Bu denklemlerden, karakteristik denklemin çözümü ve hareket denklemi,

$$a = -\zeta w \pm i w_D \quad \textbf{(2.53)}$$

$$y = e^{-\zeta wt} (A \sin w_D t + B \cos w_D t) \quad \textbf{(2.54)}$$

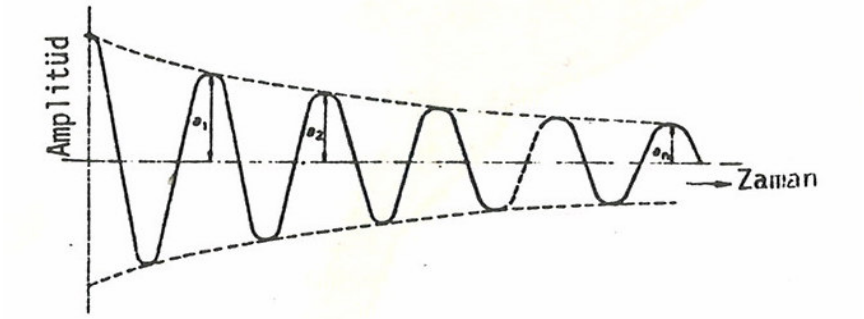
olarak yazılır. Başlangıç şartlarını kullanarak da, A ve B sabitleri bulunur.

$$y = e^{-\zeta w t}\left(\frac{\dot{y}(0) + y(0)\zeta w}{w_D}\sin w_D t + y(0)\cos w_D t\right) \qquad \textbf{(2.55)}$$

Verilen şekilde de görüldüğü gibi sistem, denge konumu etrafında sabit w_D dairesel frekansı ile, genliği azalarak, fakat sabit bir periyot ile titreşir. Birbirini izleyen iki genliğin oranı sabit olup, bunun doğal logaritmasına logaritmik azalım denir.

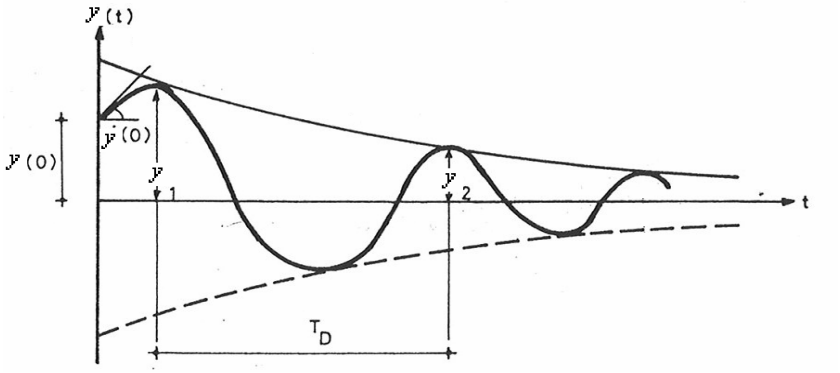
$$\delta = \ln(y_n / y_{n+1}) = 2\pi\zeta w / w_D = 2\pi\zeta / \sqrt{1-\zeta^2} \qquad \textbf{(2.56)}$$

Sönümün küçük değerleri için kök içindeki ifade 1 olarak kabul edilebilir. (2.56) formülü kullanılarak sönüm oranı tespit edilebilir. Örnek olarak, bir makina temel bloğunda bir tokmakla impakt etkisi verilip, serbest titreşimler oluşturulup ve temelin titreşimleri kaydedilirse, hareketin sönümlü bir titreşim hareketi olduğu görülür. Bulunan eğri üzerinde birbirini izleyen iki genliğin oranının doğal logaritması alınarak logaritmik azalım değeri, bu da 2π ye bölünürse sönüm oranı bulunmuş olur.



Şekil 2.7: Serbest Titreşimler Halinde Sönüm Eğrisi (Demir ve Öztürk, 1992)

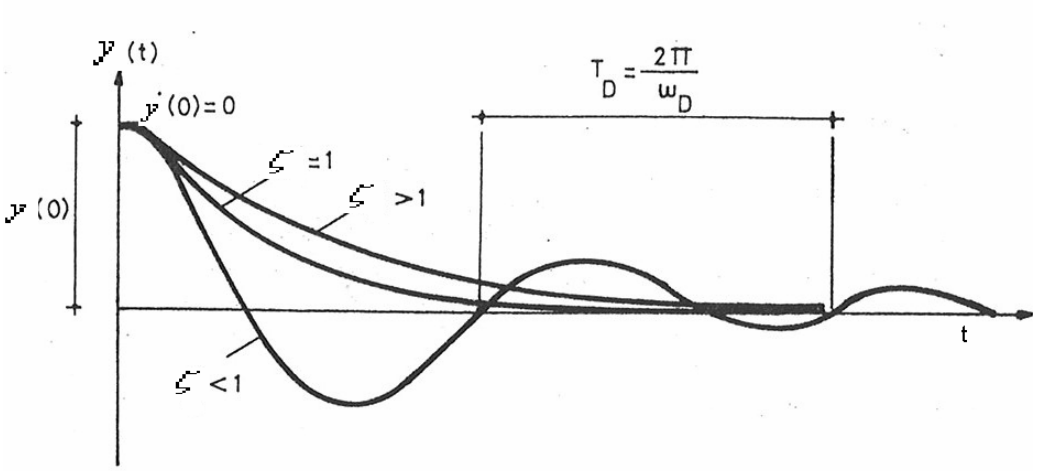
Aşağıda kritik sönüm altı harekete ait şekil verilmiştir.



Şekil 2.8: Kritik Sönüm Altı Hareket (Celep ve Kumbasar, 2001)

Görüldüğü gibi hareket azalan genliklere sahip bir titreşim hareketidir.

Aşağıdaki şekilde, her üç hal için ortak olarak, mukayeseli yer değiştirme- zaman grafiği verilmiştir. Buradan kritik sönümlü hareketin titreşim hareketini ortaya çıkarmayan en küçük sönüm değeri olduğu ortaya çıkmaktadır.



Şekil 2.9: Başlangıç Yer değiştirmesi İle Sistemin Üç Sönüm Hali İçin Davranışı (Celep ve Kumbasar, 2001)

2.4.4 Sönümlü Sistemlerin Zorlanmış Titreşimleri

Sistemin hareket denklemi,

$$F(t) = m\ddot{y} + c\dot{y} + ky \qquad \textbf{(2.57)}$$

ya da,

$$F(t)/m = \ddot{y} + \zeta w\dot{y} + w^2 y \qquad \textbf{(2.58)}$$

olarak yazılır. Başlangıç koşulları da kullanarak çözüm,

$$y = e^{-\zeta wt}\left(y_0 \cos w_D t - \frac{\dot{y_0} + \zeta w y_0}{w_D}\sin w_D t\right) + \frac{1}{m w_D}\int_0^t F(\tau) e^{-\zeta w(t-\tau)} \sin w_D (t-\tau) d\tau \qquad \textbf{(2.59)}$$

şeklinde bulunmuş olur. Bu denklemde, sönüm oranı sıfır alınırsa sönümsüz durum için çözüm bulunmuş olur.

Sinüzoidal Kuvvet Hali

Sisteme,

$$F(t) = F_0 \sin \bar{w} t \tag{2.60}$$

etkisin. Hareket denklemi,

$$m\ddot{y} + c\dot{y} + ky = F_0 \sin \bar{w} t \tag{2.61}$$

$$\ddot{y} + 2\zeta w\dot{y} + w^2 y = w^2 y_{st} \sin \bar{w} t \tag{2.62}$$

dir. Burada denklemin özel çözümü,

$$y_p = A \sin \bar{w} t + B \cos \bar{w} t \tag{2.63}$$

şeklinde tahmin edilirse ve A ve B değerleri çözümü denklemde yerine koymak suretiyle bulunursa işlemler kolaylaşır. Bundan sonra başlangıç şartları ile integrasyon sabitleri bulunur ve özel çözüme homojen denkleme ait genel çözüm ilave edilerek çözüm bulunur.

$$\begin{aligned} y &= e^{-\zeta w t}\left(y_0 \cos w_D t + \frac{\dot{y_0} + \zeta w y_0}{w_D} \sin w_D t\right) \\ &+ y_{st} e^{-\zeta w t} . \frac{2\zeta\xi \cos w_D t + \xi \frac{w}{w_D}\left[2\zeta^2 - (1-\xi^2)\right] \sin w_D t}{(1-\xi^2)^2 + (2\zeta\xi)^2} \\ &+ y_{st} . \frac{(1-\xi^2) \sin \bar{w} t - 2\zeta\xi \cos \bar{w} t}{(1-\xi^2)^2 + (2\zeta\xi)^2} \end{aligned} \tag{2.64}$$

Şeklinde çözüm bulunur. İlk iki terim dış kaynaktan beslenmediği için söner, son terim dış etkinin frekansında olduğu için sönmez, devamlıdır.

$$\frac{(1-\xi^2)\sin \bar{w} t - 2\zeta\xi \cos \bar{w} t}{(1-\xi^2)^2 + (2\zeta\xi)^2} = \frac{\sin(\bar{w} t - \psi)}{(1-\xi^2)^2 + (2\zeta\xi)^2} \tag{2.65}$$

$$\cos\psi = \frac{(1-\xi^2)}{(1-\xi^2)^2 + (2\zeta\xi)^2}, \ \sin\psi = \frac{2\zeta\xi}{(1-\xi^2)^2 + (2\zeta\xi)^2} \tag{2.66}$$

Denklemleri ile dinamik büyütme çarpanı,

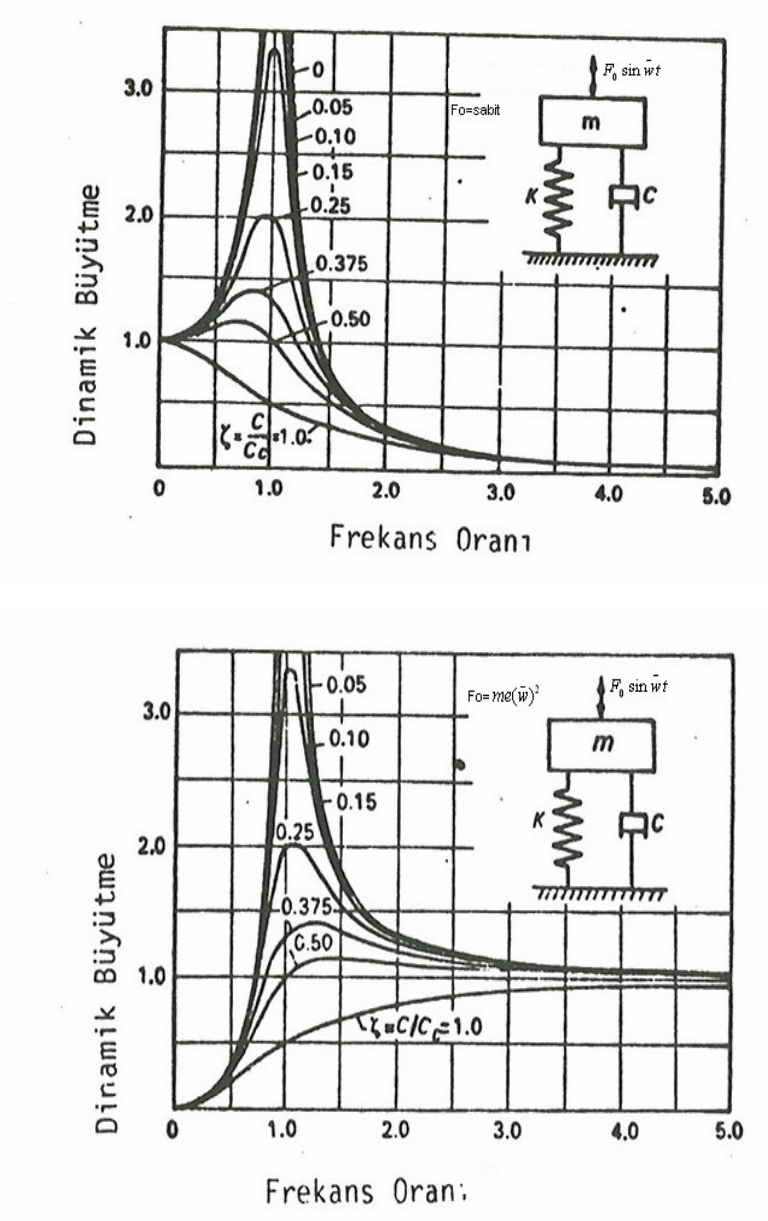
$$\frac{1}{(1-\xi^2)^2 + (2\zeta\xi)^2} \tag{2.67}$$

şeklindedir.

Sinüzoidal kuvvet ϖ açısal hızı ile dönen, m kütlesi ve e eksantrisitesinden ileri geliyorsa sisteme gelen maksimum kuvvet,

$$y_{\max} = \chi me(\bar{w})^2 = \chi(\frac{\bar{w}}{w})^2 mew^2 = \xi^2 \chi mew^2 = \chi' mew^2 \qquad \textbf{(2.68)}$$

olur. ξ ve ζ ye bağlı olan dinamik büyütme çarpanın değişimleri aşağıdaki grafikte verilmiştir.



Şekil 2.10: Bir Serbestlik Dereceli Sönümlü Sistemin Sabit Kuvvet ve Dönen Kütle

Halinde Mukabelesi (Demir ve Öztürk, 1992)

Mesnet Hareketi İle Zorlama

Mesnedin,

$$x(t) = x_0 \sin \bar{w} t \tag{2.69}$$

hareketini yaptığını düşünelim. Bu durumda sisteme,

$$F(t) = -mx^{\cdot\cdot}(t) = mx_0(\bar{w})^2 \sin \bar{w} t \tag{2.70}$$

kuvveti etkir. Çözüm yolu bir önceki kısımda, sinüzoidal kuvvet etkimesi durumu ile aynıdır.

2.5 Çok Serbestlik Dereceli Sistemler

Bir sistemin hareket halinde bulunduğu konum, eğer birden fazla parametrenin verilmesi yolu ile belirlenebiliyorsa, bu tür bir sistem çok serbestlik dereceli bir sistemdir. Sistemin serbestlik derecesi, hareket halindeki konumu tam olarak belirlemek için gerek ve yeter sayıdaki bağımsız parametre sayısına eşittir. Bu tür bir sistem, serbestlik derecesi kadar bağımsız hareket türüne sahiptir. Bir serbestlik dereceli sistemlerde, hareket tek diferansiyel denklemle ifade edilebilir. Fakat, çok serbestlik dereceli sistemlerde, birden fazla serbest yer değiştirme parametresi olduğu için aynı sayıda da diferansiyel denklem elde edilir.

Sisteme etkiyen dış kuvvet,

$$\{F(t)\} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \\ \dots \\ \dots. \\ F_n(t) \end{Bmatrix} \tag{2.71}$$

olsun. Bu kuvvetin bir kısmı sistemi ivmelendirir, bir kısmı da tıpkı yaylarda olduğu gibi deformasyonu geri çağırıcı kuvvetleri kuvvetlere gider. Bir kısmı da sönüm yolu ile harcanır. Bu geri çağırıcı kuvvetleri ve deformasyonları da,

$$\{P(t)\}=\begin{Bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \\ P_3(t) \\ \dots \\ .... \\ P_n(t) \end{Bmatrix}, \qquad \{y(t)\}=\begin{Bmatrix} y_1(t) \\ y_2(t) \\ y_3(t) \\ \dots \\ .... \\ y_n(t) \end{Bmatrix} \tag{2.72}$$

ile gösterelim. Burada gerek kuvvetler gerekse deformasyonlar zamanla değişir ve lineer-elastik sistemler söz konusudur. Sistemin hareket denklemi,

$$[m]\{y^{\cdot\cdot}\}+[c]\{y^{\cdot}\}+[k]\{y\}=\{F(t)\} \tag{2.73}$$

olur. Burada,

$[m]$: kütle matrisi

$[c]$: sönüm matrisi

$[k]$: rijitlik matrisidir.

2.5.1 Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Serbest Titreşimleri

Bu hale ait diferansiyel denklem,

$$[m]\{y^{\cdot\cdot}\}+[c]\{y^{\cdot}\}+[k]\{y\}=0 \tag{2.74}$$

denklemidir. Denklemin çözümünü birden fazla varsayıp, bu çözümlerden i. inci çözümü,

$$\{y_i(t)\}=\begin{Bmatrix} a_{1i}(t) \\ a_{2i}(t) \\ a_{3i}(t) \\ \dots \\ .... \\ a_{ni}(t) \end{Bmatrix} f_i(t)\,, \tag{2.75}$$

ve ya,

$$\{y_i\}=\{a_i\}f_i(t) \tag{2.76}$$

olsun. Buradan sistemin hareket denklemi (sönümsüz serbest titreşim için),

$$[m]\{a_i\}\frac{f_i^{\cdot\cdot}(t)}{f_i(t)}+[k]\{a_i\}=0 \qquad \textbf{(2.77)}$$

olur.

$$\frac{f_i^{\cdot\cdot}(t)}{f_i(t)}=-w_i^2 \qquad \textbf{(2.78)}$$

dir. Bu denklemden,

$$f_i(t)=A_i\sin w_i t+B_i\cos w_i t \qquad \textbf{(2.79)}$$

elde edilir.

$$\Delta=\left\{[k]-w_i^2[m]\right\}=0 \qquad \textbf{(2.80)}$$

Denklemi ile (2.77) ve (2.78) kullanılarak,

$$\{a_i\}=\begin{Bmatrix} a_{1i}(t)\\ a_{2i}(t)\\ a_{3i}(t)\\ \cdots\\ \cdots.\\ a_{ni}(t)\end{Bmatrix} \qquad \textbf{(2.81)}$$

bulunur.

Ve sonuçta,

$$\{y_i(t)\}=\begin{Bmatrix} a_{1i}\\ a_{2i}\\ a_{3i}\\ \cdots\\ \cdots.\\ a_{ni}\end{Bmatrix}(A_i\ \sin\ w_i t+B_i\ \cos\ w_i t) \qquad \textbf{(2.82)}$$

bulunur. Katsayılar ise başlangıç şartlarından belirlenir.

2.5.2 Çok Serbestlik Dereceli Sistemlerin Zorlanmış Titreşimleri

Sönümsüz durum için hareket denklemi,

$$[m]\{y^{\cdot\cdot}\}+[k]\{y\}=\{F(t)\} \tag{2.83}$$

dir. Burada deplasmanları bir önceki kısımda bulunan $[a]$ vektörleri ile tanımlarsak,

$$\{y\}=[a]\{\Phi(t)\} \tag{2.84}$$

deriz. (2.84) ve (2.85) kullanılarak,

$$L_i^2\Phi_i^{\cdot\cdot}+L_i^2w_i^2\Phi_i=\{a_i\}^T\{F(t)\} \tag{2.85}$$

denklemi bulunur. Genel çözüm ise,

$$\Phi_i=A_i\cos w_it+B_i\sin w_it+\frac{1}{w_i}.\frac{1}{L_i^2}\int_0^t\{a_i\}^T\{F(\tau)\}\sin w_i(t-\tau)d\tau \tag{2.86}$$

olarak bulunur. Katsayılarda başlangıç şartları kullanılarak bulunur. Sonuçta,

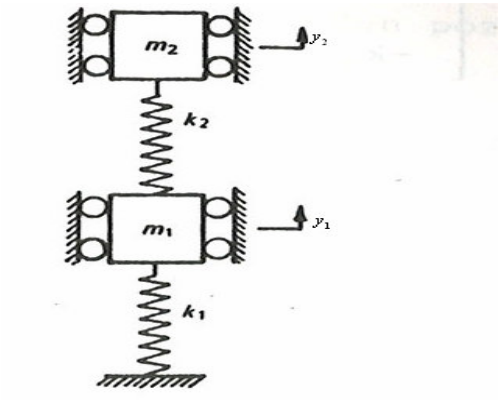
$$\{y\}=[a]\{\Phi\}=\sum_1^n\{a_i\}\Phi_i \tag{2.87}$$

olarak bulunur.

2.6 İki Serbestlik Dereceli Sistemler

Burada iki serbestlik dereceli sistemlerin özel olarak ele alınmasının sebebi, makina temellerinin projelendirilmesinde çeşitli durumlarda karşılaşılmasıdır. Mesela, şahmerdan temelleri, sönümleyiciler üzerine oturan blok temeller, çerçeve temeller, temellerin titreşimlerinin nötralize edilmesi durumları örnek olarak verilebilir.

İki serbestlik dereceli bir sistem aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.11: Sönümsüz İki Serbestlik Dereceli Sistem (Demir ve Öztürk, 1992)

2.6.1 Serbest Titreşim Durumu

Sistemin hareket denklemleri,

$$m_1 y_1^{\cdot\cdot} + k_1 y_1 + k_2 (y_1 - y_2) = 0 \qquad \textbf{(2.88)}$$

$$m_2 y_2^{\cdot\cdot} + k_2 (y_2 - y_1) = 0 \qquad \textbf{(2.89)}$$

olarak yazılır. Sistemin rijitlik matrisini yazmak istersek,

$$[k] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2.90)}$$

olarak yazılabilir. Buradan denklemi matrisler kullanılarak da, doğrudan yazılabileceği görülmektedir.

Sistemin özel frekanslarına ait karakteristik denklem,

$$[\Delta] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 - m_1 w_n^2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 - m_2 w_n^2 \end{bmatrix} \qquad \textbf{(2.91)}$$

denklemidir. Bu denklemden özel açısal frekanslar $[w_1 \quad w_2]$ bulunur.

t=0 anında deplasmanlar sıfır, m_1 kütlesinin hızı sıfır ve m_2 kütlesinin hızı v olsun. Bu durumda,

$$y_1 = \frac{(w_{n2}^2 - w_2^2)(w_{n2}^2 - w_1^2)}{w_{n2}^2 (w_1^2 - w_2^2)} v \left[\frac{\sin w_1 t}{w_1} - \frac{\sin w_2 t}{w_2} \right] \qquad \textbf{(2.92)}$$

$$y_2 = \frac{v}{w_1^2 - w_2^2} \left[\frac{w_{n2}^2 - w_2^2}{w_1} \sin w_1 t - \frac{(w_{n2}^2 - w_1^2)}{w_2} \sin w_2 t \right] \qquad \textbf{(2.93)}$$

olarak bulunur. Zati titreşim sayısı küçük olan modun genellikle genliği büyüktür. Yani açısal frekansı büyük olan daha etkilidir. $w_1 > w_2$ olduğu kabul edilip, büyük olan w_n ye ait olan kısım ihmal edilirse genlikler,

$$A_1 = \frac{(w_{n2}^2 - w_2^2)(w_{n2}^2 - w_1^2)}{w_{n2}^2 (w_1^2 - w_2^2) w_2} v \sin w_2 t \qquad \textbf{(2.94)}$$

$$A_2 = \frac{(w_{n2}^2 - w_1^2)}{w_2 (w_1^2 - w_2^2)} v \sin w_2 t \qquad \textbf{(2.95)}$$

olarak belirlenmiş olur. Bu inceleme şahmerdan temellerinin hesabında kullanılır. Bu temellerde tokmağın çarpması ile, çarpmadan önce sükunette olan m_2 ye tekabül eden örs ani olarak v hızı kazanır. Örs k_2 ye tekabül eden yaylı elemanlarla, m_1 e tekabül eden ve hızı sıfır olan temel kütlesine oturmaktadır. Temel kütlesi de yay katsayısı k_1 e tekabül eden zemine istinat etmektedir.

2.6.2 Zorlanmış Titreşim Durumu

Kuvvetin m_2 Kütlesine Etkimesi Hali

Sisteme ait hareket denklemleri yazılırsa,

$$m_1 y_1^{\cdot\cdot} + k_1 y_1 + k_2 (y_1 - y_2) = 0 \qquad \textbf{(2.96)}$$

$$m_2 y_2^{\cdot\cdot} + k_2 (y_2 - y_1) = P_0 \sin w_m t \qquad \textbf{(2.97)}$$

elde edilir.

$$M = m_2 / m_1 \qquad \textbf{(2.98)}$$

denilirse, m_1 ve m_2 kütlelerinin genlikleri,

$$A_1 = \frac{w_{n2}^2}{m_1 f(w_m^2)} P_0 \qquad \textbf{(2.99)}$$

$$A_2 = \frac{(1+M) w_{n1}^2 + M w_{n2}^2 - w_m^2}{m_2 f(w_m^2)} P_0 \qquad \textbf{(2.100)}$$

olur. Burada,

$$f(w_m^2) = w_m^4 - \left[w_{n1}^2 + w_{n2}^2\right]\left[1+M\right] w_m^2 + \left[1+M\right] w_{n1}^2 w_{n2}^2 = 0 \qquad \textbf{(2.101)}$$

dir. Bu problem uygulamada düşey pistonlu makinaların sönümleyiciler üzerine oturan blok temellerine tekabül eder. Ayrıca çerçeve temellerin genlik metodu ile hesabında kullanılır (Demir ve Öztürk, 1992).

Kuvvetin m_1 Kütlesine Etkimesi Hali

Sisteme ait hareket denklemleri yazılırsa,

$$m_1 y_1^{\cdot\cdot} + k_1 y_1 + k_2 (y_1 - y_2) = P_0 \sin w_m t \qquad \textbf{(2.102)}$$

$$m_2 \ddot{y_2} + k_2(y_2 - y_1) = 0 \qquad \textbf{(2.103)}$$

elde edilir. Genlikler de,

$$A_1 = \frac{w_{n2}^2 - w_m^2}{m_1 f(w_m^2)} P_0 \qquad \textbf{(2.104)}$$

$$A_2 = \frac{w_{n2}^2}{m_1 f(w_m^2)} P_0 \qquad \textbf{(2.105)}$$

olmuş olur. Buradan dinamik çarpanlar elde edilir.

$$A_{st} = P_0 / k_1 \quad , \eta_1 = w_m / \sqrt{k_1 / m_1} \quad , \eta_2 = w_m / \sqrt{k_2 / m_2} \qquad \textbf{(2.106)}$$

Olmak üzere dinamik çarpanlar,

$$\chi_1 = |A_1| / A_{st}, \ \chi_2 = |A_2| / A_{st} \qquad \textbf{(2.107)}$$

olarak belirlenir.

$$\eta_1 = \eta_2 = \eta \qquad \textbf{(2.108)}$$

ise,

$$\chi_1 = \frac{1-\eta^2}{(1-\eta^2)(1+M-\eta^2) - M}, \ \chi_2 = \frac{1}{(1-\eta^2)(1+M-\eta^2) - M} \qquad \textbf{(2.109)}$$

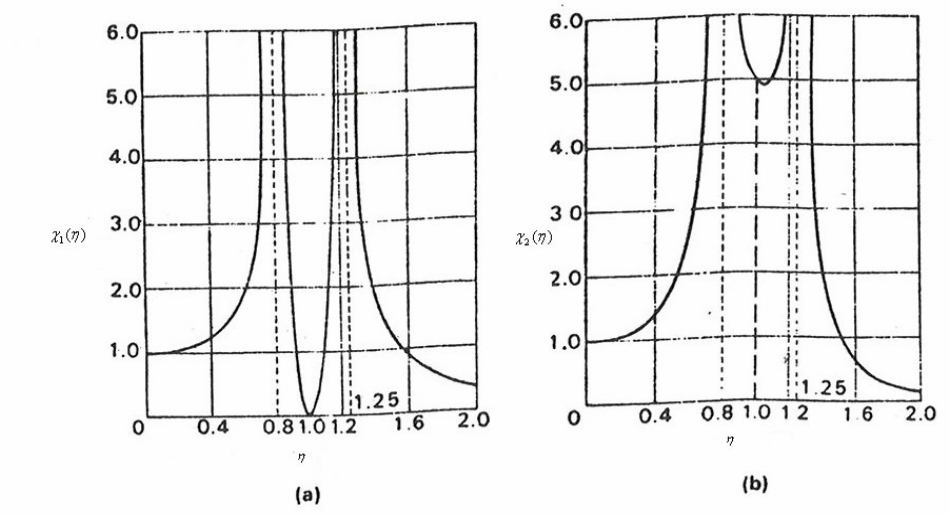
olur.

(2.107) denkleminden anlaşılacağı üzere, $\chi_1 = 0$ için $\eta_2 = 1$ dir. Yani,

$$w_m = \sqrt{k_2 / m_2} \qquad \textbf{(2.110)}$$

olmalıdır. Bu takdirde, $\eta_1 = 0$ olacak ve m_1 kütlesi $P_0 \sin w_m t$ kuvvetine maruz olmasına rağmen hareket etmeyecektir. Bu husus, titreşim yalıtımında kullanılır. $P_0 \sin w_m t$ kuvvetine maruz olan ve k_1 e oturan m_1 kütlesi normal titreşim hareketi yapacaktır. Herhangi bir sebeple bu hareket giderilmek istenirse (k_1, m_1) sistemine $w_m = \sqrt{k_2 / m_2}$ olacak (k_2, m_2) sistemi eklenirse bu gerçekleşebilir. Bu durum titreşimlerin i yalıtımında kullanılır.

$k_2 / m_2 = k_1 / m_1$ ve $m_2 / m_1 = 0.2$ olması halinde $\chi_1(\eta)$ ve $\chi_2(\eta)$ artış fonksiyonları aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



Şekil 2.12: Sönümsüz İki Serbestlik Dereceli Bir Sistem İçin $k_2 / m_2 = k_1 / m_1$ ve $m_2 / m_1 = 0.2$ Olması Hali İçin $\chi_1(\eta)$ ve $\chi_2(\eta)$ Değişim Eğrisi (Demir ve Öztürk, 1992)

3. MAKİNALARIN VE MAKİNA TEMELLERİNİN TİPLERİ

3.1 Makina Tipleri

Darbe ve çalışma hızlarına göre makinalar aşağıdaki gibi sınıflandırılabilirler.

3.1.1 İmpakt Kuvveti Oluşturan Makinalar

Şahmerdanlar ve presler bu tip makinalara örnek olarak verilebilir. Yavaş çalışan makinalarda darbe adedi dakikada 60-80, hızlı çalışanlarda ise 150 veya daha fazladır. Bu tip makinalar çok az boşlu hacmi olan blok tipi temeller üzerine oturtulurlar. Çevrenin titreşimden daha az etkilenmesi için titreşim sönümleyicilere özen gösterilir.

3.1.2 Çok Düşük Hızlı Makinalar

Kağıt sanayisinde kullanılan makinalar örnek olarak verilebilir. Devir sayıları dakikada yaklaşık 50 olan bu tip makinaların titreşim genlikleri tehlikesiz olmakla beraber, sönümlemeye ihtiyaç kalmaksızın blok temeller üzerine oturtulabilirler.

3.1.3 Düşük Hızlı Makinalar

Devir sayıları dakikada en çok 600 olan makinalardır. Blok veya bileşik temel tipi uygun değildir. Temel yaylandırılmış veya doğrudan zemine oturtularak inşa edilir.

3.1.4 Devir Sayıları Dakikada 600- 1500 Arasında Olan Makinalar

Bu tür makinalar her türlü temeller üzerine oturtulabilir. Bununla birlikte, temel yaylandırılmalı ve genlikleri küçültmek için gerekli önlemler alınmalıdır.

3.1.5 Yüksek Devirli Makinalar

Türbin ve yüksek hızla dönen kompresörler bu tip makinalara örnek olarak verilebilir. Devir sayıları dakikada 1500 veya daha yüksektir. Doğrudan zemin üzerine oturtulan, açık çerçeve şeklinde temel sistemi üzerine oturtulabilirler.

Bunların dışında, küçük kütleli ve düşük kinetik enerjiye sahip makinalar özel bir temel sistemi düşünülmeden, doğrudan zemine veya elastik bir mesnetleme sistemi ile döşemeye oturtulabilir. Burada dikkat edilecek husus, oluşabilecek küçük dinamik tesirlerin ihmal edilebilecek mertebede olup olmamasıdır. Dinamik etkisi dikkate alınmayan kuvvetler statik olarak düşünülür. Diğer bir önemli nokta da, oluşabilecek

en küçük dinamik yükün sönülmenmiş olarak zemine veya döşemeye aktarılmasıdır. Motopomp, atölye makinaları, dokuma tezgahları gibi küçük makinalarda dinamik tesir dikkate alınır.

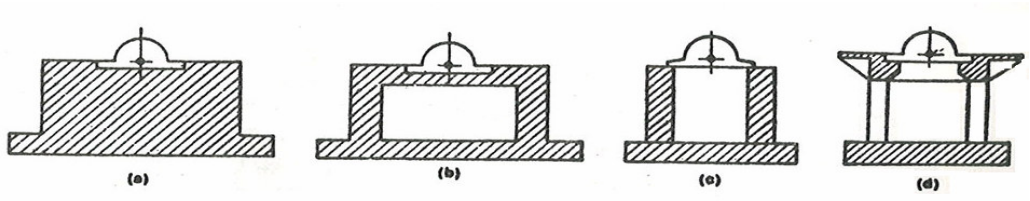
Makina tipine göre kullanılabilecek makina temellerini genel olarak sınıflandıracak olursak,

1. İmpakt tesiri oluşturan makinalar için temeller. Örnek olarak şahmerdanlar bu gruptadır.
2. Periyodik kuvvetler oluşturan makinalar için temeller. Pistonlu makinalar, örnek olarak kompresörler bu grup içindedir.
3. Yüksek hızlı makinalar için temeller. Türbinler bu grupta incelenir.
4. Özel döndürme mekanizması ile çalışan makinalar. Hadde makinaları, tulumbalar, pompalar, döner kompresörler, değirmenler ve kırma makinaları bu gruptadırlar.

3.2 Makina Temellerinin Tipleri

Makina tiplerine, büyüklüklerine, önemlerine ve zemin durumuna göre seçilen temel tipleri aşağıdaki gibidir.

1. Blok veya masif tip temeller: Bu temeller masif bir kütleden ibaret olup makinalar bunların üzerine oturtulur.
2. Sandık veya keson tipi temeller: Bunlar içi boş bloktan ibarettir. Pratikte bunların kombinasyonu çok kere kullanılır.
3. Duvar tipi temeller: Makina iki paralel duvar üzerine oturtulur.
4. Çerçeve tipi temeller: Bunlar, kolonlar ve kirişlerden oluşup, yatay bir ızgara sistemi gibidir. Makinalar bu ızgaranın üzerine oturtulur.



Şekil 3.1: Makina Temellerinin Tipleri (Demir ve Öztürk, 1992)

a) Blok Tipi b) Sandık Tipi c) Duvar Tipi d) Çerçeve Tipi

3.3 Temel Tipinin Seçimi

Makina, temel ve çevre için zararlı tesirler önlenerek makinaların oluşturduğu dinamik etkiler temele ve zemine aktarılmalıdır. Bunun için, temele oturtulacak makinanın bütün özellikleri göz önüne alınarak en uygun temel tipi seçilmelidir. Ayrıca, gerekli durumlarda titreşim sönümleyen altlıklar veya yaylar kullanılmalıdır.

Makina temellerinde, kullanılan makinanın işletme devir sayısı önemlidir. Devir sayısı 500 dev. / dak. olan bir makina orta frekansta, 1000 dev. / dak. olan bir makina da yüksek frekansta kabul edilebilir.

Orta frekansın altında çalışan makinalar için büyük taban alanı blok tipi temel seçilir. Büyük pistonlu makinalar, kompresörler, gaz ile çalışan elektrik üretim makinaları ve pompalar bu gruba girerler. Temel taban alanı büyüdükçe, temelin zati titreşim sayısı da büyür. Böyle durumlarda, makinanın frekansı temelin frekansından küçük olur.

Orta ile yüksek arası bir frekansta çalışan makinalar için, yaylar ve elastik altlıklar üzerine oturan blok tipi temeller uygundur. Orta büyüklükte pistonlu makinalar, dizel motorlar, döner makinalar örnek olarak verilebilir. Böyle bir temel tipinin seçimi ile, temelin özel titreşim frekansı makinanın frekansının oldukça altına düşer. Yay elemanlar kullanarak çevre, zararlı titreşimlerden kurtarılabilir. Özellikle devir sayıları büyük sınırlar içinde olan makinalarda bunu yapmak uygun olur.

Devir sayıları çok yüksek olan makinalarda, blok temel kullanılması halinde oturma alanı küçük tutularak ve uygun yalıtım altlıkları ile özel frekansları düşürülür. Patlarlı makinalar, elektrik motorları ve turbo jeneratör takımları bu tip makinalar arasına girer. Turbo makinalarda, kolonlar arasına yardımcı ekipman yerleştirilmesi açısından çerçeve tipi temel uygun olur (Demir ve Öztürk, 1992).

3.4 Makina Temelinin Kabul Edilebilecek Titreşim Genlikleri

Makina temellerinde yatay ve düşey titreşimler için makinaların çalışmaları üzerinde yapılan gözlemlerle, sınır titreşim genlikleri bulunmuştur. Çevre yapıların titreşim hassasiyetleri de, bu değerlerin tespitinde göz önüne alınmıştır. Makina temeli projelendirmesinde dinamik tesirlerden temelde oluşan titreşim genliklerinin bu sınır değerleri aşmaması gerekir.

D.D. Barkan 'ın çalışmaları sonucu tavsiye edilen sınır titreşim genlikleri aşağıdaki gibidir.

Tablo 3.1: Makina Tiplerine Göre Sınır Titreşim Genlikleri (Demir ve Öztürk, 1992)

Makina Tipi	**Sınır Titreşim Genlikleri (cm)**	
1. Düşük hızlı makinalar (500 dev/ dak.)	**0.02**	**0.025**
2. Şahmerdan temelleri	**0.1**	**0.12**
3. Yüksek hızlı makinalar		
a. 3000 dev/ dak.		
i. Düşey Titreşimler	**0.002**	**0.003**
ii. Yatay Titreşimler	**0.004**	**0.005**
b. 1500 dev/ dak.		
i. Düşey Titreşimler	**0.004**	**0.006**
ii. Yatay Titreşimler	**0.007**	**0.009**

3.5 Zemin ve Zemin Yay Katsayıları

Zemin gerilmeleri, maruz kaldıkları yüklere göre değişir. Temel altındaki zeminde oluşan gerilmeler hem zemin özelliklerine hem de temel tabanının büyüklüğüne göre derinlere ve yanlara doğru değişir. Bunun dışında, titreşim sırasında zeminin de yaylanması ve bundan oluşan atalet kuvvetleri de söz konusudur.

Yapılan araştırmalar sonucu, zemin özelliklerine göre müsaade edilen zemin emniyet gerilmeleri, buna bağlı olarak da zeminin elastik üniform basınç tasman katsayısı C_z tayin edilmiştir. Rijit temel tabanı altındaki basınç gerilmesinin bu gerilmenin sebep olduğu tasmanın elastik kısmına oranı olarak tanımlanabilir. Birimi, N/cm^3 dir. Benzer şekilde, temel altındaki ortalama kayma gerilmesinin temelin kayma hareketinin elastik kısmına oranına da elastik üniform kayma tasman katsayısı C_τ denir. Bunun da birimi, N/cm^3 dir.

Bunlardan başka, temel kütlesinin sallanma titreşimleri bakımından C_θ üniform olmayan basınç tasman katsayısı vardır. Temel kütlesinin düşey bir eksen etrafında dönmesi söz konusu ise kayma gerilmeleri ve üniform olmayan kayma tasman katsayısı C_ψ söz konusu olur.

Bu katsayılar gerçekte hem zeminin cinsine hem de temel tabanını büyüklük ve şekline bağlıdır. Ancak uygulamada sadece zemin cinsine bağlı oldukları varsayılır.

Aşağıdaki tabloda zemin cinsi ve zemin emniyet gerilmelerine göre tavsiye edilen C_z değerleri verilmiştir.

Tablo 3.2: Müsaade Edilen C_z Değerleri (Demir ve Öztürk, 1992)

Zemin Cinsi	**Zemin Emniyet Gerilmesi** (σ_z) (N/cm^2)	**Üniform basınç tasman katsayısı** (C_z) (N/cm^3)
Zayıf zeminler	**10-20**	**20-40**
Orta zeminler	**30-40**	**50-60**
Sağlam zeminler	**50**	**70**
Kayalar	**50**	**70**

Bu tabloda verilen değerler, taban alanı 10 m² veya daha büyük temeller için kullanılabilirler. Temel alanı daha küçük ise $\sqrt{10/F}$ çarpanı ile büyütülmelidirler. F, temel alanının m² cinsinden değeridir.

4. BLOK TİPİ MAKİNA TEMELLERİ

Blok tipi makina temellerinde genellikle altı serbestlik derecesi vardır. Bunlar x, y, z eksenleri doğrultularında deplasman ve bu eksenler etrafındaki dönme büyüklükleridir. Burada, D.D. Barkın' ın önerdiği ve pratikte yeter doğrulukta sonuç veren ele alınmıştır.

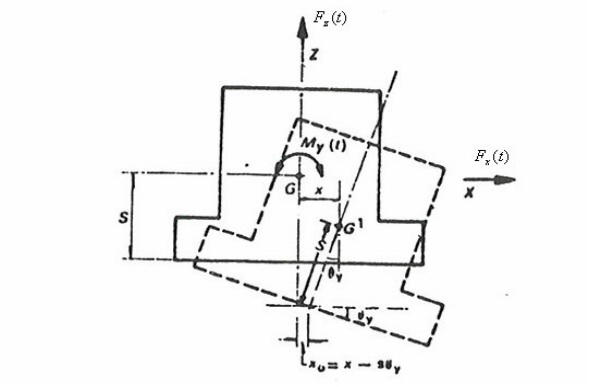
Barkan' a göre sönümün sistemin özel frekansı üzerindeki etkisi azdır. Sistemin özel frekansı ile makinanın frekansı birbirinden yeterince uzaksa sönümün titreşim genliği üzerindeki etkisi ihmal edilebilir.

Eğer makina ile temelin ortak ağırlık merkezi ile temel taban alanının ağırlık merkezi temelin asal düzlemlerinden biri içinde aynı düşey üzerinde bulunuyorlarsa, temelin düşey doğrultudaki öteleme hareketleri ve kütle merkezi ile taban alanının ağırlık merkezinin üzerinde bulunduğu düşey eksen etrafındaki dönme hareketleri birbirinden ve diğerlerinden bağımsız hareketler olarak ortaya çıkar.

4.1 Blok Temellerin Hesabı

D.D. Barkan tarafından önerilen hesap metodu burada anlatılacaktır.

Makina ile temelin ortak ağırlık merkezinin aynı düşey üzerinde bulundukları kabul edilmiştir. Bu durumda, düşey eksendeki öteleme ve dönme modları birbirinden ve diğer modlardan bağımsız olmakla beraber, z düşey eksen olmak üzere, xz ve yz düzlemlerinden her birinde öteleme ve dönme hareketleri kendi aralarında bağımlıdırlar.



Şekil 4.1: Titreşen Kuvvetlere Maruz Temelin xz Düzleminde Deplasmanları

(Demir ve Öztürk, 1992)

m : Temel Sisteminin kütlesi

W : Temel Sisteminin ağırlığı

A_f : Temel Taban Alanı

I_{my} : y Eksenine Göre Kütle Atalet Momenti

I_{mz} : z Eksenine Göre Kütle Atalet Momenti

$F_z(t)$: z Doğrultusunda Etkiyen Zamanla Değişen Kuvvet

$F_x(t)$: x Doğrultusunda Etkiyen Zamanla Değişen Kuvvet

$M_y(t)$: y Doğrultusunda Etkiyen Zamanla Değişen Moment

G : Makina ile Temelin Ortak Ağırlık Merkezi

s : G nin Temel Tabanının Elastik Merkezinden Yüksekliği

$K_z(t)$: z Doğrultusundaki Ötelenme Yay Katsayısı

$K_x(t)$: x Doğrultusundaki Ötelenme Yay Katsayısı

$K_{\theta y}(t)$: y Doğrultusundaki Dönme Yay Katsayısı

$K_\varphi(t)$: z Doğrultusundaki Dönme Yay Katsayısı

x : x Doğrultusundaki Ötelenme

z : z Doğrultusundaki Ötelenme

θ_y : y Doğrultusundaki Dönme

φ : z Doğrultusundaki Dönme

Buna göre hareket denklemleri yazılacak olursa,

$$mz^{\cdot\cdot} + K_z z = F_z(t) \quad \textbf{(4.1)}$$

$$mx^{\cdot\cdot} + K_x(x - s\theta_y) = F_x(t) \quad \textbf{(4.2)}$$

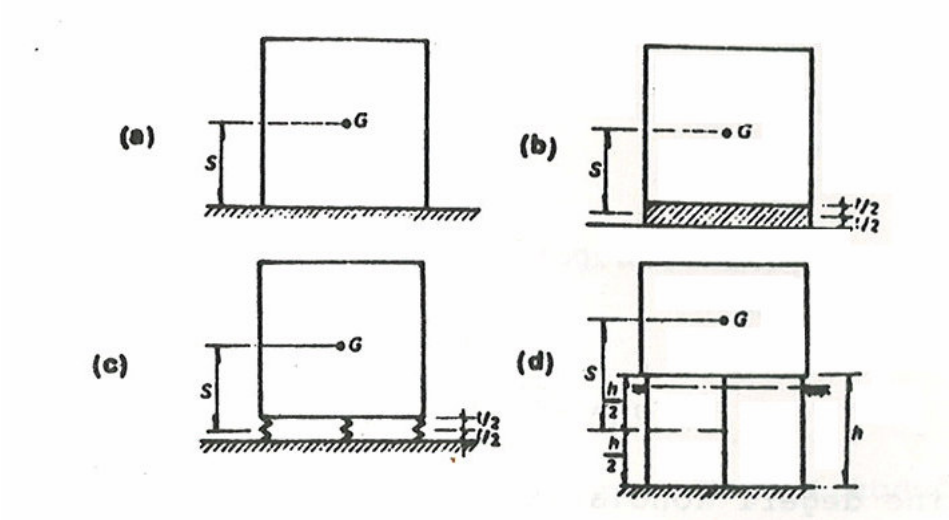
$$I_{my}\theta_y^{\cdot\cdot} - K_x s_x + (K_{\theta y} - Ws + K_x s^2)\theta_y = M_y(t) \quad \textbf{(4.3)}$$

Görüldüğü gibi z (t) birinci denklemden doğrudan elde edilir. x (t) ve θ_y (t) ise ikinci ve üçüncü denklemleri beraber kullanarak bulunur.

Sinüzoidal bir moment etkisi altında ortaya çıkacak z ekseni etrafındaki dönme,

$$I_{mz}\ddot{\varphi} + K_{\varphi}\varphi = F_0 \sin wt \qquad \textbf{(4.4)}$$

denklemi ile gösterilir. Bu denklemden de, dönmenin diğer diferansiyel denklemlerden bağımsız olduğu ve sadece bu denklem ile çözülebileceği görülüyor.



Şekil 4.2: Çeşitli Mesnetler Üzerine Oturan Temel İçin s Değerleri a) Zemin Üzerine b) Elastik Yatak Üzerine c) Yaylar Üzerine d) Kazıklar Üzerine (Demir ve Öztürk, 1992)

Yukarıdaki şekilde çeşitli mesnetleme durumları için hesaplarda kullanılacak s değerleri gösterilmiştir.

4.2 Diferansiyel Denklemlerin Çözümü

4.2.1 Düşey Titreşimler

Açısal frekans ve makinanın temele uyguladığı tesir,

$$w_z = \sqrt{K_z / m}\ , \quad F_z(t) = F_0 \sin w_m t \qquad \textbf{(4.5)}$$

ile gösterilirse, F_0 kuvvetinin statik halde sebep olacağı deplasman,

$$z_{st} = F_0 / K_z \qquad \textbf{(4.6)}$$

olup, maksimum deplasman ve zemine geçen kuvvet,

$$z_{\max} = \frac{1}{1-(w_m / w_z)^2} z_{st}, \quad Z_{\max} = \frac{1}{1-(w_m / w_z)^2} F_0 \tag{4.7}$$

olarak bulunur. Buradan, frekansların birbirine yakın olması durumunda hem titreşim genliğinin hem de zemine geçen kuvvetin büyüyeceği anlaşılır.

4.2.2 Düşey Eksen Etrafında Dönme Hareketi

Çözüm yolu düşey eksendeki titreşim ile aynıdır.

$$w_\varphi = \sqrt{K_\varphi / m} \tag{4.8}$$

$$\varphi_{st} = F_0 / K_\varphi \tag{4.9}$$

Maksimum dönme ve zemine geçen moment,

$$\varphi_{\max} = \frac{1}{1-(w_m / w_\varphi)^2} \varphi_{st}, \quad M_{\max} = \frac{1}{1-(w_m / w_\varphi)^2} F_0 \tag{4.10}$$

olur.

4.2.3 Kayma ve Sallanma Hareketi

xz düzlemi içerisindeki kayma ve sallanma hareketi incelenecektir.

Özel Frekanslar

x doğrultusundaki kayma ve y etrafındaki sallanma hareketinden oluşan bağımlı hareketin özel frekansları için karakteristik denklem,

$$w_n^4 - \frac{w_{\theta y}^2 + w_x^2}{\alpha_y} w_n^2 + \frac{w_{\theta y}^2 w_x^2}{\alpha_y} = 0 \tag{4.11}$$

denklemidir. Burada, α_y ağırlık merkezinden geçen y eksenine göre kütle atalet momentinin (I_{my}), temel tabanının elastik merkezinden geçen ve y eksenine paralel olan eksen etrafındaki kütle atalet momentine (I_{m0y}) oranıdır.

$$\alpha_y = I_{my} / I_{m0y} \tag{4.12}$$

$$w_{\theta y}^2 = K_{\theta y} - Ws / I_{m0y} \tag{4.13}$$

$$w_x^2 = K_x / m \tag{4.14}$$

Frekans karakteristik denkleminden,

$$w_1^2 = \frac{1}{2\alpha_y}\left[w_{\theta y}^2 + w_x^2 + \sqrt{(w_{\theta y}^2 + w_x^2)^2 - 4\alpha_y w_{\theta y}^2 w_x^2}\right] \tag{4.15}$$

$$w_2^2 = \frac{1}{2\alpha_y}\left[w_{\theta y}^2 + w_x^2 - \sqrt{(w_{\theta y}^2 + w_x^2)^2 - 4\alpha_y w_{\theta y}^2 w_x^2}\right] \tag{4.16}$$

elde edilir.

Genlikler

Sisteme $F_x \sin w_m t$ kuvveti ile $M_y \sin w_m t$ momentinin birlikte etkimesi halinde yatay hareketin a_x ve dönme hareketinin $a_{\theta y}$ genliklerinin değerleri,

$$a_x = \left[(K_{\theta y} - Ws + K_x\rho^2 - I_{my} w_m^2)F_x - K_x s M_y\right] / \left[mI_{my}(w_1^2 - w_m^2)(w_2^2 - w_m^2)\right] \tag{4.17}$$

$$a_{\theta y} = \left[(K_x s F_x + (K_x - m w_m^2)M_y\right] / \left[mI_{my}(w_1^2 - w_m^2)(w_2^2 - w_m^2)\right] \tag{4.18}$$

olur. Ayrıca temel yüksekliği H olmak üzere, temelin üst kenarının x doğrultusundaki yatay deplasmanı,

$$a_x + (H - s)a_{\theta y} \tag{4.19}$$

olur.

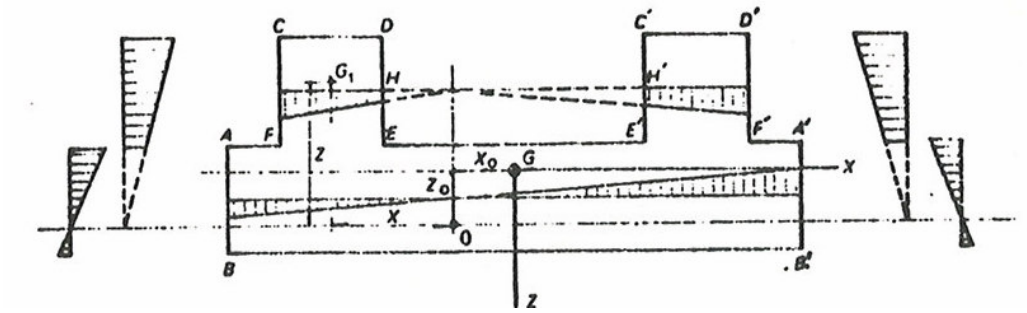
5. PİSTONLU MAKİNALARIN TEMELLERİ

Pistonlu makinalar; buhar makinaları, dizel makinaları, iletim kompresörleri ve iletim pompaları gibi makina gruplarını kapsar. Pistonlu makinaların temelleri genellikle fonksiyonel sebeplerden dolayı boşluklar bırakılmış blok tipi temellerdir.

5.1 Temele Etkiyen Kuvvetler

Projelendirme statik ve dinamik yükler için yapılır. Statik yükler için temelin, makinanın ağırlıkları ve diğer statik yükler ele alınır. Dinamik hesapta, etkiyen dinamik yükler bir yorulma katsayısı ile büyütülür. Bu katsayısı 3 olarak kabul edilir. Temele etkiyen kuvvetler büyütüldüğü için bunların neden olduğu atalet ve reaksiyon kuvvetleri de bu büyütme çarpanı ile büyütülmüş olur.

Temele etkiyen atalet kuvvetleri yayılı kuvvetlerdir. Bunların kuvvet ve moment olarak çeşitli doğrultulardaki değerleri bileşke olarak bulunabilir. Kesit tesirlerinin belirlenebilmesi için yayılı olan atalet kuvvetlerinin doğru bir biçimde dağıtılması gerekir. Örnek olarak, Şekil 5.1 de gösterilen temel dikdörtgenlerden oluşmaktadır. Bu dikdörtgenlerden CDEF parçasının xz düzlemindeki titreşimleri ele alınsın.



Şekil 5.1: Atalet Kuvvetlerinin Dağılımı (Demir ve Öztürk, 1992)

Temel titreşimlerinin düşey ve yatay doğrultudaki genlikleri a_x ve a_z, xz düzlemi içerisindeki dönme hareketinin genliği de $a_{\theta y}$ ile gösterilsin. x_0, z_0 ise temel ve makinanın ortak ağırlık merkezinden geçen asal eksenlere göre 0 dönme merkezinin koordinatları olarak gösterilirse,

$$x_0 = -a_z / a_{\theta y} \ , \quad z_0 = -a_x / a_{\theta y} \qquad \textbf{(5.1)}$$

olur. CDEF kısmına düşen atalet kuvvetleri aşağıdaki formüllerle bulunur.

$$(P_{mz})_{CDEF} = W_{CDEF}\left[\frac{(P_m)_z}{W} \pm \frac{(M_m)_y}{I_{my}}.\frac{x}{g}\right] \quad \textbf{(5.2)}$$

$$(P_{mx})_{CDEF} = W_{CDEF}\left[\frac{(P_m)_x}{W} \pm \frac{(M_m)_y}{I_{my}}.\frac{z}{g}\right] \quad \textbf{(5.3)}$$

Burada, $(P_m)_z$ ve $(P_m)_x$ toplam atalet kuvvetlerini, $(M_m)_y$ ataletten ileri gelen toplam momenti, W_{CDEF} CDEF parçasının ağırlığı, x ve z G_1'in yani CDEF parçasının ağırlık merkezinin koordinatlarını, W temelin ağırlığını, I_{my} dönme eksenine göre kütle atalet momentini göstermektedir.

Atalet momenti dağıtım diyagramı dönme merkezinin yerine bağlı olarak üçgenler veya trapezlerden oluşur. X ve Z, G_1 ağırlık merkezinin 0 merkezi orijin alındığında, göreli koordinatlar olarak tanımlanırsa,

$$X = x - x_0 \ , \ \ Z = z - z_0 \quad \textbf{(5.4)}$$

$$(P_{mz})_{CDEF} = \left[W_{CDEF}\frac{(M_m)_y}{I_{my}}.\frac{x}{g}\right] \quad \textbf{(5.5)}$$

$$(P_{mx})_{CDEF} = \left[W_{CDEF}\frac{(M_m)_y}{I_{my}}.\frac{z}{g}\right] \quad \textbf{(5.6)}$$

olarak yazılabilir. Üniform bir kütle dağılımı var ise, temelin her dikdörtgen kısmı için atalet kuvvetleri dağılımı şu şekilde elde edilir. Düşey atalet kuvvetlerinin uç ordinatlarını birleştiren doğru yatay taban çizgisini, dönme merkezinden düşey doğrunun bu yatay çizgiyi kestiği yerde keser. Yatay atalet kuvvetinin uç ordinatlarını birleştiren doğru bu hal için düşey olan taban çizgisini dönme merkezinden geçen yatay çizginin bu çizgiyi kestiği noktada keser. Atalet kuvveti dağılım diyagramının net alanı yukarıdaki denklemlerden hesap edilene eşit olur.

Eğer temelin özel frekansı makinanın çalışma frekansına göre çok büyükse, atalet kuvvetlerinin değerleri çok küçük olacağından hesaplamaya gerek kalmaz. Veya, sistemin özel frekansı makinanınkine göre çok küçükse, temel altına geçen kuvvetler ihmal edilebilir.

5.2 Sönümleyiciler Üzerine Oturtulan Temeller

Bazı durumlarda titreşim genliğini normal olarak kabul edilenin çok altında bir değerle sınırlamak gerekebilir. Eğer temel kütlesinin ve taban alanının uygun seçilmesi ile bu gerçekleşmiyorsa, temel tabanının altında sönümleyiciler kullanmak gerekebilir (Demir ve Öztürk, 1992).

5.2.1 Sönümleyicilerin Kısa Teorisi

Sönümleyiciler münferit ayaklar üzerine veya taban plağı üzerine oturtulurlar. Bu münferit ayaklar veya taban plağı zemin üzerine, sönümleyicilerin üzerine de üst temel bloğu oturur. Makina ise bu temel bloğu üzerine oturur.

Sönümleyiciler kullanılıyorsa, sistem iki kütle ve iki yaydan oluşur. Normalde böyle bir sistemin on iki serbestlik derecesi vardır. Ancak ağırlık merkezlerinin yerlerinin uygun ayarlanması ile sistemin düşey titreşimleri diğer hareketlerden bağımsız olur. Böylece sistemin serbestlik derecesi iki olarak alınabilir. Hareketin genlikleri ise,

$$a_1 = \frac{\varpi_2^2}{m_1 f(w_m^2)} F_0,\ a_2 = \frac{(1+\alpha)\varpi_1^2 + \alpha\varpi_2^2 - w_m^2}{m_2 f(w_m^2)} F_0 \qquad \textbf{(5.7)}$$

olur. Burada,

$$\varpi_2^2 = k_2 / m_2,\ \ \varpi_1^2 = k_1 /(m_1 + m_2) \qquad \textbf{(5.8)}$$

$$f(w_m^2) = w_m^4 - (1+\alpha)(\varpi_1^2 + \varpi_2^2) w_m^2 + (1+\alpha)\varpi_1^2 \varpi_2^2 \qquad \textbf{(5.9)}$$

$$\alpha = m_2 / m_1 \qquad \textbf{(5.10)}$$

$$F_0 = \gamma w_m^2 \qquad \textbf{(5.11)}$$

olmak üzere, a_1 ve a_2 $F_0 \sin w_m t$ kuvveti etkisi altında m_1 ve m_2 kütlelerinin genlikleri, k_1 m_1 kütlesi altında zeminin yay katsayısı, k_2 sönümleyici grubunun yay katsayısı, γ ise makina ile ilgili bir katsayıdır.

Eğer sönümleyici yoksa ve sönüm ihmal edilecek kadar küçük ise, temelin düşey doğrultudaki genlikleri,

$$a_z = \frac{F_0}{(m_1 + m_2)(\varpi_1^2 - w_m^2)} \qquad \textbf{(5.12)}$$

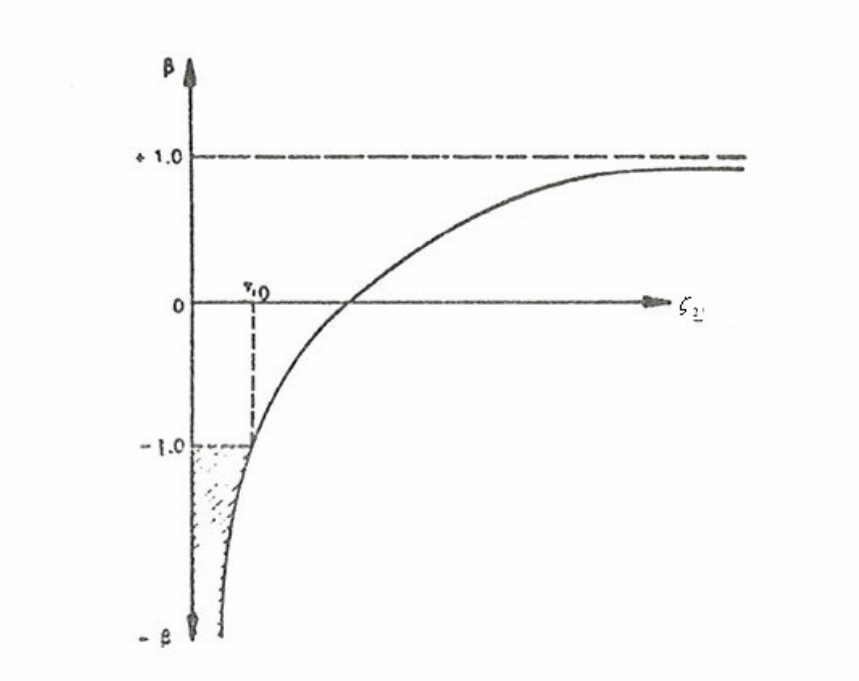
ve sönümleme derecesi de,

$$\beta = a_z / a_1 \qquad \textbf{(5.13)}$$

olur. Aşağıdaki şekilden de anlaşıldığı gibi sönümleyici $0 < \zeta_2 < \zeta_0$ olduğu zaman efektiftir. Burada,

$$\zeta_1 = \frac{\varpi_1}{w_m}, \quad \zeta_2 = \frac{\varpi_2}{w_m} \text{ ve } \zeta_0 = \frac{\sqrt{(1+\alpha)\zeta_1^2 - 1}}{2(1+\alpha)(\zeta_1^2 - 1)} \qquad \textbf{(5.14)}$$

olarak tanımlanır.

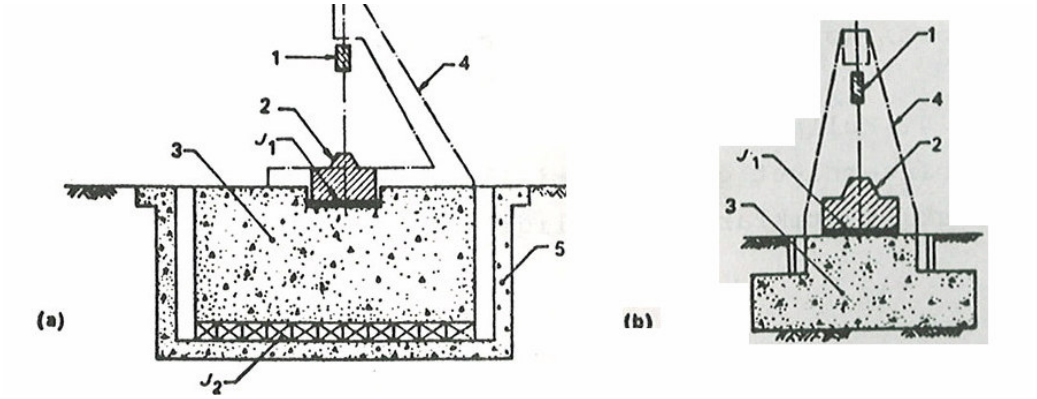


Şekil 5.2: Sönümleyicilerin Etkinlik Bölgesi (Demir ve Öztürk, 1992)

6. İMPAKT TESİRLERİNE MARUZ TEMELLER

Şahmerdanlar impakt tipi makinaların en tipik örneklerinden biridir. İki çeşit şahmerdan vardır. Bunlardan birinde örs sabit, diğerinde o da düşen koç gibi hareket eder ve bu hareketleri birbirine doğrudur. Buna karşı darbeli şahmerdan da denir.

Blok tipi temeller genellikle şahmerdanlar için kullanılır. Şekil 6.1 de blok temel üzerine oturan bir şahmerdan görülmektedir. Burada, örs bir elastik altlık üzerine oturtulmuş olup, koç bunun üzerine düşer. Temel ise ya doğrudan zemine ya da başka bir elastik altlık üzerine oturtulur. Temel altına konan elastik altlıklar, yalıtımı sağlar (Demir ve Öztürk, 1992).



Şekil 6.1: Tipik Şahmerdan Temeli (Demir ve Öztürk, 1992)

a) Elastik mesnetler üzerinde b) Zemin üzerinde

1. Şahmerdan koçu 2. Örs 3. Temel 4. Çerçeve 5. Betonarme tekne

6.1 Zemin Üzerine Oturan Temellerin Hesabı

6.1.1 Temelin Minimum Ağırlığının ve Gerekli Oturma Alanının Tespit Edilmesi

$$W_{\min} = W_t \left[8(1+k)v - \frac{W_a + W_{st}}{W_t} \right] \qquad \textbf{(6.1)}$$

Temelin genliği, düşey titreşimlerde 1 mm den küçük olmalıdır. Bu kaide kullanılarak temelin minimum ağırlığının hesabı yapılır. Sonuç ton olarak elde edilir. Formüldeki diğer parametreler ise,

W_t : Düşen Koçun Ağırlığı

k : Çarpma Katsayısı (İstampa şahmerdanlarda 0.5; dövme şahmerdanlarda 0.25 olarak alınır.)

v : Başlangıç Hızı (m/s olarak alınır.)

W_a : Örsün Ağırlığı

W_{st} : Şahmerdan Standının Ağırlığı

dır.

Temel taban alanının minimum değeri ise,

$$A_{\min} = \frac{20(1+k)}{\sigma_p} v.W_t \qquad \textbf{(6.2)}$$

olarak, zemin gerilmesinin σ_p müsaade edilen değerini geçmemesi şartı kullanılarak, bulunur.

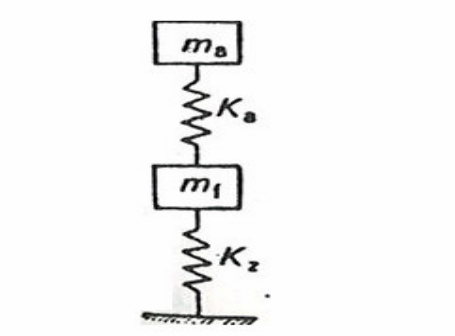
Aşağıdaki tabloda çeşitli şahmerdan kafa ağırlıkları için örs altındaki temel kalınlıklarının minimum değerleri gösterilmiştir.

Tablo 6.1: Minimum Temel Kalınlığı (Demir ve Öztürk, 1992)

Şahmerdan kafasının ağırlığı (ton)	Örs altında temelin minimum kalınlığı (m)
< 1.0	1.0
2.0	1.25
4.0	1.75
6.0	2.25
>6.0	> 2.25

6.1.2 Düşey Titreşimlerin Hesabı

Şahmerdan temelleri esas olarak düşey titreşim için hesap edilirler.



Şekil 6.2: Dinamik Analiz İçin Örs ve Temelin Teşkil Ettiği Model Sistemi

(Demir ve Öztürk, 1992)

Düşey titreşimlerin hesabı için şekilde görülen iki kütleli sistem göz önüne alınır.

Kütleler,

$$m_f = (W_f + W_{st}) / g \quad \textbf{(6.3)}$$

$$m_a = W_a / g \quad \textbf{(6.4)}$$

olarak belirlenir. Burada, m_a örsün kütlesi, m_f ise temelin kütlesidir.

Düşey titreşimler için zeminin yay katsayısı,

$$C_z^{'} = \alpha . C_z \,,\; K_z = C_z^{'} . A_f \quad \textbf{(6.5)}$$

dır. Burada, C_z zeminin gerçek temel alanına tekabül etmek üzere üniform basınç tasman katsayısıdır. α deneysel olarak tayin edilmekle birlikte şahmerdanlar halinde 3 olarak alınabilir.

Sınır frekansları hesap edilecek olursa örse ait sınır frekansı,

$$w_a = \sqrt{K_a / m_a} \quad \textbf{(6.6)}$$

şeklinde hesap edilir. Burada K_a örs altındaki yastığın yay katsayısıdır. Diğer sınır frekans w_z ise örse bitişik yayın rijitliğini sonsuz farz ederek hesaplanır.

$$w_z = \sqrt{K_z /(m_a + m_f + m_{st}} \quad \textbf{(6.7)}$$

Burada, m_{st} temel üzerine oturan şahmerdan standının kütlesidir.

Doğal frekanslar,

$$f(w_m^2) = w_m^4 - (1+\alpha)(\varpi_1^2 + \varpi_2^2)w_m^2 + (1+\alpha)\varpi_1^2\varpi_2^2 = 0 \quad \textbf{(6.8)}$$

denkleminden belirtileceklerdir. Burada,

$$\alpha = \frac{m_a}{m_f + m_{st}} \quad \textbf{(6.9)}$$

denkleminden bulunacak iki pozitif kök alınır.

Koçun impakttan hemen önceki hızı, serbest düşümlü şahmerdan ve çift tesirli şahmerdan için,

$$v = \alpha\sqrt{2gh_0} \quad \textbf{(6.10)}$$

olarak serbest düşümlü şahmerdan için belirlenir. Burada, h_0 düşme yüksekliği, α ise egzoz buharının direnimidir. Çift tesirli şahmerdan halinde ise,

$$v = \alpha\frac{2g(W_t + PA)l}{W_t} \quad \textbf{(6.11)}$$

olarak bulunur. Burada, P ortalama piston basıncı, A piston alanı, l ise strok uzunluğudur. α katsayısı 0.65 olarak alınabilir.

İmpakttan hemen sonraki hız,

$$V = \frac{1+k}{1+W/W_t}v \quad \textbf{(6.12)}$$

şeklinde hesaplanır. W impakta maruz sistemin kütlesidir. $W = W_a$

Eksantrik çarpma halinde çarpmadan hemen sonraki hız ve açısal hız,

$$V = \frac{1+k}{1+W/W_t + e^2/i^2}v \quad \textbf{(6.13)}$$

$$\theta^{\cdot} = \frac{(1+k)e}{i^2(1+W/W_t) + e^2}v \quad \textbf{(6.14)}$$

olarak bulunur. Burada, e impaktın eksantrisitesi, i hareket eden sistemin dönme eksenine göre atalet yarıçapıdır.

Temelin titreşim genliği,

$$a_f = \frac{-(w_a^2 - w_2^2)(w_a^2 - w_1^2)V}{w_a^2(w_1^2 - w_2^2)w_2} \quad \textbf{(6.15)}$$

şeklindedir. Örsün genliği ise,

$$a_a = \frac{-(w_a^2 - w_1^2)V}{(w_1^2 - w_2^2)w_2} \quad \textbf{(6.16)}$$

olarak belirlenir.

Dinamik reaksiyonlar hesap edilecek olursa,

$$(F_d)_f = \lambda K_z a_f \quad \textbf{(6.17)}$$

denklemi ile temel altındaki $(F_d)_f$ reaksiyonu bulunur. Burada, λ yorulma çarpanı olup 3 olarak alınabilir.

$$(F_d)_a = \lambda K_a (a_f - a_a) \quad \textbf{(6.18)}$$

Denklemi ile de, örs altında oluşan reaksiyon bulunur.

Genliklerin yukarıda verilen müsaade edilen değerleri geçmemesi için bir kontrol yapılabilir.

Üniform bir gerilme yayılışı kabul edilerek zemin gerilmesi,

$$\sigma_s = \frac{W + (F_d)_s}{A_f} \quad \textbf{(6.19)}$$

denklemi ile hesaplanır. Burada W makina ve temelin toplam ağırlığıdır. Örs altındaki elastik yastıktaki gerilme ise,

$$\sigma_a = \frac{W_a + (F_d)_a}{A_a} \quad \textbf{(6.20)}$$

ile bulunur. σ_s ve σ_a nın zemin ve altlık malzemesinin müsaade edilen gerilmelerini geçmemesi gerekir.

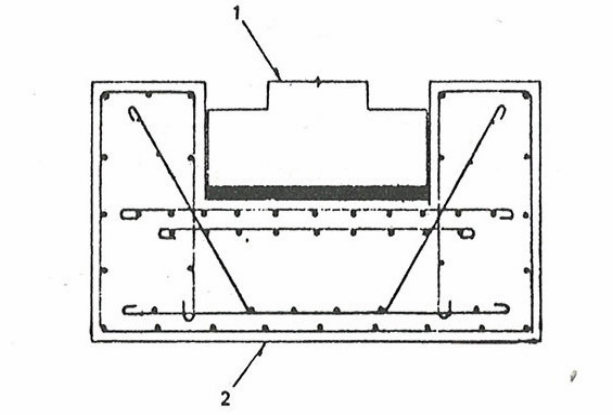
6.1.3 Kesit Hesapları

Sisteme örs ve zeminden gelecek kuvvetler ile toplam atalet kuvveti denge içindedir. Bu toplam atalet kuvveti sistemi oluşturan kütlelere aşağıdaki formülle dağıtılır.

$$(F_m)_i = \frac{W_i}{\sum W_i} F_m \qquad \textbf{(6.21)}$$

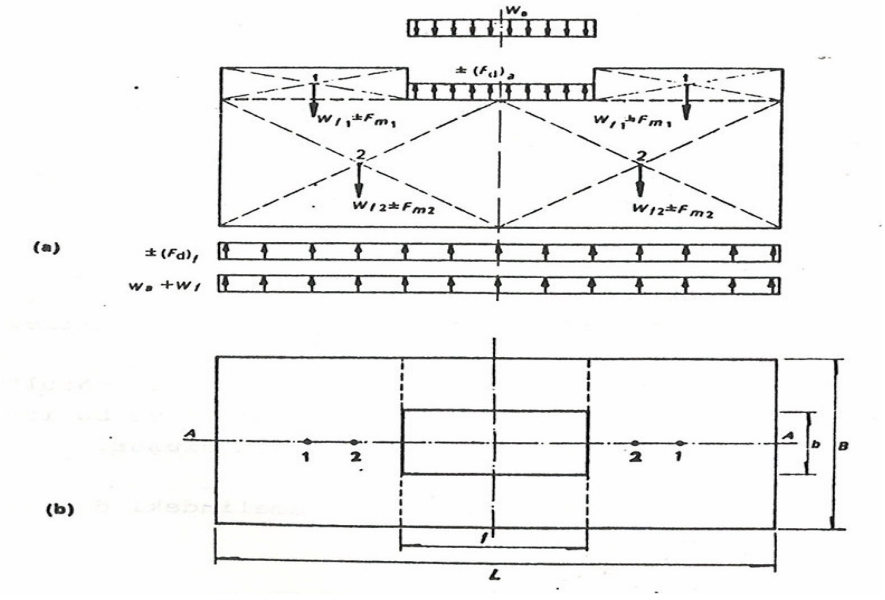
Burada F_m toplam atalet kuvvetini göstermektedir. Bundan sonra kesit tesirleri elde edilir. Daha sonra ise, dinamik yüklemeden elde edilen sonuçlar ile statik yüklemeden elde edilen sonuçlar süperpoze edilerek esas alınacak tesirler bulunur.

Aşağıdaki şekilde bir şahmerdan temelinde donatı düzenlemesi görülmektedir.



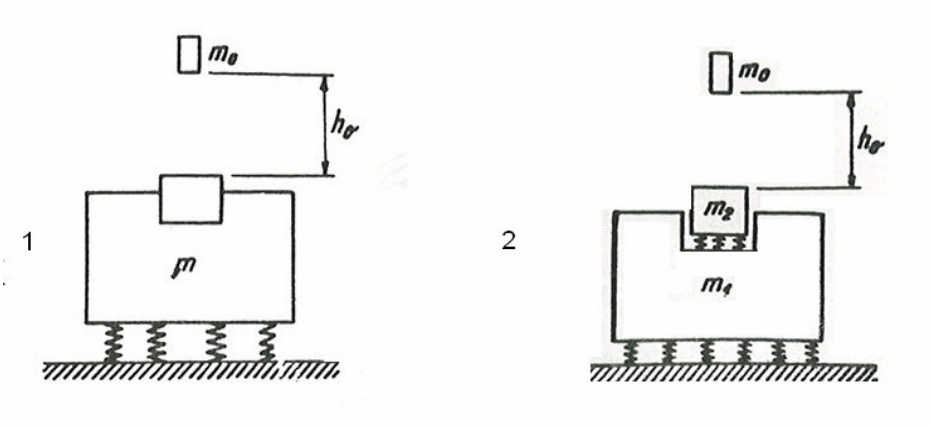
Şekil 6.3: Bir Şahmerdan Temelinde Donatım Şekli (Demir ve Öztürk, 1992)

1) Örs Bloğu 2) Betonarme Temel



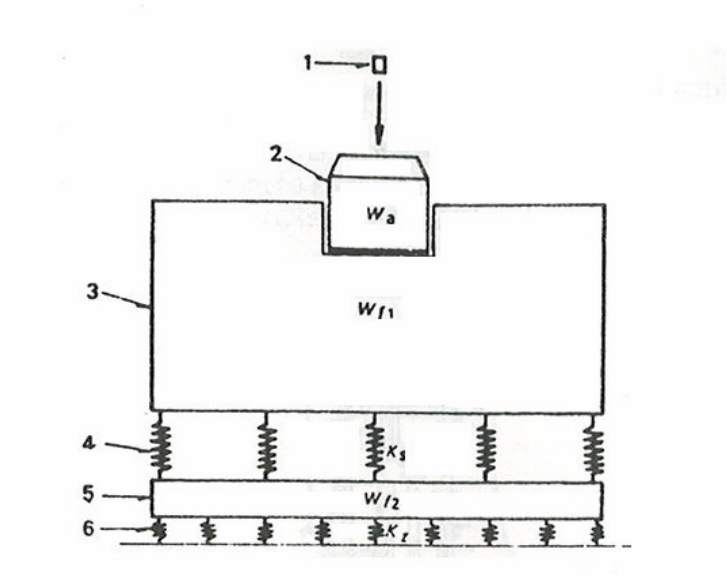
Şekil 6.4: Bir Şahmerdan Temeline Etkiyen Kuvvetler (Demir ve Öztürk, 1992)

a) A-A Kesiti b) Plan



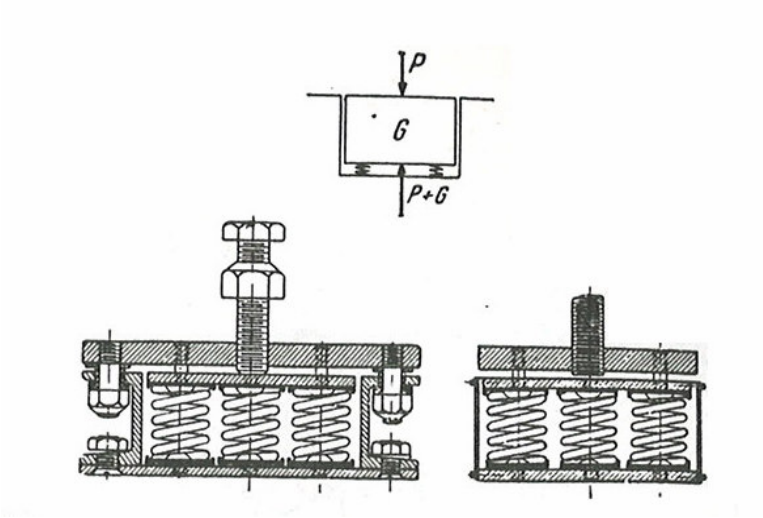
Şekil 6.5: Örsün Temel Tabanına (Demir ve Öztürk, 1992)

1) Rijit Olarak 2) Arada Elastik Tabaka Olmak Üzere Oturması.

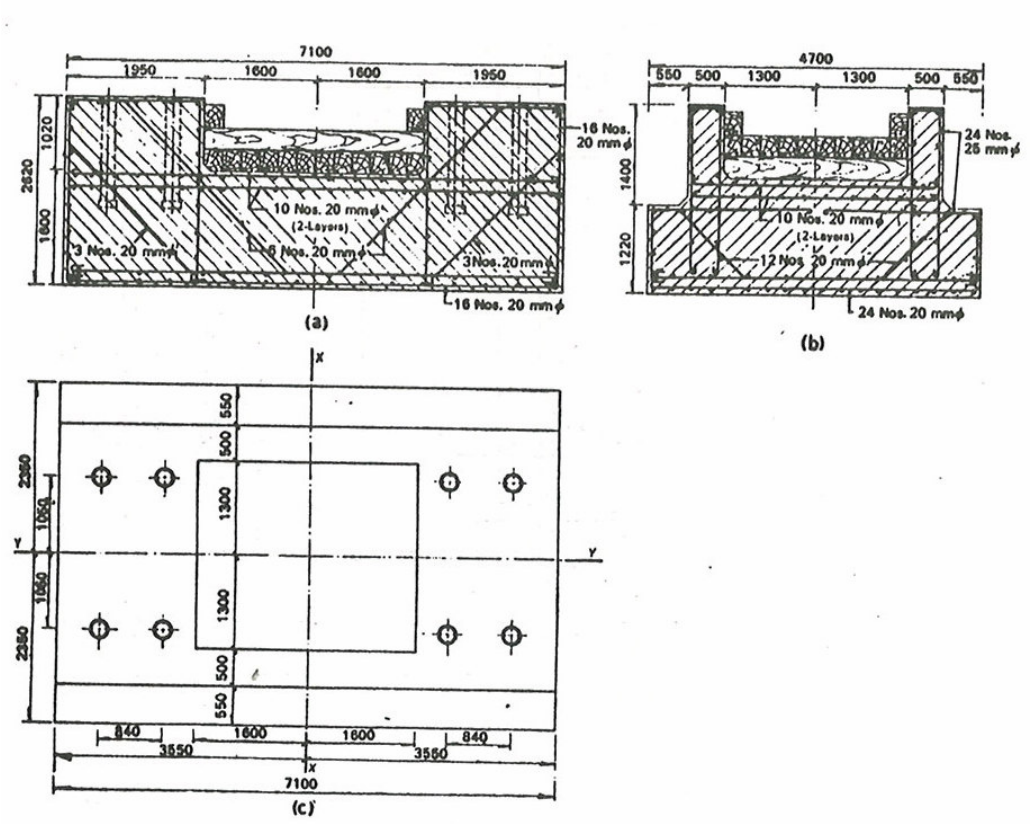


Şekil 6.6: Yaylar Üzerine Oturan Şahmerdan Temeli (Demir ve Öztürk, 1992)

1) Koç 2) Örs 3) Üst Temel Bloğu 4) Yay Tabakası 5) Alt Temel Bloğu 6) Zeminin Teşkil Ettiği Yay Tabakası

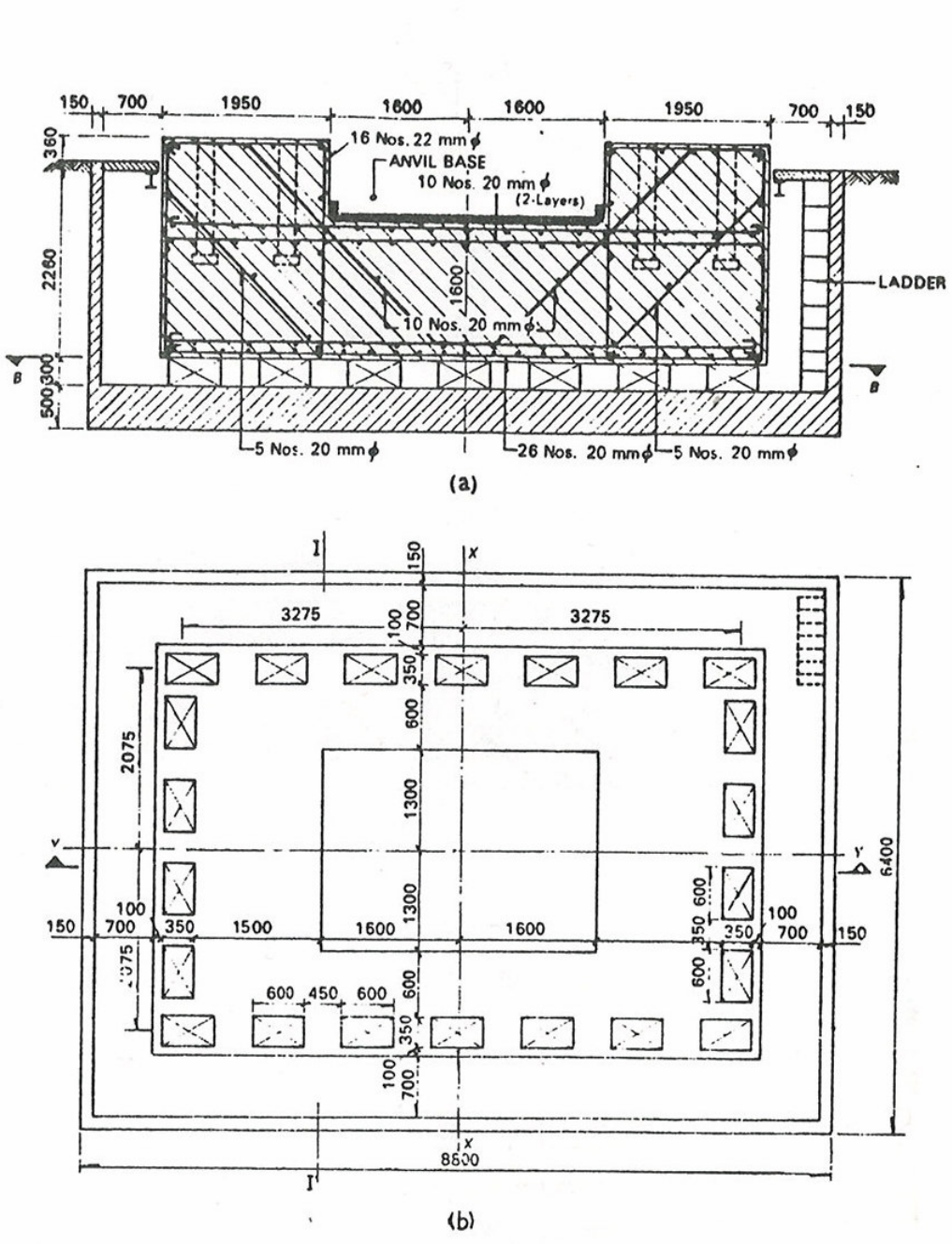


Şekil 6.7: Kutuları İçinde Yaylardan Oluşan Sönümleyici (Demir ve Öztürk, 1992)



Şekil 6.8: 3, 4 Tonluk Dövme Şahmerdanın Temeli (Demir ve Öztürk, 1992)

a) y-y Kesiti b) x-x Kesiti c) Plan



Şekil 6.9: Yaylar Üzerine Oturan 3, 4 Tonluk Şahmerdanın Temeli

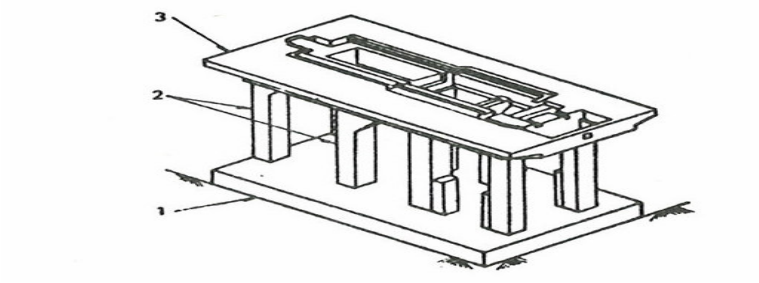
a) y-y Kesiti b) B-B Seviyesinde Plan

(Demir ve Öztürk, 1992)

7. YÜKSEK HIZLI MAKİNALAR İÇİN ÇERÇEVE TEMELLER

Yüksek hızlı makinalar genellikle çerçeve temeller üzerine oturtulur. Bunlara türbo jeneratörler örnek olarak gösterilebilir. Bu tür temellerin hacimden ve malzemeden tasarruf, bakım, onarım gibi nedenlerle bütün parçalara erişebilme imkanı, oturmalar ve sıcaklık değişimleri gibi sebeplerle çatlamaya daha az müsait olma gibi avantajları vardır (Demir ve Öztürk, 1992).

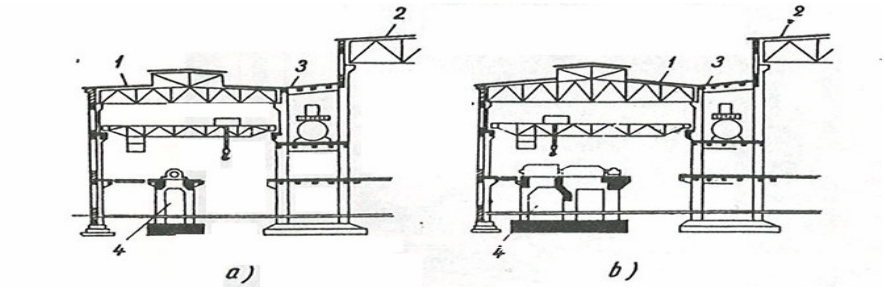
Tipik bir çerçeve temel Şekil 7.1 de görüldüğü gibi bir taban plağı, bu plağın üzerine oturtulan kolonlar ve bu kolonları üst uçlarında bağlayan boyuna ve enine kirişlerden oluşur. Bu boyuna ve enine kirişler üst plak denilen bir tablayı oluştururlar. Bu tablanın üzerine makina yerleştirilir.



Şekil 7.1: Tipik Çerçeve Temel (Demir ve Öztürk, 1992)

a) Alt Döşeme b) Kolon c) Üst Döşeme

Türbo jeneratörlerden oluşan bir grubun bir makina holünde boyuna ve enine yerleştirilmesi durumu aşağıdaki şekillerde gösterilmiştir.

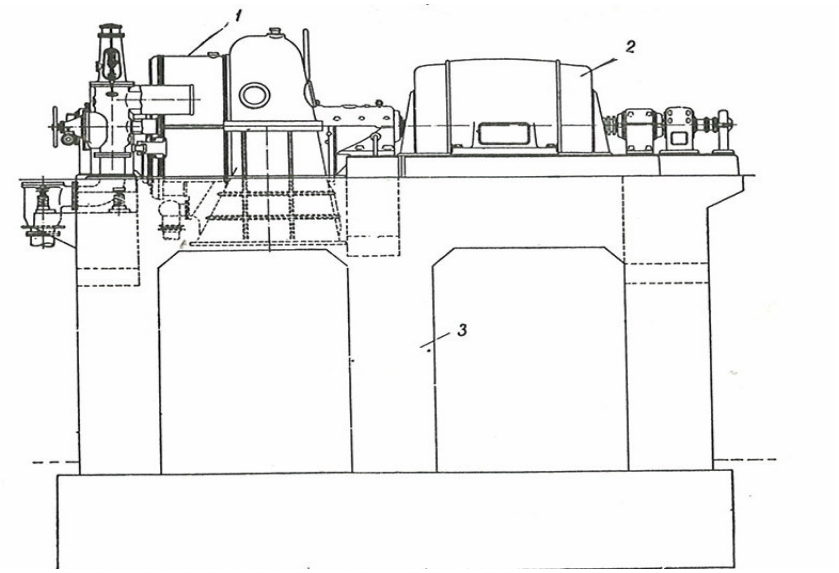


Şekil 7.2: Türbo Jeneratörlerin Makina Holünde Yerleştirilmesi

a) Boyuna Düzenleme b) Enine Düzen

1. Makina Holü 2. Kazan Dairesi 3. Besleme ve Transmisyon Odası

4. Türbo Jeneratör. (Demir ve Öztürk, 1992)



Şekil 7.3: Türbo Jeneratör İçin Çerçeve Temel (Demir ve Öztürk, 1992)

a) Türbin b) Jeneratör c) Çerçeve Temel

7.1 Dinamik Analiz

Çerçeve temellerin dinamik hesabı için üç metot kullanılmaktadır.

1. Rausch tarafından geliştirilen "Rezonans Metodu".
2. Barkan' ın "Genlik Metodu".
3. Major' un teklif ettiği "Kombine Metot".

Rezonans metodunda en önemli şart makina ile temelin rezonans halinde olmamasını sağlamaktır. Bunun için temelin doğal frekansı makinanın doğal frekansından %20 fark etmelidir. Ancak bu yöntemin bazı dezavantajları vardır. Rezonans olmayacağının görülmesi yapılan projenin uygun olduğunu her zaman göstermez. Temelin doğal frekansı makinanınkinden çok uzak olsa bile makinanın ve yavaşlaması sırasında aşırı titreşimler olur. Ayrıca, bazı durumlarda rezonans olsa dahi ortaya çıkan genliklerin küçük olması nedeni ile temele zarar gelmez. Bu yöntemde hesap için esas alınan tek yay-kütle sisteminin basitliği de sistemin dezavantajlarındandır. Bu yöntemde titreşim genliklerinin hesabı yapılmamaktadır. Bu nedenle Barkan' ın "Genlik Metodu" geliştirilmiştir.

Genlik metodunda asıl şart temelin zorlanmış titreşimlerde titreşim genliğinin belli bir değeri geçmemesidir. İki serbestlik dereceli sistem metotta esas alınır. Ancak metotta düşük akortlu temeller halinde, yani temelin doğal frekansının makinanın çalışma frekansından düşük olması durumunda, hızlanma ve yavaşlama safhalarında genliklerdeki artış ihmal edilmektedir.

Bu iki metot birbirini tamamlayan karakterdedir. Bu sebepten dolayı, "Kombine Metot" ortaya çıkmıştır. Bu metotta, düşük akortlu temeller halinde hızlanma ve yavaşlama safhalarında ortaya çıkan maksimum dinamik tesirler de belirlenir ve hesaba katılır.

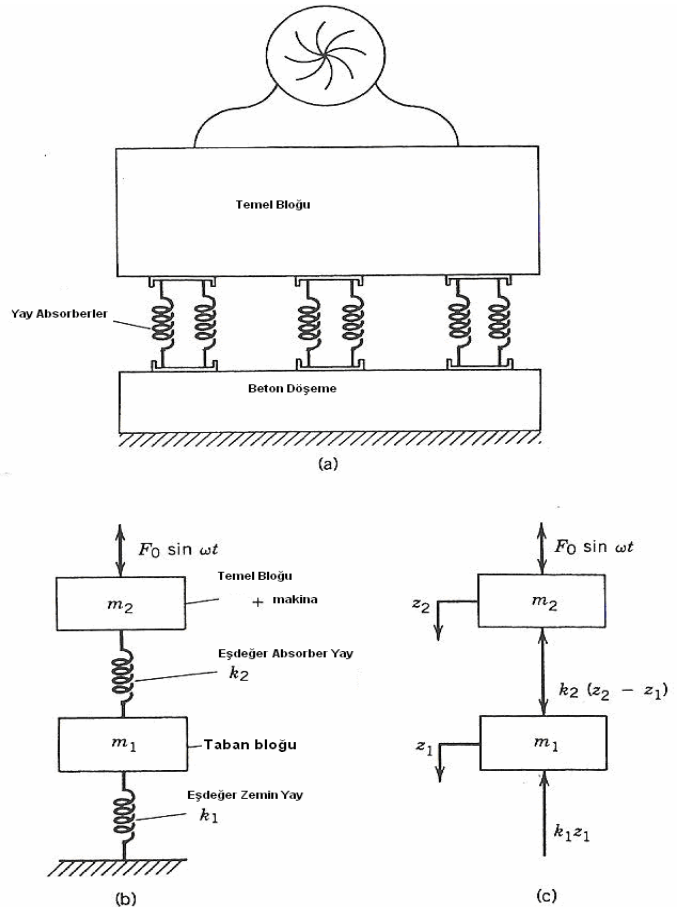
Metotların hepsinde de, çerçeveler teker teker ele alınabilir. Yapılan gözlemler sonucu birinci modda rezonans bölgesinin geniş olduğu, yüksek modlara gidildikçe daraldığı görülmüştür. Yani, yüksek frekanslarda rezonans tehlikesi daha azdır.

8. TİTREŞİMLERİN SÖNÜMLENMESİ VE YALITIMI

Bazı durumlarda, hareketin izin verilen genliklerinin makina çalışması esnasında kabul edilebilir genliklerden küçük olması durumu ile karşılaşılır. Böyle bir temeli genlikleri sınırlandırarak tasarlamak uygun kütle ve temel seçimi ile bile zor olabilir. Böyle durumlarda, temeli sönümleyiciler üzerine oturtmak bir çözüm sağlar. Sönümleyici olarak kauçuk, keçe, mantar, neopren yastıklar ya da çelik yaylar kullanılabilir. Pnömatik sönümleyiciler de bu amaçla kullanılabilir. Yay sönümleyiciler üzerine oturan temel Şekil 8.1 de görülmektedir.

Bazen makinanın kendi çalışması için kabul edilebilir büyüklükte olan makinanın titreşim genliği diğer makinaların çalışma performansını olumsuz etkileyebilir ya da komşu yapı ve ekipmana zararlı olabilir. Titreşen temel zeminde bir dalga kaynağı haline gelir. Dalgalarla iletilen enerji yapı ve ekipmanın titreşimine neden olur. Bu dalgaların zararlı etkileri makinanın işletme hızına, temel hareketinin genliğine ve çevrenin doğasına bağlıdır. Makina titreşimlerinin zararlı etkilerinden sönümleyici ya da hendek veya kazık bariyerler kullanarak temelin titreşim genliğinin sınırlandırılması ile korunabilinir. Hendek bariyerler dalgaların perdelenmesi için titreşim kaynağı yakınına (aktif yalıtım) ya da korunacak makina ya da yapının çevresine (pasif yalıtım) yerleştirilebilir. Sismograflar gibi hassas ekipmanlar hendek bariyerler ile trafik ya da makina işletmesinden doğan titreşimlere karşı izole edilirler. Bazı durumlarda, efektif yalıtım sağlamak için hendek derinlikleri çok büyük olabilir ve yapım ve onarım problemleri ile sonuçlanabilir. Böyle durumlarda kazık bariyerler titreşim yalıtımı için kullanılırlar.

Sönümleyiciler kullanarak temelin titreşim genliğinin kontrol altına alınması yöntemiyle titreşimlerin yayılmasını önleme işlemi sanayi dünyasında yaygınca kullanılmıştır. Makinanın çalışması için kabul edilebilir sınırlar içinde olan genlikler, daha sonraki zamanlarda dengelenmemiş kuvvetlerdeki artış, uygun olmayan tasarın ya da yapım, yeraltı su seviyesinin değişmesi gibi zemin şartlarındaki değişmeler gibi nedenlerden dolayı artabilir. Bu gibi durumlar makinanın güvenli bir biçimde çalıştırılması için önceden düşünülmelidir.



Şekil 8.1: a) Sönümleyiciler Üzerinde Bir Temelin Şematik Diyagramı b) Temel Sönümleyici Sisteminin Eşdeğer İki Yay Kütle Sistemi c) Serbest Cisim Diyagramı (Prakash ve diğ., 1988)

8.1 Titreşimlerin Sönümlenmesi

Sönümleyiciler üzerinde bir temel genellikle iki kısımdan oluşur. Bunlar sönümleyicilerin yerleştirildiği alt döşeme ya da taban plağı ve sönümleyiciler üzerindeki üst temel bloğudur. Makina üst temel bloğu üzerindedir. Hafif makinalar için, makinanın taban plağı doğrudan sönümleyicilere bağlıdır ve üst temel bloğuna ihtiyaç duyulmaz. Sönümleyiciler üzerindeki bir makina temelinin şematik diyagramı Şekil 8.1 (a) da görülmektedir ve bu sistemin analizi için çok kez kullanılan bir model Şekil 8.1 (b) de gösterilmiştir. Rijit m_1 ve m_2 kütlelerinden her biri altı serbestlik derecesine sahiptir. Sistemin toplam serbestlik derecesi ise on ikidir. Titreşim sönümleyicileri genel olarak dik titreşimlere ve dik dengelenmemiş kuvvetlere maruz makinalar için kullanılırlar. Dik titreşimler ise temelin diğer

modlarındaki titreşimlerinden bağımsızdır. Sonuç olarak sönümleyiciler üzerinde makina temelinin çözümü iki serbestlik dereceli sistemin analizi ile yapılır. Sistemdeki kütlelerin aynı dik doğru üzerinde ağırlık merkezlerinde toplandığı varsayımı yapılarak hareket denklemleri yazılır.

$$m_1 z_1^{\cdot\cdot} + k_1 z_1 + k_2 (z_1 - z_2) = 0 \qquad \textbf{(8.1)}$$

$$m_2 z_2^{\cdot\cdot} + k_2 (z_2 - z_1) = F_0 \sin wt \qquad \textbf{(8.2)}$$

Burada,

$F_0 \sin wt$ = zorlayıcı kuvvet

w = makinanın çalışma frekansı rad/s

$z_1,\ z_2$ = m_1 ve m_2 kütlelerinin ağırlık merkezlerinin düşey yer değiştirmeleri

k_1 = zeminin eşdeğer rijitliği

k_2 = bütün yayların toplam eşdeğer rijitliğidir.

$$k_1 = k_z = \frac{4Gr_0}{1-\upsilon} \qquad \textbf{(8.3)}$$

Sistemin frekans denklemi,

$$w_n^4 - (w_1^2 + w_2^2)(1 + \frac{m_2}{m_1}) w_n^2 + (1 + \frac{m_2}{m_1}) w_1^2 w_2^2 = 0 \qquad \textbf{(8.4)}$$

dir. Burada,

w_1 ve w_2 sistemin doğal frekanslarıdır. w_1 zemin üzerinde bütün sistemin sönümleyiciler kullanılmadığı zaman doğal frekansıdır. w_2 ise m_2 kütlesinin doğal frekansıdır ve yaylar altındaki sistemin yüksek rijitliğe sahip olduğu varsayımı ile hesaplanır.

$$w_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1 + m_2}}\ ,\ w_2 = \sqrt{\frac{k_2}{m_2}} \qquad \textbf{(8.5)}$$

Maksimum genlikler ise aşağıdaki gibidir.

$$Z_1 = \frac{w_2^2}{m_1 \Delta(w^2)} F_0 \qquad \textbf{(8.6)}$$

$$Z_2 = \frac{(1 + m_2 / m_1) w_1^2 + (m_2 / m_1) w_2^2 - w^2}{m_2 \Delta(w^2)} F_0 \text{ dir.} \qquad \textbf{(8.7)}$$

$$\Delta(w^2) = \left[w^4 - (1 + m_2 / m_1)(w_1^2 + w_2^2) w^2 + (1 + m_2 / m_1)(w_1^2 + w_2^2) \right] \qquad \textbf{(8.8)}$$

w burada işletme frekansıdır. Makinadan dolayı, zorlayıcı dengelenmemiş kuvvet işletme frekansının karesi ile orantılıdır.

$$F_0 = S w^2 \qquad \textbf{(8.9)}$$

S burada sabittir ve dengelenmemiş kütle veya eksantrisite gibi makina karakteristiklerine bağlıdır. Gerekli düzenlemeler yapılarak maksimum genlikler için aşağıdaki ifadeler elde edilir.

$$Z_1 = \frac{S}{m_1} \frac{r_2^2}{\left[1 - (1 + m_2 / m_1)(r_1^2 + r_2^2 + r_1^2 r_2^2) \right]} \qquad \textbf{(8.10)}$$

$$r_1 = \frac{w_1}{w}, \; r_2 = \frac{w_2}{w} \qquad \textbf{(8.11)}$$

Eğer sönümleyici kullanılmazsa, zemin üzerindeki temel sisteminin titreşim genliği aşağıdaki gibi olur.

$$Z = \frac{F_0}{\left[(m_2 + m_1)(w_1^2 - w^2) \right]} \qquad \textbf{(8.12)}$$

Yukarıdaki denklemlerden de anlaşıldığı gibi, eğer sönümleyici kullanılıyorsa sadece r_2 nin küçük olması halinde genlik küçüktür. r_2 ihmal edildiği zaman, Z_1 titreşim genliği hemen hemen sıfır olur ve sönümleyici etkinliği yüksektir. r_2=0 olduğu zaman sönümleyicinin efektifliği maksimum olur ve r_2 oranı yükseldikçe azalır. r_2 nin çok yüksek değerlerinde Z_1 değeri Z ye yaklaşır.

Sönümleyicilerin titreşim genliği üzerinde etkin olabilmesi için, sönümleyiciler üzerindeki kütlenin doğal frekansı makinanın işletme frekansına göre olabildiğince küçük olmalıdır. Sönümleyiciler üzerindeki temelin istenen doğal frekansı uygun

rijitlikte sönümleyici kullanarak ve sönümleyiciler üzerinde uygun kütlenin seçilmesi ile elde edilebilir. Yüksek hızlarda çalışan makinalar için, w_2 ve w arasındaki istenen ilişki sönümleyiciler üzerindeki temelin ağırlığında önemli bir artış yapmaksızın sağlanabilir. Düşük hızda çalışan makinalarda, sönümleyicilerin rijitliğini azaltmak ile bu ilişkiyi sağlamak çoğu zaman zordur. Çünkü bu azaltma belli bir değerden sonra gerekli mukavemetin sağlanabilmesi açısından uygun olmayabilir. Böyle bir durumda, yaylar üzerinde bir masif temel gereklidir. Uygun sönümleyici tipinin seçimi böyle durumlarda çok önemlidir. Sönümleyici sistemi r_2 değerine dayalı olarak tasarlanabilir. İstenen sönümleme derecesi ise aşağıdaki gibidir.

$$\frac{Z}{Z_1} = \frac{\left[1-(1+m_2/m_1)(r_1^2+r_2^2+r_1^2 r_2^2)\right]}{r_2^2\left[(1+m_2/m_1)(r_1^2-1)\right]} \qquad \textbf{(8.13)}$$

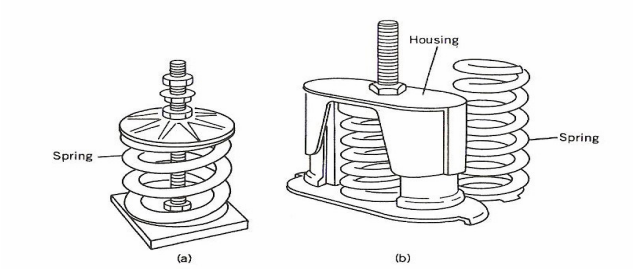
8.2 Sönümleyici Çeşitleri

Elastik deformasyon yapabilme yeteneğine sahip malzemeler sönümleyici olarak kullanılabilir. Çok kullanılan sönümleyiciler aşağıda sıralanmıştır.

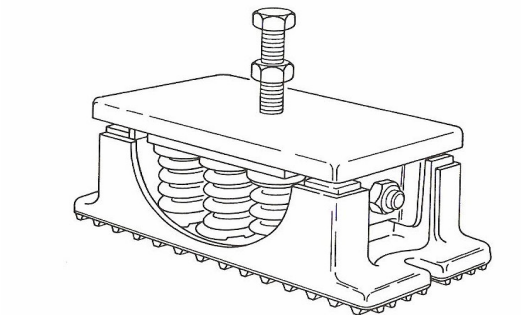
1. Çelik ya da metal yaylar
2. Mantar yastıklar
3. Kauçuk yastıklar
4. Ahşap yastıklar
5. Neopren yastıklar
6. Pnömatik sönümleyiciler.

8.2.1 Çelik Ya da Metal Yastıklar

Çelikten yapılmış helis şeklinde yaylar makina temellerinde titreşim genliğini düşürmek için kullanılan en efektif elastik desteklerden biridir. Tek bir yaydan oluşan sönümleyici Şekil 8.2 de görülmektedir. Bu tip bir sönümleyici sadece düşük kapasitede makinalar için uygundur. Orta ve yüksek hızda makinalar için, birkaç yaya sahip sönümleyici birimleri kullanılır (Şekil 8.3).

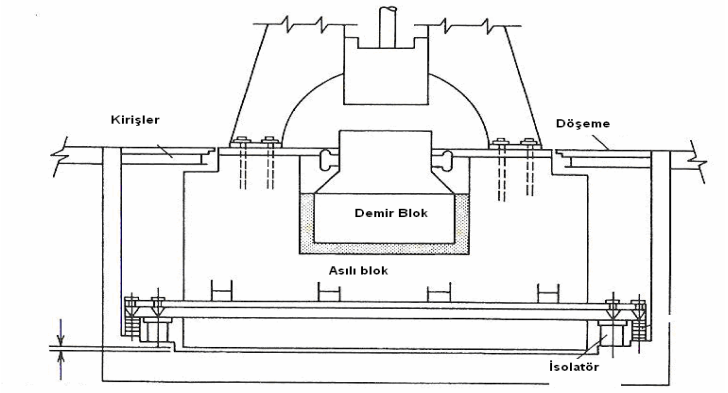


Şekil 8.2: Bir Yaya Sahip Yay Sönümleyici a) Housing İle b) Housing Olmadan (Prakash ve diğ., 1988)



Şekil 8.3: Multi Yay Sönümleyici (Prakash ve diğ., 1988)

Montaj şekline göre yay sönümleyiciler destekli tip ve asılmış tip olmak üzere iki çeşittir. Destekli tip Şekil 8.1a da ve asılmış tip Şekil 8.4 de görülmektedir. Destekli tipte, yaylar direkt olarak makina ya da temelin altına, asılmış tipte tabana ya da yakınına yerleştirilirler.



Şekil 8.4: Asılmış Tip Sönümleyici İle Makina Temeli (Prakash ve diğ., 1988)

Hangi tipin seçileceği makina dengesine ve işletme hızına bağlıdır. Dengeli yüksek hızlı makinalar için yaylar üzerinde ağır kütle gerekli olmadığından destekli tip

kullanılır. Düşük hızda makinalar için, ağır kütle gerekli olup asılmış tip sönümleyiciler kullanılır.

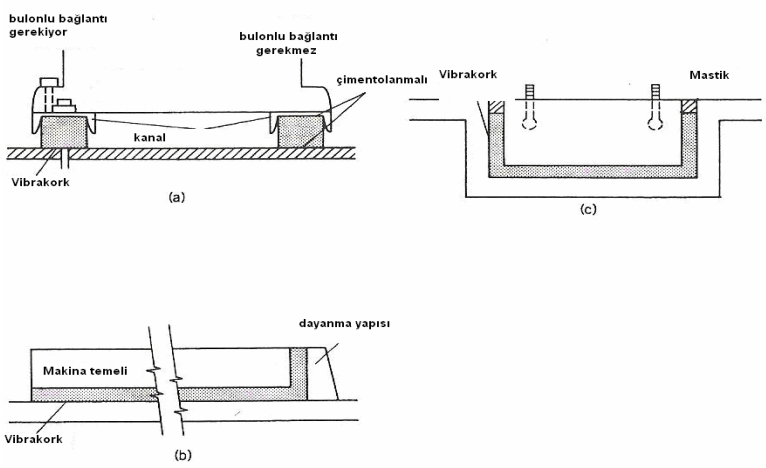
Yay sönümleyiciler çevre şartlarından etkilenir ve korozyona karşı korunmalıdır.

8.2.2 Mantar

Doğal mantar en iyi titreşim ve ses sönümleyici olarak kullanılan malzemelerden biridir. Düşük ağırlığa, yüksek sıkışabilirliğe, gaz ve sıvı geçirimsizliğine sahiptir. Yüksek basınca dayanımı iyidir. Mantar yastıklar gerekli durumlarda makina ya da temelin altına yerleştirilir. Mantar yastığın yatay genişleme olmadan düşey basınca karşı rijitliği aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$k = \frac{EA}{t} \tag{8.14}$$

Yatay deformasyonu önlemek için, mantar yastıkları tabakalandırılmalı ya da Şekil 8.5 deki sistem uygulanmalıdır. Mantar yastıklar yağ ve sudan olumsuz yönde etkilenirler.



Şekil 8.5: Tipik Mantar Sönümleyici Kullanımı a) Hafif Makinalar İçin Yükün Mantara Aktarılması İçin Kanallar Kullanımı b) Ağır Makina ve Temeller İçin Mantarın Sürekli Tabakası c) Tabanın Altındaki Beton Temel Üzerinde Yalıtım İçin Mantar. (Prakash ve diğ., 1988)

8.2.3 Kauçuk

Kauçuk esnek özelliklerinden dolayı mükemmel bir sönümleme malzemesidir. Kauçuktan yapılmış yay ya da yastıklar bu amaçla kullanılırlar. Direkt olarak metale bağlanabilirler. Kauçuk yaylar, kauçuğun metallere bağlanmasıyla basınç, kayma ve torsiyonu karşılayabilirler. Tipik kauçuk yay Şekil 8.6a da görülmektedir. Oyuk silindirik şekilli kauçuk yay ise Şekil 8.6b de görülmektedir. Ağır yükler altında burkulmayı önlemek için, oyuk silindirik formda kauçuk yaylar metal plakalar ile çevrelenir (Şekil 8.6c). Kauçuk yastıkların rijitlik özellikleri yükün etkidiği alanın toplam yastık alanına oranından etkilenir. Esneklik özelliği ise çevre şartlarından etkilenir. Mesela, işletme sıcaklığı ve sanayi yağı örnekler arasındadır. Beklenmeyen yükler de ömrünü azaltır.

Kauçuğun basınç durumundaki karakteristik özellikleri yük taşıyan alanın yatay genişleme alanına oranına bağlıdır. Bu orana alan oranı denir. A_r ile gösterilir. l, b, h boyutlarında dikdörtgen bir blok için alan oranı aşağıdaki gibidir.

$$A_r = \frac{lb}{2h(l+b)} \tag{8.15}$$

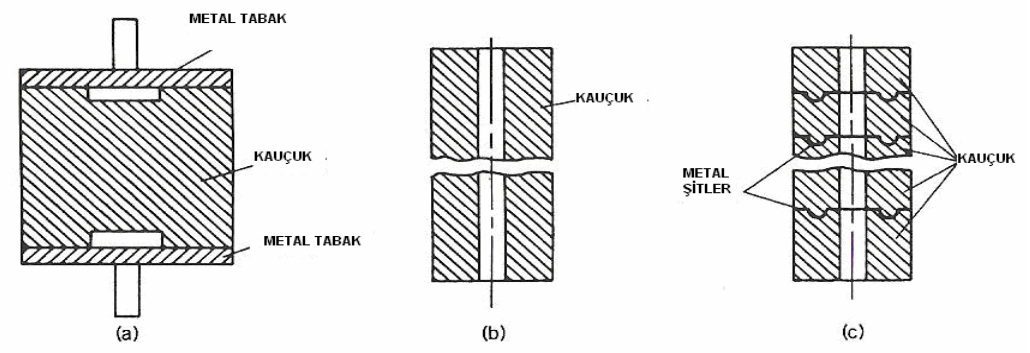
A kesit alanına, G kayma modülüne ve h kalınlığına sahip bir kauçuk bloğunun K_s kayma rijitliği aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$K_s = \frac{GA}{h} \tag{8.16}$$

h yüksekliğinde bir kauçuk bloğun maksimum deformasyonu (δ) basınç hainde 0.2, kayma halinde ise 0.4 alınabilir. İzin verilen gerilmeler ise 40º kalitede kauçuk için, basınç halinde 8 kg / cm² ve kayma halinde de 3 kg / cm² dir. Basınç durumunda kauçuk bloğun rijitliği K_c aşağıdaki formülle tanımlanır.

$$\frac{1}{K_c} = \frac{h}{A}\left[\frac{1}{E(1+2\alpha A_r^2)} + \frac{1}{B}\right] \tag{8.17}$$

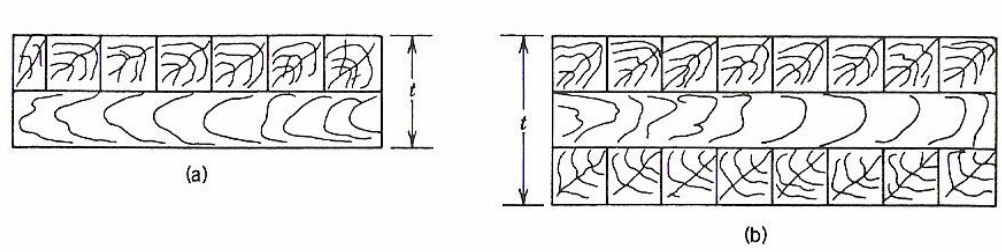
Burada, E elastisite modülü, B bulk modülü, α ise kauçuk kalitesi ile ilgili bir katsayıdır.



Şekil 8.6: Kauçuk Yastıklar a) İki Metal Plaka Arasında b) Oyuk Silindir Formu c) Çelik Şitler İle Çevrelenmiş (Prakash ve diğ., 1988)

8.2.4 Ahşap

Ahşap yastıklar genellikle çekiç tip temellerde örsün altında kullanılırlar. Tek ya da multi tabakalı sert ahşaplar bu amaçla kullanılırlar. Tabakalar lif doğrultularına göre basıncı en iyi karşılayacak şekilde yerleştirilir.



Şekil 8.7: Multi Tabakalı Ahşap Yastıklar a) İki Tabakalı b) Üç Tabakalı (Prakash ve diğ., 1988)

8.2.5 Neopren

Neopren ve neopren mantar yastıklar endüstriyel çevreye dirençlidir.

8.2.6 Pnömatik Sönümleyici

Pnömatik sönümleyicilerde esneklik malzemesi olarak gaz ya da hava kullanılır. Pnömatik bir yayın rijitliği adyabatik basıncı yöneten gaz kuralları ile elde edilir. V_1 hacminde ve p_1 basıncında hava bulunan bir piston sistemi düşünülsün (Şekil 8.8). P kuvveti pistona etkisin ve δ yer değiştirmesi elde edilsin. Piston alanı A ve elde P/A ile elde edilen yeni basınç p_2 ise Boyle kanununa göre,

$$P_1 V_1^n = P_2 V_2^n \text{ dir.} \quad \textbf{(8.18)}$$

n burada bir indekstir. Ayrıca,

$$V_2 = V_1 - \delta A \quad \textbf{(8.19)}$$

$$\frac{P}{A}(V_1 - \delta A)^n = p_1 V_1^n \text{ dir.} \quad \textbf{(8.20)}$$

Ya da,

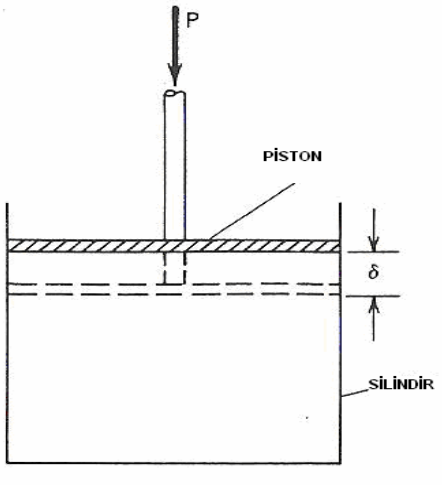
$$P = p_1 A \left(\frac{1}{1 - \frac{A}{V_1}\delta} \right)^n \text{ olur.} \quad \textbf{(8.21)}$$

Bu denklemin δ ya göre adi türevi alınırsa,

$$k = \frac{dP}{d\delta} = \frac{n p_1 A^2}{V_1} \left(\frac{1}{1 - \frac{A}{V_1}\delta} \right)^{n+1} \text{ elde edilir.} \quad \textbf{(8.22)}$$

Eğer hacimdeki değişiklik küçükse, yukarıdaki denklem aşağıdaki gibi olur.

$$k = \frac{n p_1 A^2}{V_1} \quad \textbf{(8.23)}$$



Şekil 8.8: Pnömatik Sönümleyicinin Çalışma Prensibi (Prakash ve diğ., 1988)

8.3 Sönümleyiciler Üzerindeki Temel İçin Tasarım Prosedürü

Dik doğrultuda dengelenmemiş kuvvet bileşeni olan makinaları destekleyen ve sönümleyiciler üzerine oturan bir temel için tasarım prosedürü aşağıda verilmiştir.

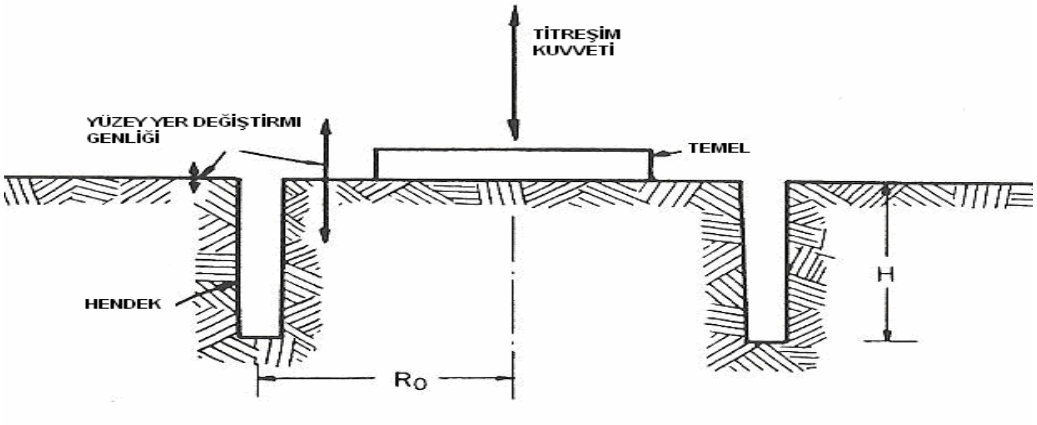
1. Tasarım Verileri: Makina ve zemin hakkındaki ve genlik limitleri ile ilgili verilerin toplanması.
2. Birinci Deneme: Genlik limitlerini sağlayacak sönümleyici kullanmadan temelin tasarımını denenmesi.
3. İkinci Deneme: Makina ve mevcut boşluk için minimum temel boyutu ihtiyacına bağlı olarak, zeminle temasta olacak temel alanının ve ağırlığının seçilmesi.
4. Zeminin eşdeğer yay katsayısının bulunması.
5. Zemin üzerinde bütün sistemin doğal frekansının bulunması.
6. Frekans oranlarının bulunması. r_1
7. Zemin üzerindeki sistemin genliğinin bulunması.
8. Sönümleme derecesinin bulunması.
9. Frekans oranlarının bulunması. r_2
10. w_2^2 nin bulunması.
11. Sönümleyicinin toplam dik rijitliğinin bulunması.
12. Sönümleyici tipinin seçilmesi.
13. Sönümleyiciler üzerindeki sistemin titreşim genliğinin bulunması.
14. Her bir yaya gelen gerçek kuvvetin bulunması.
15. Yayda güvenliğin kontrol edilmesi Prakash ve diğ., 1988).

8.4 Hendek Bariyerler İle Titreşimlerin Yalıtımı

Titreşen bir temel zeminde enerjinin dalga formunda ilerleyişi ile sonuçlanır. Bu enerjinin büyük bir kısmı Rayleigh dalgaları ile taşınır ki bu dalgalar yüzey dalgaları olduğundan yakın yapıları, makinaları ve insanları olumsuz etkileyebilir. Bir yapıyı Rayleigh dalgalarının bu zararlı etkilerinden korumanın bir yolu onu titreşim

kaynağından uzak bir yere yerleştirmektir. Dalga hareketinin genliği kaynaktan uzaklık arttıkça geometrik sönüm ve malzeme sönümünden dolayı azalır. Rayleigh dalgalarının zararlı etkilerinden korunmanın efektif korunma ise dalga bariyerleri ile titreşimlerin perdelenmesi konsepti kullanılarak yapılır. Dalga bariyerler açık hendekler, beton, bentonit ya da kum ile dolgulu hendekler ve kazıklar olabilir. Perdeleme problemleri iki grupta sınıflandırılabilir:

Aktif Yalıtım. Bu türlü yalıtım titreşim kaynağında sağlanır. Bir hendek bariyer kaynağın yakınına ya da Şekil 8.9 da gösterildiği gibi kaynağın çevresine R_0 yarıçapında ve H derinliğinde dairesel hendekler ile sağlanır Prakash ve diğ., 1988).



Şekil 8.9: Titreşim Kaynağı Çevresine Dairesel Hendek Kullanarak Titreşim Yalıtımı - Aktif Yalıtım (Prakash ve diğ., 1988)

Pasif Yalıtım. Bu türlü yalıtım gelen dalgalardan yapıyı korumak üzere yapının yakınında yapılan yalıtımdır. Böylece dalga bariyerleri kaynaktan uzağa titreşim genliğinin azalmasının istendiği yerde uygulanır. Şekil 8.10, H derinliğinde ve L uzunluğunda açık hendekler kullanarak dalgaların zararlı etkilerinden hassas enstrümanı korumak için bir pasif yalıtım uygulamasını göstermektedir. Prakash ve diğ., 1988).

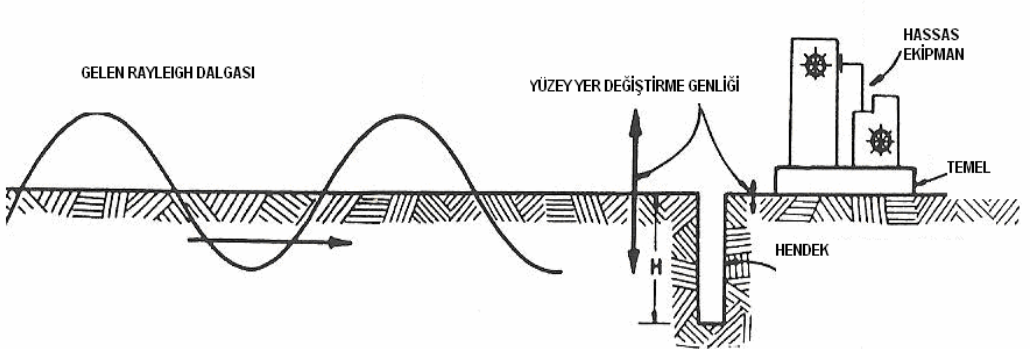
Titreşim yalıtımında "transmisibilite" terimi geçer. Bu aktif yalıtım halinde temel zeminine geçen kuvvetin, dönme dolayısıyla makinanın uyguladığı kuvvete oranıdır. Pasif yalıtım halinde ise hassas alete geçen titreşimin, tabanın titreşimine oranıdır.

$$T = \sqrt{\frac{1+4\zeta^2\varepsilon^2}{(1-\zeta^2)^2+4\zeta^2\varepsilon^2}} \qquad \textbf{(8.24)}$$

Burada ζ, dış tesirin frekansının temelin tabii frekansına oranı, ε ise sönüm oranıdır. Transmisibilite yalıtımın derecesini gösterdiğinden küçük olmalıdır. ε nun her değeri için $\zeta < \sqrt{2}$ olması halinde transmisibilitenin 1 den büyük olduğu görülür. Yani aktif yalıtım halinde temel zeminine makinanın temele uyguladığından daha büyük bir kuvvet geçer. Pasif yalıtım halinde ise hassas makinaya o makinaya dışardan etkiyen titreşimden daha büyük bir titreşim geçer. Dolayısıyla, titreşimlerin yalıtımı söz konusu ise $\zeta < \sqrt{2}$ olmamalıdır.

Efektif yalıtım için hendek ve kazık bariyerlerin tasarımı bu kısımda açıklanmıştır. Hendek bariyerler durumunda genlik azalması faktörü aşağıdaki şekilde tanımlanır (Woods, 1968):

$$GAF = \frac{\text{Hendekler Ile Dik Titresim Genligi}}{\text{Hendekler Kullanmadan Dik Titresim Genligi}} \qquad \textbf{(8.25)}$$



Şekil 8.10: Pasif Yalıtım (Prakash ve diğ., 1988)

8.4.1 Hendek Bariyerler

Geçmişte titreşim yalıtımı için hendek bariyerlerin başarılı ve başarısız bir çok uygulaması olmuştur. Efektif titreşim yalıtımı için hendek bariyerlerin tasarımı problemi için çeşitli deneysel ve analitik araştırmalar yapılmıştır. Bir dizi saha testi sonucuna dayalı olarak, Barkan (1962) kullanılan hendek ve kazık bariyerlerin sonucu olarak titreşim genliğinde azalmanın üzerinde durmuştur ve bunun titreşim kaynağı tarafından üretilen yüzey dalgaları ile karşılaştırıldığında önemli ölçüde büyük boyutlara sahip hendekler ile başarılacağını belirtmiştir. Dolling (1966) titreşim yalıtımına hendek boyutu ve şeklinin etkisini çalışmıştır.

Woods ve Richard (1967) ve Woods (1968) hendeklerin perdeleme etkisini hesaplamak için bir dizi saha testi yapmışlardır. Aktif ve pasif yalıtım durumları araştırılmıştır. Hendek boyutları, kaynaktan uzaklık gibi parametrelerin efektif perdeleme üzerindeki etkileri çalışılmıştır. Bu testler hazırlanmış sahada yürütülmüştür. Test sahasındaki zemin yüzeyden 4 ft derinliğe kadar γ_d=104 lb/ft³, w=%7, e=0.61 ve yüzeyde V_c=940 ft/s ile üniform silt ve ince kum tabakası; 4 ft den 14 ft derinliğe kadar γ_d=91 lb/ft³, w=%23, e=0.68 ve üst tabakada V_c=1750 ft/s ile kumlu siltten oluşmaktaydı. Küçük bir titreşim kaynağı dik titreşim kaynağı olarak kullanılmıştır ve test sahasının merkezine yerleştirilmiştir. Hendek kurulmadan önce ve sonra test sahasında seçilen noktalarda dik zemin hareketinin genlikleri ölçülmüştür. Hendekler varken ve yokken ölçülen genlikler karşılaştırılmıştır ve bariyerlerin etkinliğinin hesabında kullanılmıştır. Genlik azalması faktörü ölçüm noktasında hendek bariyerin etkinliğinin miktarsal hesabını verir.

Testlerde kullanılan hendeklerin kritik boyutları testte kullanılan titreşim frekansı için Rayleigh dalgası uzunluğuna göre normalleştirilmiştir. Bu testte kullanılan değişik frekanslarda Rayleigh dalgası uzunluğu ve hızı Tablo 8.1 de verilmiştir.

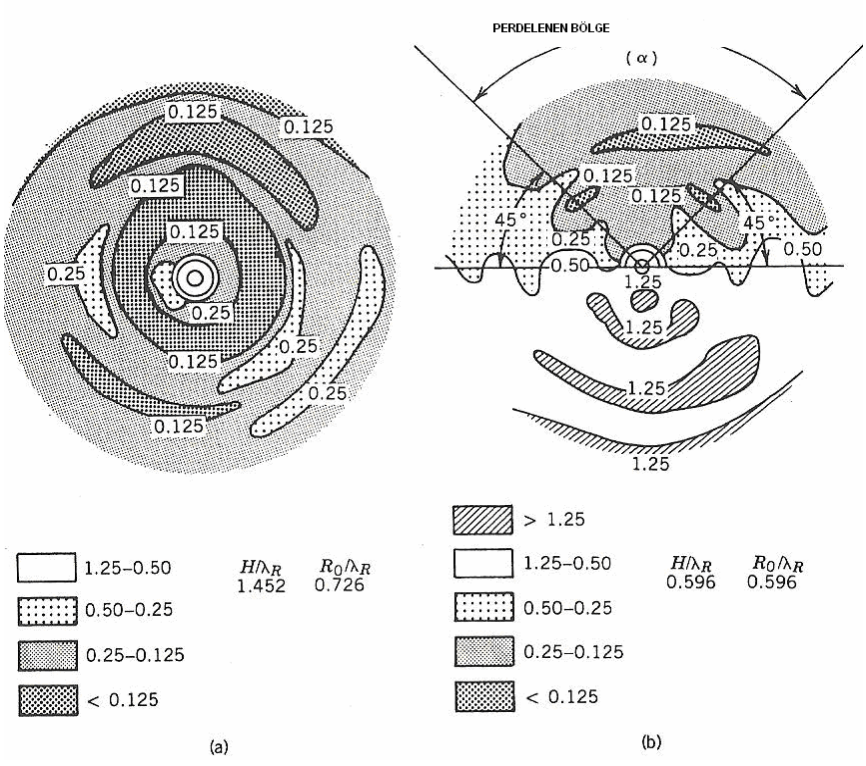
Tablo 8.1: Test Sahasında Yüzey Dalgası Uzunlukları ve Hızları (Woods, 1968)

Frequency, Hz	λ_R ft	V_R, ft/sec
200	2.25	450
250	1.68	420
300	1.38	415
350	1.10	385

Aktif yalıtım testlerinde, hendek derinlikleri 0.5 ft ile 2 ft arasında, hendek yarıçapı ise 0.5 ft ile 1 ft arasında, titreşim kaynağı çevresinde açısal boyutlar ise 90º ile 360º arasında değiştirilmiştir. 200 den 350 Hz e frekans aralığı kullanılmıştır. Normalleştirilmiş derinlik 0.222 den 1.82 ye ve normalleştirilmiş yarıçap 0.222 den 0.910 a kadar değiştirilmiştir. Woods (1968) tarafından yapılan araştırmaların bazı tipik sonuçları Şekil 8.11 de genlik azalması faktörü diyagramları formunda gösterilmiştir. Şekilden de anlaşıldığı gibi, bu testlerde kullanılan hendek boyutları

için 0.25 ya da daha az GAF elde edilmiştir. 0.25 değerinde GAF elde edilen testlerle edilemeyen testlerin sonuçlarının karşılaştırılmasıyla aktif yalıtım için aşağıdaki sonuçlar elde edilir.

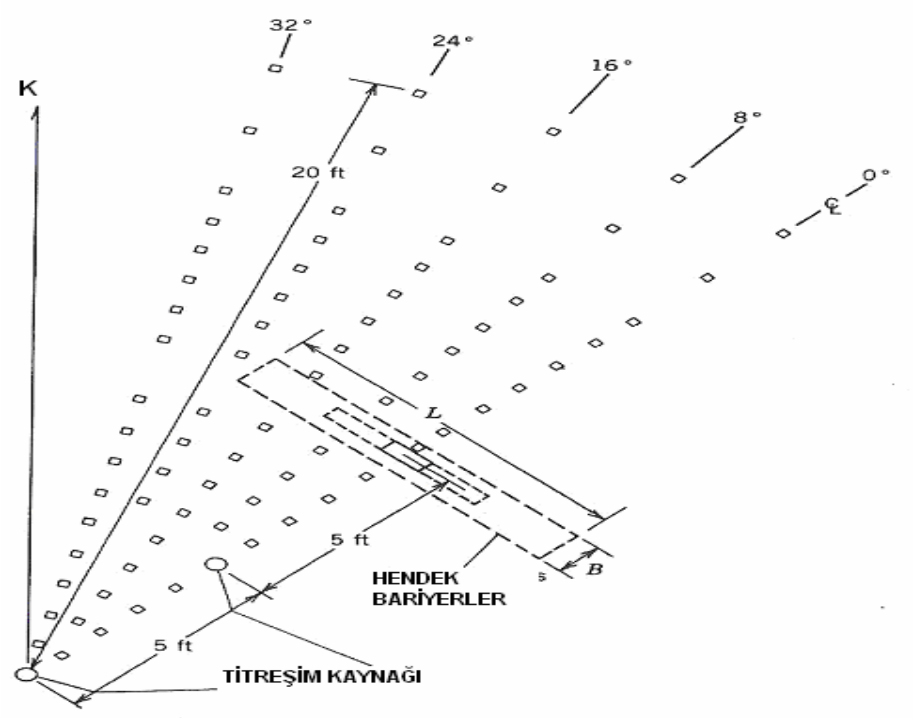
1. Tam daire hendekler için, 0.25 e eşit ya da daha küçük GAF elde edilmesi için normalleştirilmiş derinliğin 0.6 olması gerekir.
2. Tam daire hendek ile perdelenen bölge kaynaktan en az 10 dalga boyu uzaklığa kadar gelmiştir.
3. Daire parçası hendekler için, hendeğin dışında kaynaktan en az 10 dalga boyu mesafede yukarıdaki şekilde gösterilen kaynak merkezinden çıkan 45º lik radyal çizgiler ile sınırlı bölge olarak tanımlanır. Minimum normalleştirilmiş yarıçap hendeğin efektifliği için 0.6 olmalıdır.
4. 90º den küçük açısal uzunluğa sahip daire parçası hendekler etkin yalıtım sağlamazlar.
5. Hendek genişliği önemli bir parametre değildir.



Şekil 8.11: Aktif Yalıtım İçin Genlik Azalması Faktörü Diyagramları

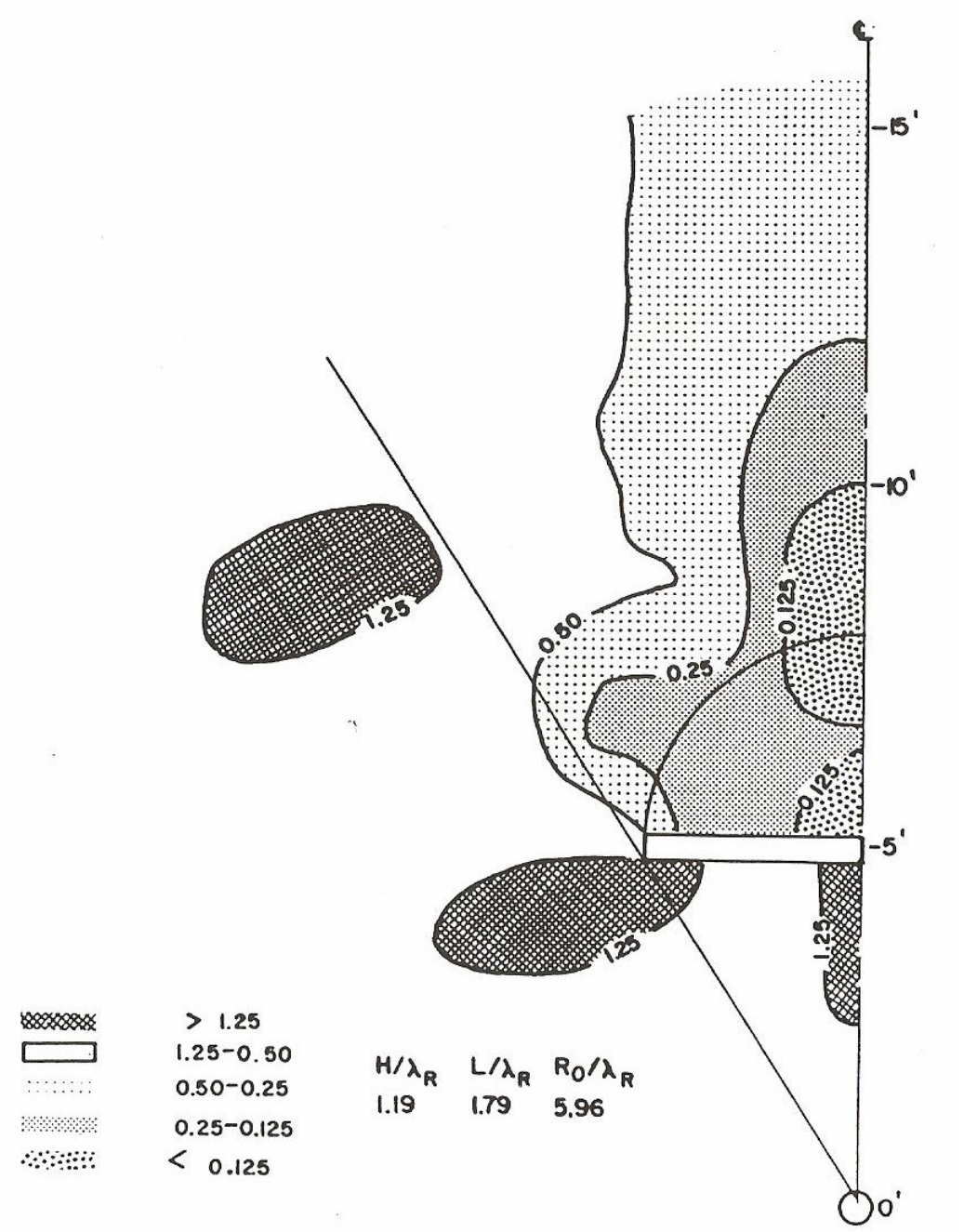
a) Tam Daire Hendek b) Daire Parçası Hendek (Woods, 1968)

Woods (1968) buna ek olarak, dikdörtgen şekilli hendekler kullanarak pasif yalıtım testleri de yapmıştır ve hendek uzunluğunun L, genişliğinin B, derinliğinin H ve kaynaktan uzaklığının R_0 etkisini araştırmıştır. Test sahasının şematik gösterimi Şekil 8.12 de verilmiştir. Hendek boyutları 1.0 ft derinlik, 1.0 ft uzunluk ve 0.33 ft genişlikten 4.0 ft derinlik, 8.0 ft uzunluk ve 10 ft genişliğe kadar bir aralıktadır. Testte kullanılan titreşim frekansı 200 den 350 Hz e kadardır. Normalleştirilmiş derinlik 0.444 den 3.64 e kadar ve normalleştirilmiş yarıçap 2.22 den 9.20 ye kadardır. Bu testlerde hendeklerle perdelenen bölgenin 0º çizgisi etrafında simetrik olduğu varsayılmıştır. Efektif yalıtım için, hendek arkasında 0.5 L yarıçapında yarı daire bir bölgede GAF değerleri 0.25 e eşit ya da küçük olmalıdır. Bu testlerden biri için tipik genlik azalması diyagramları Şekil 8.13 de gösterilmiştir.



Şekil 8.12: Pasif Yalıtım Testleri İçin Test Sahasının Şematik Gösterimi

(Woods, 1968)



Şekil 8.13: Pasif Yalıtım İçin Genlik Azalması Faktörü Diyagramları

(Woods, 1968)

Bu çalışmadan elde edilen önemli sonuçlar aşağıdaki gibidir.

1. Efektif pasif yalıtım için, λ_R Rayleigh dalgası uzunluğu olmak üzere ($R_0 = 2\lambda_R$ den $7\,\lambda_R$ ye), hendek derinliği H en az $1.33\,\lambda_R$ olmalıdır.

2. Kaynaktan büyük uzaklıklarda daha büyük hendeklere ihtiyaç duyulur. Aynı GAF değerini korumak için, hendeklerin normalleştirilmiş alanı (HL/λ_R^2) artan uzaklık R_0/λ_R nedeniyle artırılmalıdır. $R_0 = 2\lambda_R$ de düşey doğrultuda hendeğin alanı en az $2.5\,\lambda_R^2$ ve $R_0 = 7$ de en az $6\,\lambda_R^2$ olmalıdır.

3. Hendek genişliğinin açık hendek efektifliği üzerinde pratikte bir etkisi yoktur (B/λ_R in 0.13 den 0.91 e kadar olan değerleri için).

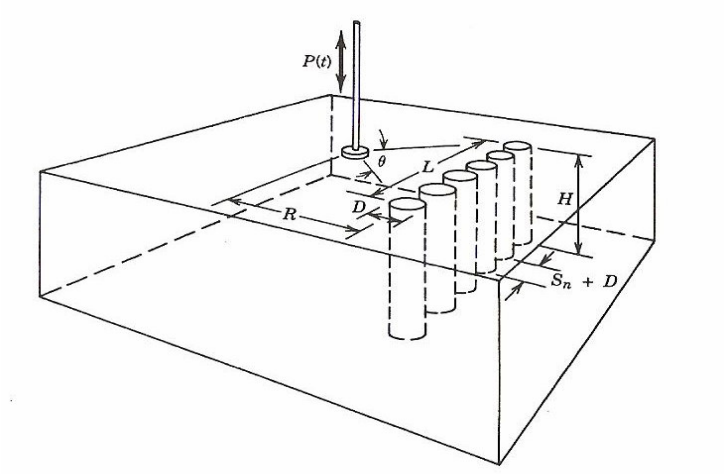
8.4.2 Kazık Bariyerler

Düşük frekansta çalışan bir kaynağın neden olduğu titreşimler söz konusu olduğu zaman, Rayleigh dalgası uzunluğu büyük olacaktır ve değer aralığı 50 m ve yukarısı olabilir. Böyle bir durumda hendeğin efektif olabilmesi için, hendek derinliği aktif yalıtım için $0.6\,\lambda_R$ ve pasif yalıtım için $1.33\,\lambda_R$ olmalıdır. Rayleigh dalgası uzunluğu fazla olduğu zaman, hendek derinliğinin bu büyük değerleri nedeniyle hendek uygulaması pratikte kolay olmaz. Böyle durumlarda, her derinliğe yerleştirilebilen kazıklar kullanılabilir. Pasif yalıtım bariyeri olarak kazık dizisini kullanma alternatifi Woods (1974) tarafından araştırılmıştır. Bu çalışmada holografi prensibi kullanılmıştır ve boş silindirik engellerin genlik azalmasına etkisini hesaplamak için titreşimler elde edilmiştir. 100 cm x 100 cm x 300 cm kutu içinde ince kum ile model oluşturulmuştur. Problem geometrisini gösteren testin şematik gösterimi Şekil 8.14 de gösterilmiştir. Bu şekilde, D boş silindirik engellerin çapı, S_n birbirini izleyen iki kazık arasındaki net boşluktur. Bariyerin efektifliği, bariyere dik ve kaynaktan ±15º her iki tarafa aksların oluşturduğu alanda bariyer ötesinde birkaç çizgiden elde edilen ortalama etkilerin (GAF) elde edilmesi ile sayısal olarak hesaplanır. H/λ_R ve L/λ_R değerleri bütün testlerde 1.4 ve 2.5 olarak alınmıştır. Bu testler için yalıtım etkinliği aşağıdaki gibidir.

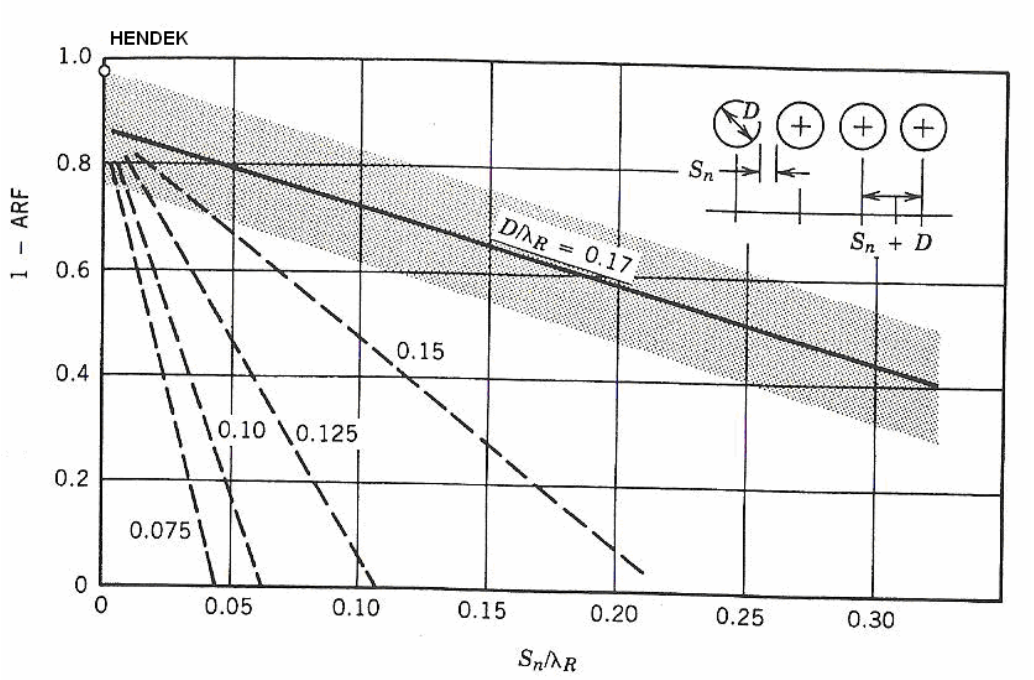
$$Etkinlik = 1 - GAF \qquad \textbf{(8.26)}$$

Değişik testlerden elde edilen veriler, S_n/λ_R ile değişen boyutsuz etkinlik ile Şekil 8.15 de gösterilmiştir. Bu sonuçlardan, Woods (1974) aşağıdaki koşullar sağlandığı takdirde silindir bariyerlerin yalıtım bariyeri olarak davranacağını belirtmiştir.

$$D/\lambda_R \geq 1/6 \quad \text{ve} \quad S_n/\lambda_R < 1/4 \qquad \textbf{(8.27)}$$



Şekil 8.14: Silindirik Boş Bariyerler İçin Parametreler (Woods ve diğ., 1974)



Şekil 8.15: Kazık Çapı ve Kazıklar Arası Boşluğun Fonksiyonu Olarak Yalıtım Etkinliği (Woods ve diğ., 1974)

İki sıra engelin daha efektif olduğu bulunmuştur ve derinlik optimal olmadığı zaman veya yakın yerleştirilmiş tek sıra engel uygulaması mümkün olmadığı zaman çift sıra engeller kullanılabilirler. Sıvı dolgulu bariyerlerin sıvının donması engellendiği takdirde daha etkin oldukları bulunmuştur ancak bu konudaki araştırmalar henüz yetersizdir.

8.5 Hendek Bariyerler İle İlgili Yapılan Sayısal Çalışmalar

8.5.1 Açık Hendekler İle Makina Temellerinin Aktif Yalıtımı

Makina temellerinin neden olduğu titreşimlerin yalıtımı nüfusun yoğun olduğu bölgelerde önemli bir mühendislik problemidir. Bu bölgelerde komşu yapılar ve hassas ekipman zararlı titreşimlerden korunmalıdır. Bazen zemin tarafından taşınan titreşimlerin etkisi kauçuk, kompozit tabakalar, yaylar ya da yay ve sönümleyici sistemler, pnömatik sönümleyiciler gibi lokal izolatörlerin kullanımı ile hafifletilir. Bununla birlikte, böyle mekanik yalıtımın yetersiz olduğu durumlar da vardır. Dahası, makina- temel sisteminin vibrasyon genliği makina ya da makinayı destekleyen zemindeki bozulmalar nedeni ile artabilir. Böyle durumlarda, temel etrafında katı bariyer ya da açık hendek gibi uygun bir dalga bariyeri kullanımı probleme bir çözüm sağlamış olur. Kaynağın yakın çevresinde böyle bir bariyer kullanımı Woods tarafından 1968 yılında aktif yalıtım olarak tanımlanmıştır.

1986 yılında Beskos ve 1992 yılında Al-Hussaini titreşimlerin perdelenmesi üzerine deneysel çalışmalar ve analitik hesaplamalar yapmışlardır. Titreşimlerin dalga bariyerleri ile perdelenmesi aktif ve pasif yalıtım olmak üzere iki kategoriye ayrılır. Pasif yalıtım problemi iki boyutta düzlem şekil değiştirme problemi olarak modellenir. Çünkü dalga bariyeri vibrasyon kaynağından uzaktır ve bariyere gelen çoğunluğunu R dalgalarının oluşturduğu dalga treninin düzlem dalgalar olduğu düşünülür. Diğer tarafta, aktif yalıtım olayında, üç boyutta dalgalar yayan sonlu boyuttaki titreşim kaynağı bariyer ile çevrelenir. Böylece, problem iki boyutta çalışılamaz; üç boyutta realistik bir analiz gerektirir. Sonuçta, pasif yalıtım problemi çok defa çalışılmıştır. Fakat, aktif yalıtım problemi ile ilgili çalışmalar sınırlı kalmıştır. Problem üzerine en önemli çalışma Woods tarafından 1967 ve 1968 yıllarında yapılan deneysel çalışmalardır.

Woods açık hendekler ile aktif ve pasif yalıtım üzerine bir çok saha modeli testi yapmıştır. Açık hendeklerin derinliği 0.15 m, 0.3 m ve 0.6 m idi. Hendekler periyodik dik titreşimlere maruz 101.6 mm çapındaki dairesel yüzey pabucundan 0.15 m ve 0.3 m uzaklığa sahiptiler. Açık hendeklerin yerleri ve derinliğinin hendeklerin etkinlik derecesine etkisi üzerine yaptığı araştırmalar sonucu Woods, minimum hendek derinliğinin Rayleigh dalgası boyunun 0.6 katı olduğu zaman zeminde yer değiştirme genliğinin %75 oranında azaldığı sonucuna varmıştır.

Dasgupta 1986 yılında aktif yalıtım problemi üzerine ilk sayısal çözümü sunmuştur. Üç boyutlu sınır elemanlar algoritmasına dayanan sabit bir eleman kullanarak açık hendekler ile bir aktif yalıtım örneği sunmuşlardır. Son zamanlarda, Banerjee 1988 yılında, sınır elemanlar yöntemine dayanan kuadratik elemanlar kullanarak açık hendekler ile aktif yalıtım örnekleri sunmuştur. Buna ek olarak, Haupt (1978) ve Beskos (1988) gibi bazı araştırmacılar düzlem şekil değiştirme idealizasyonunu kullanarak aktif yalıtım örnekleri sunmuşlardır. Fakat, gerçek problemi doğru bir biçimde gösterememişlerdir.

Aktif yalıtım problemi üzerine son analitik ve sayısal çalışmalarda açık hendek dalga bariyerlerinin titreşim yalıtımını tanımlayacak çeşitli parametreler üzerine sistematik bir araştırmanın eksikliği göze çarpmaktadır. Asıl amaç böyle sistematik bir araştırmayı yönetmek ve çalışmaların sonucunda açık hendeklerle aktif yalıtımın titreşimleri perdeleme etkinliğinin tahmini için basit bir tasarım formülü geliştirmektir.

Şimdiki çalışmada, Banerjee ve Ahmad (1985) ve Ahmad (1986) tarafından rapor edilen "BEST3D" adlı sınır elemanlar metodu kodunun gelişmiş versiyonu olan "BENAS" adlı üç boyutlu sınır elemanlar metodu algoritmasını kullanarak, açık hendekler ile makina temellerinin titreşim yalıtımının üç boyutlu analizi yapılmıştır. Zemin homojen, izotropik, viskoelastik boşluklu zemin olarak modellenmiştir. Harmonik dik titreşimlere maruz yüzey temeli vibrasyon kaynağı olarak düşünülmüştür.

Yoğun parametrik sonuçlar boyutsuz grafiklerde hendek derinliği ve genişliğinin geniş bir aralığı için, hendeklerin yerleri için ve temelin boyutu için gösterilmiştir. Bu sonuçlar açık hendekler ile aktif yalıtımın mekanizmasının daha iyi anlaşılmasını sağlamıştır. Dahası, burada gösterilen tasarım formülü pratik uygulamalarda açık hendeklerin titreşimlerin perdelenmesi üzerine etkinliğinin tahmini için kullanılmaktadır. Bu formül hendeklerin derinlik ve yerlerinin etkisini, temelin boyutları ile zeminin Poisson oranının etkisini de içermektedir. Sonuç olarak, çalışma Woods (1968) tarafından sağlanan tasarım rehberi üzerine bir gelişmedir.

Problemin Tanınması

Şekil 8.16 problemi göstermektedir. Viskoelastik boşluklu zemin yüzeyi üzerine oturan b_f yarıçapında dairesel rijit pabuç (kaynak) $P_0 e^{iwt}$ harmonik dik kuvvet etkisi

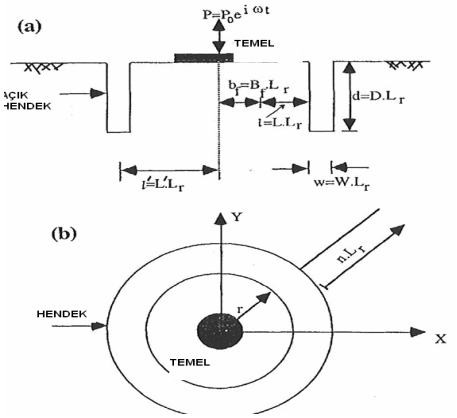
altındadır. d derinliğinde w genişliğinde açık hendek kaynaktan merkezden merkeze l' uzaklığına yerleştirilmiştir. Bir hendek ile titreşim yalıtımı yüzey (Rayleigh) dalgalarının perdelenmesi şeklinde olur. Gerçek boyutlar d, w, l', b_f Rayleigh dalgası uzunluğu L_r ye göre normalleştirilmiştir. Göreceli olarak D, W, L', B_f elde edilir. Problemin (Şekil 8.16) aksimetrik doğasından dolayı, bütün dairesel çizgiler boyunca genlik azalmasının aynı olması gerekir. Dairesel hendeklerle izole edilmiş dairesel pabuçlar için genlik azalım oranı dairesel bir çizgi boyunca hesaplanır ve A_{rr} ile gösterilir.

$$A_{rr} = \frac{\text{Bariyer ile zemin yüzeyinin düsey yer degistirme genligi}}{\text{Bariyersiz zemin yüzeyinin düsey yer degistirme genligi}} \qquad \textbf{(8.28)}$$

A_{rr} nin ortalama değeri bir dairesel çizgi boyunca hesaplanırsa,

$$A_{rr} = 1/nL_r \int_{r_b=0}^{nL_r} A_{rr}\, dr_b \qquad \textbf{(8.29)}$$

olur. Burada, $r_b (= r - l')$ = bariyerin dış kenarı dışındaki dairesel uzaklık; ve nL_r ortalama A_{rr} hesabı için düşünülen alanının büyüklüğüdür.



Şekil 8.16: Açık Hendekler İle Aktif Yalıtım a) Kesit b) Plan

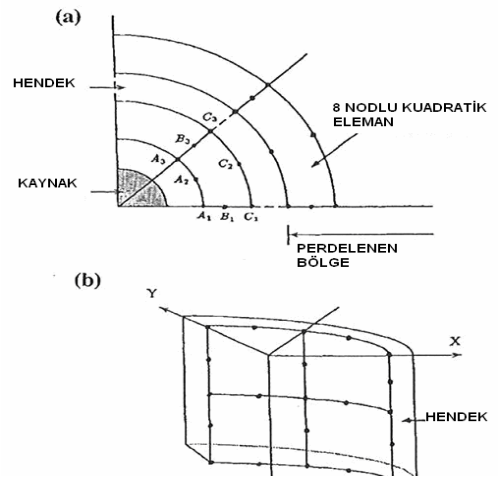
(Ahmad ve diğ., 1996)

Sayısal Çevrimler

Burada kullanılan sınır elemanlar metodu kodu çeşitli geometri ve simetriyi de içermektedir. Sonuçta, çalışılan problem için Şekil 8.17(a) daki geometri model

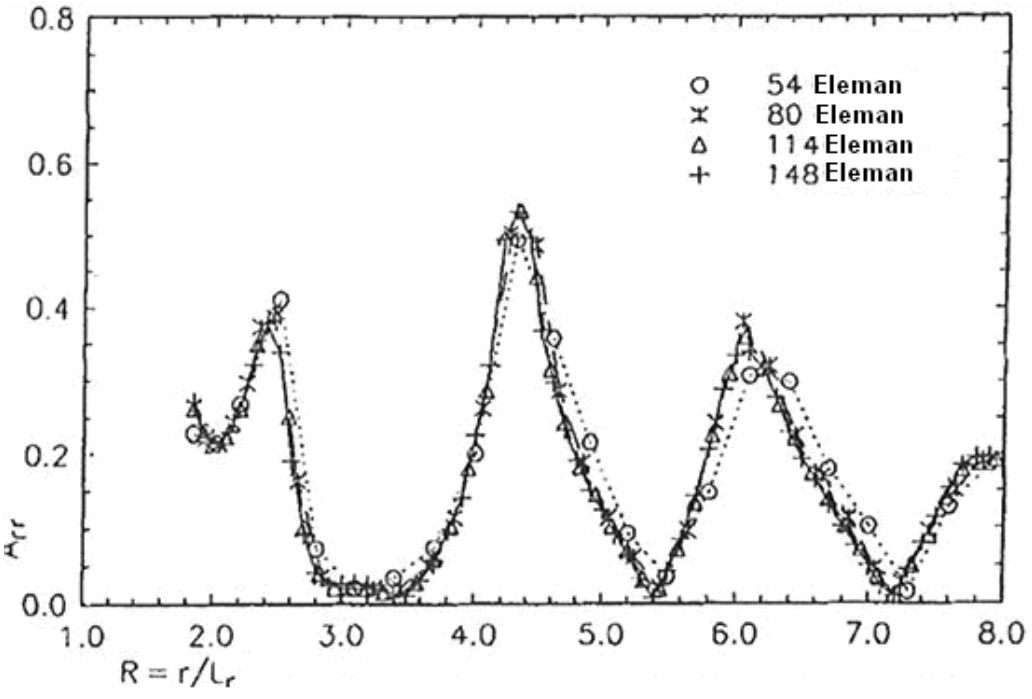
olarak alınmıştır. Bu hesaplarda harcanan zamanı ve gayreti azaltmıştır. Üç boyutlu sınır elemanlar analizinde, sınır elemanlar yüzey elemanlarıdır. Şekil 8.17(a) da gösterilen zemin yüzeyi modeli için tipik sekiz noktalı kuadratik sınır eleman (mesela $A_1B_1C_1C_2C_3B_3A_3A_2$) kullanılmıştır. Hendeğin sınır eleman modeli Şekil 8.17(b) de gösterilmiştir. Rayleigh dalgası-enerjisi kaynak dışına silindirik bir biçimde, gövde dalgaları ise yarı küresel bir biçimde yayılır. Problemin aksimetrik doğasından dolayı, yüzey elemanlarının dairesel uzunluğu A_1C_1 ya da A_3C_3 sayısal model kriterini gösterir.

Problem için uygun sayıda parçanın seçilmesi için parçalar bütünü yakınsaklığı çalışması yapılmıştır. Şekil 8.18. $B_f = 1.0$, $L' = 1.8$, $W = 0.1$ ve $D = 1.0$ parametreleri için değişik parça bütünleri için elde edilmiş A_{rr} genlik azalım oranını göstermektedir. Kuadratik elemanlar kullanıldığı için, elemanların radyal uzunluğu bir buçuk Rayleigh dalga uzunluğundan küçük olmalıdır. Açık hendeklerle aktif yalıtım araştırması için $0.4\,L_r$ uzunlukta elemanlara sahip 80 elemanlı parça bütünü seçilmiştir. Bir sonraki kısımda, sınır elemanlar yöntemi algoritmasının doğruluğu elde edilen datalarla karşılaştırılacaktır.



Şekil 8.17: Sınır Eleman Modeli a) Zemin Yüzeyi b) Açık Hendek Modeli

(Ahmad ve diğ., 1996)



Şekil 8.18: Açık Hendeklerle Parçalar Bütünü Yakınsaklığı Çalışması

(B_f =1, L' =1.8, W =0.1 D =1) (Ahmad ve diğ., 1996)

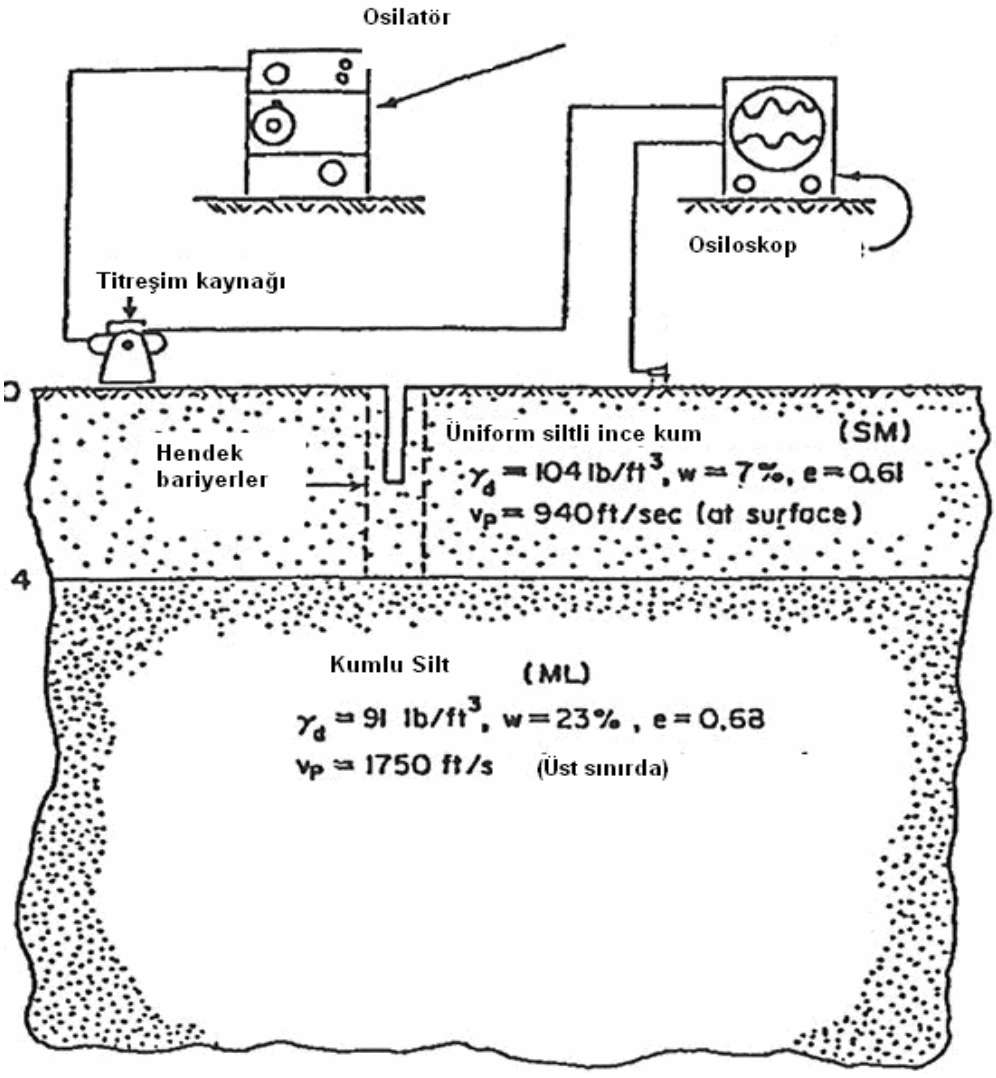
Yayınlanmış Deneysel Veriler İle Karşılaştırma

Woods (1967, 1968) 0.1 m çapında periyodik dik titreşimlere maruz dairesel pabucu modelini çevreleyen açık hendek ile bir çok aktif yalıtım testi yapmıştır. Açık hendeklerin derinliği 0.153 m, 0.305 m ve 0.458 m olup, hendekler titreşim üreten pabuçtan 0.153 m ve 0.305 m uzaklığa sahiptiler. Bütün hendeklerin genişliği 0.076 m idi. Woods'un aktif yalıtım testi için boyutsuz parametrelerin aralığı: L' =0.222-0.92, B_f =0.074-0.152, D =0.222-1.82 ve W =0.11-0.228 dir. İki tabakalı zemin üzerinde yapılan bu saha testleri sınır elemanlar metodu kodu kullanılarak sayısal olarak simulize edilmiştir. Woods'un elde ettiği test sonuçları ile sınır elemanlar metodu çözümü arasında bir karşılaştırma yapılmıştır.

Sayısal metot ile gerçek problemin simülasyonu için ilk adım saha şartlarına uygun gerçekçi zemin parametreleri elde etmektir. Test sahasında ölçülen zemin özellikleri (Woods 1968) Şekil 8.19 de gösterilmiştir. Zemin profili, göreceli olarak derin homojen zemin üzerinde 1.22 m kalınlıkta tabakadan oluşmaktadır. Bu iki tabakalı profil sınır elemanlar metodu kodu ile kolaylıkla modellenebilir. Rayleigh dalgası

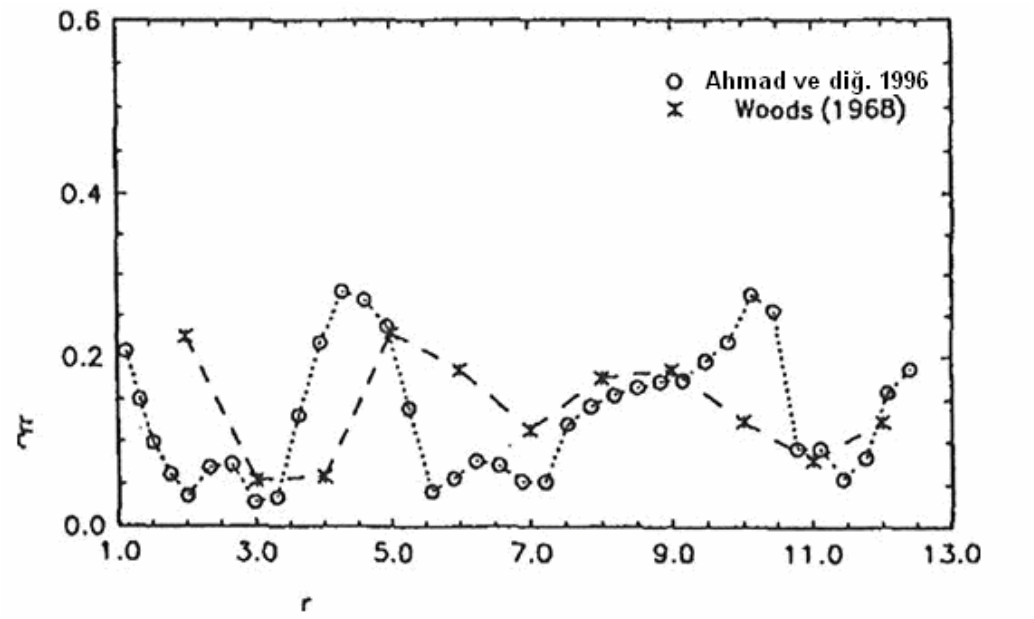
hızları V_r (m/s)= 137, 128, 126 ve 117 için, sahada ölçülen Rayleigh dalgası uzunlukları, L_r (m)= 0.686, 0.513, 0.421 ve 0.336 dır. V_r nin frekans ile değişimi esas olarak kayma modülünün derinlikle artması (efektif gerilmedeki artıştan dolayı) ve iki tabakalı zeminde Rayleigh dalgası bozulmalarından dolayıdır.

Bu problemin sınır elemanlar metodu analizi için ihtiyaç duyulan zemin parametreleri dinamik kayma modülü (küçük şekil değiştirmelerde) (G_s), öz kütle (ρ_s), Poisson oranı (ν_s) ve malzeme sönüm katsayısı (β_s) dir. Zemin verilerinin kullanılması ile bu parametreler aşağıdaki gibi tahmin edilir.



Şekil 8.19: Zemin Profili ve Woods'un Saha Testi İçin Zemin Özellikleri

(Woods, 1968)



Şekil 8.20: Açık Hendekle Aktif Yalıtım İçin Karşılaştırma ($L^{'}$=0.726, D=1.452, W=0.182, f=300 Hz.) (Ahmad ve diğ., 1996)

- Üst Tabaka: ρ_s=50.437 kg; ν_s=0.35; ve G_s=57.57 $(V_r)^2$
- Alt Tabaka: ρ_s=50.729 kg; ν_s=0.45; ve G_s=48.636 Mpa

Burada, V_r=Verilen bir frekansta sahada ölçülen Rayleigh dalgası uzunluğuna ilişkin Rayleigh dalgası hızı. Her iki zemin için de sönüm oranının %5 olduğu kabul edilmiştir.

Şekil 8.20 sınır elemanlar metodu sonuçları ile Woods'un AF 6-300 ($L^{'}$=0.726, D=1.452, W=0.182, f=300 Hz) numaralı deney verileri arasında bir karşılaştırmadır. Woods (1968) yılında gösterilen genlik azalım oranı sekiz radyal doğrultu boyunca genlik azalım oranlarının ortalamasıdır. Bu sahada değişik doğrultulardaki homojen olmama durumu nedeniyle yapılmıştır. Şekil 8.20 ortalama bir yaklaşımla sınır elemanlar metodu çözümünün sonuçsal olarak Woods'un deney sonuçları ile uyumlu olduğunu göstermektedir. Bununla birlikte, kaynaktan radyal uzaklıklar boyunca genlik azalım oranının değişiminin her iki sonuç için de tamamen aynı olmadığı görülmektedir. Bu test sahasındaki lokal homojensizlik ve iki tabakanın kayma modülünün tahminindeki yanlışlıklardan kaynaklanıyor olabilir.

Parametrik Çalışma

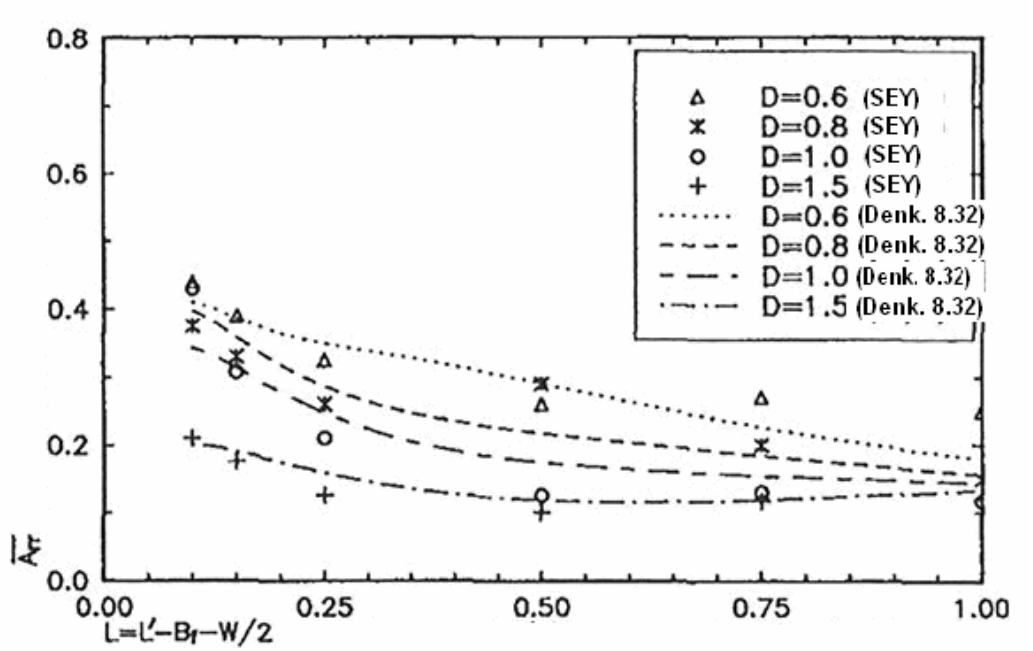
Göreceli olarak derin homojen zemin içinde açık hendeklerle aktif yalıtım üzerine değişik anahtar parametrelerin etkisi çalışılmıştır. Zeminin malzeme özellikleri (mesela kayma modülü ve birim ağırlık) ve frekansı, f, Rayleigh dalga uzunluğu, L_r, daima birlik olacak şekilde seçilmiştir. Zeminin sönüm oranı, β_s, %5 olarak alınmıştır ve kompleks kayma modülü formunda sınır elemanlar formülasyonu içinde yer almaktadır.

$$G_s^* = G_s(1 + i\beta_s) \qquad \textbf{(8.30)}$$

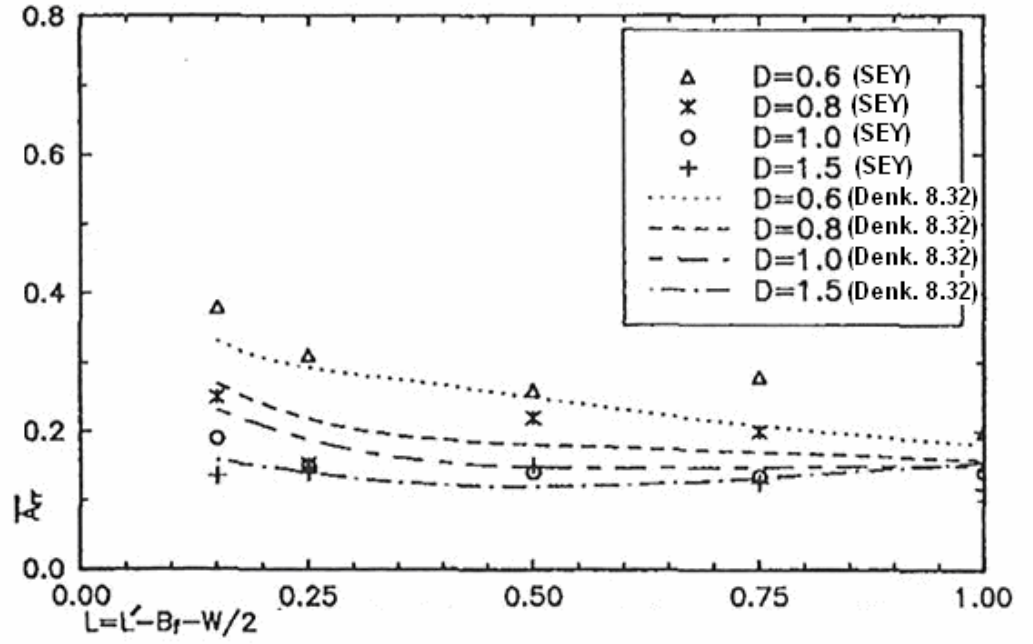
Aksi belirtilmedikçe, zeminin Poisson oranı, ν_s=0.4 ve normalleştirilmiş hendek genişliği, W=0.1, olarak kullanılmıştır. Titreşim kaynağı periyodik dik titreşimlere maruz rijit dairesel yüzey pabucu olarak modellenmiştir. Ortalama genlik azalım oranı, $\overline{A}_{rr}$, hendeğin dış kenarından $5L_r$ uzaklığın alınmasıyla, bariyerin perdeleme etkinliğinin iyi bir gösterimi olarak bulunmuştur. Hendekten $5L_r$, $10L_r$, $15L_r$ uzaklıkta perdeleme bölgesi üzerinde $\overline{A}_{rr}$ değerleri belli bir sayıdaki testler sonucunda hesaplanmıştır ve $5L_r$ bölgesinde $\overline{A}_{rr}$ değeri $10L_r$ ve $15L_r$ bölgesindekine yakın veya biraz yüksektir. Dahası, Şekil 8.27 den de görüldüğü üzere, tabanın yer değiştirme genlikleri, titreşen dairesel temelden dolayı, uzaklıkla hızlı bir biçimde bozulmaktadır. Pabucun kenarından 5-6L_r uzaklık sonrasında genlik değerleri pabucun kenarındakilere göre oldukça küçüktür ki perdelenme istenen kritik bölge $5L_r$ uzaklık boyuncadır (Ahmad ve diğ., 1996).

Pabuç Boyutunun Etkisi

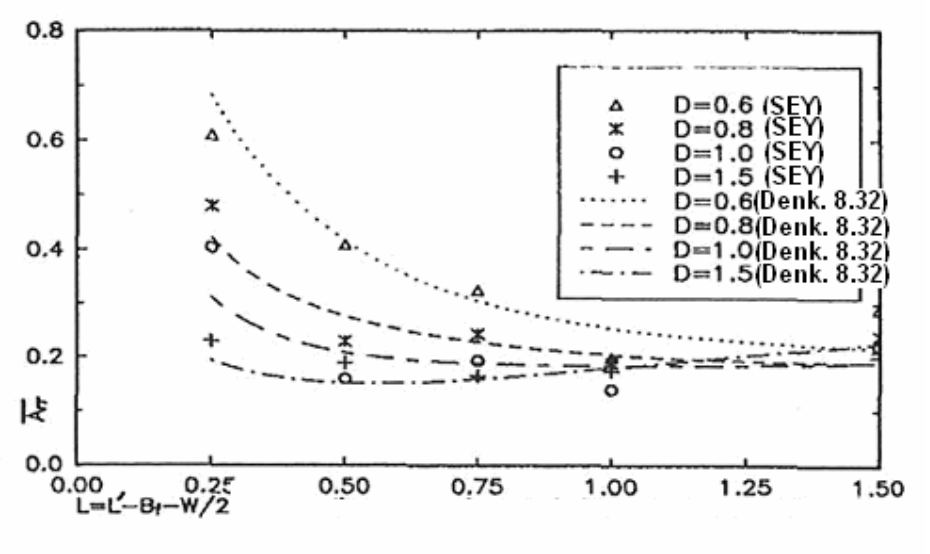
Titreşim frekansına bağlı titreşen temelin normalleştirilmiş yarıçapı $B_f (= b_f / L_r)$ önemli bir parametredir. Bunun açık hendekler ile aktif yalıtım üzerindeki etkisi aşağıdaki şekillerin karşılaştırılması ile çalışılabilir. Burada sınır elemanlar metodu analizi (veri noktaları ile gösterilmiştir.) ile elde edilen ortalama genlik azalım oranı değerleri, normalleştirilmiş $L = L' - B_f - w/2$ temiz uzaklıkları ile çizilmiştir. Bu şekiller B_f nin 0.1, 0.3, 0.5, 1.0 ve 2.5 değerleri için genlik azalmasını göstermektedir.



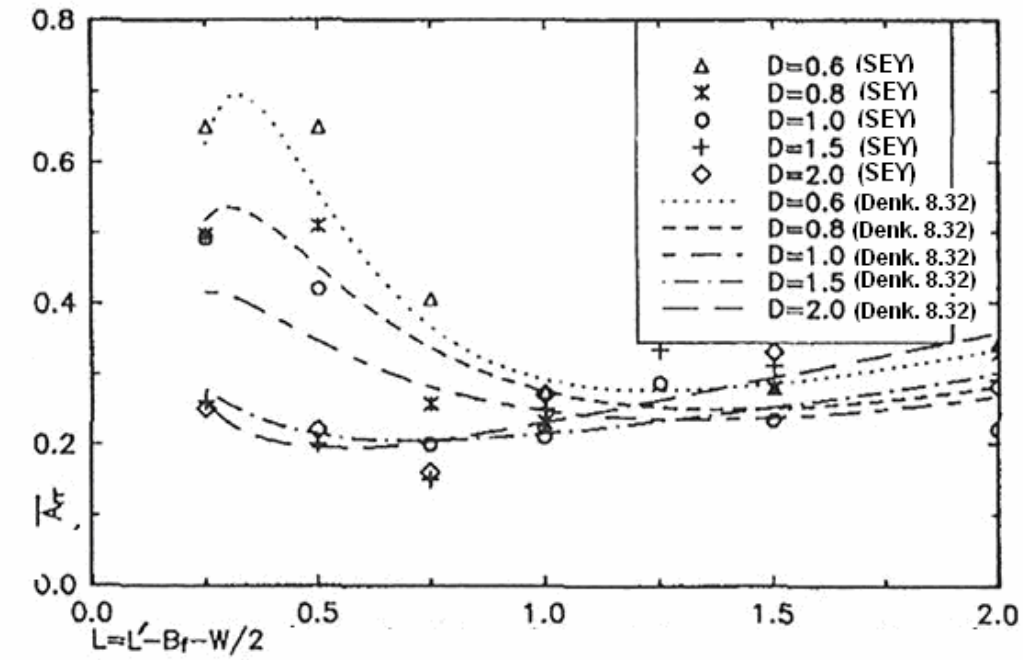
Şekil 8.21: Kaynak ve Hendek Arasında Normalleştirilmiş Temiz Uzunluk (L) nin B_f =0.1 İçin Genlik azalması Üzerindeki Etkisi (Ahmad ve diğ., 1996)



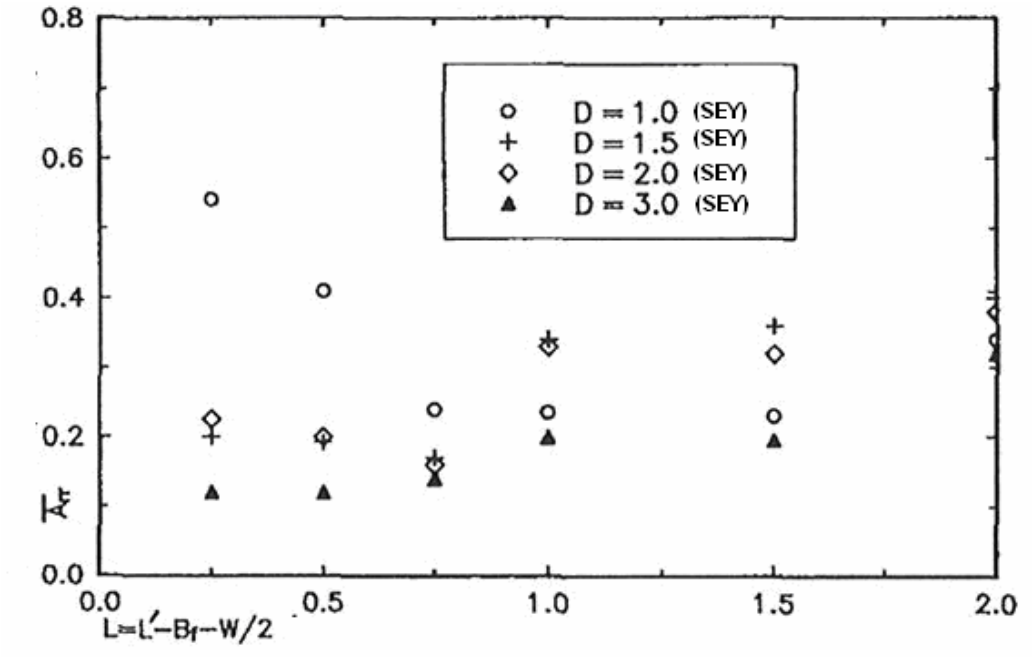
Şekil 8.22: Kaynak ve Hendek Arasında Normalleştirilmiş Temiz Uzunluk (L) nin B_f =0.3 İçin Genlik azalması Üzerindeki Etkisi (Ahmad ve diğ., 1996)



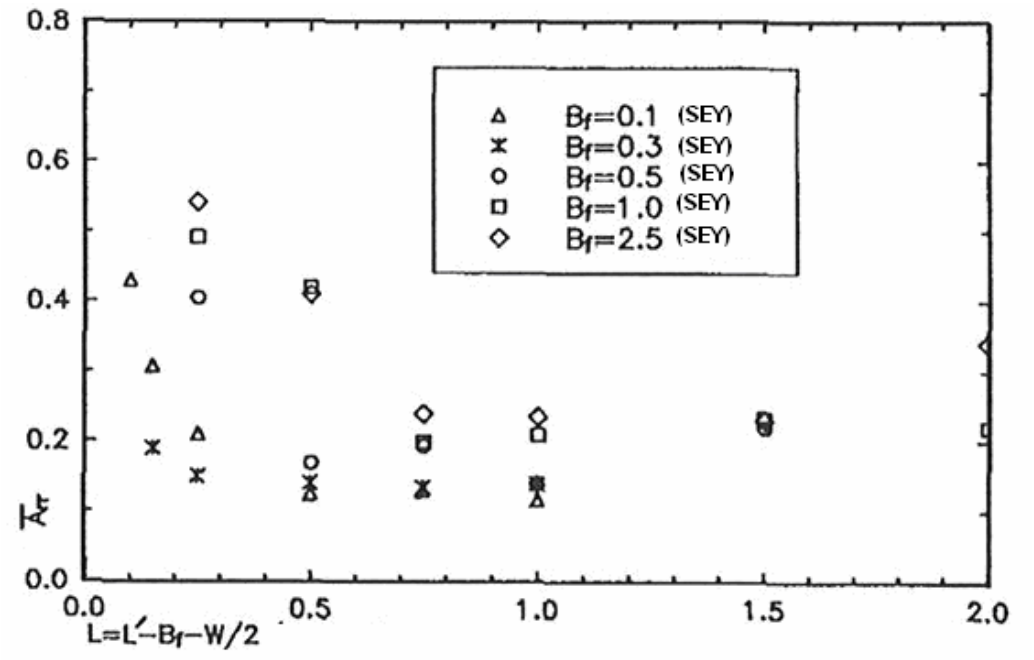
Şekil 8.23: Kaynak ve Hendek Arasında Normalleştirilmiş Temiz Uzunluk (L) nin B_f =0.5 İçin Genlik azalması Üzerindeki Etkisi (Ahmad ve diğ., 1996)



Şekil 8.24: Kaynak ve Hendek Arasında Normalleştirilmiş Temiz Uzunluk (L) nin B_f =1.0 İçin Genlik azalması Üzerindeki Etkisi (Ahmad ve diğ., 1996)



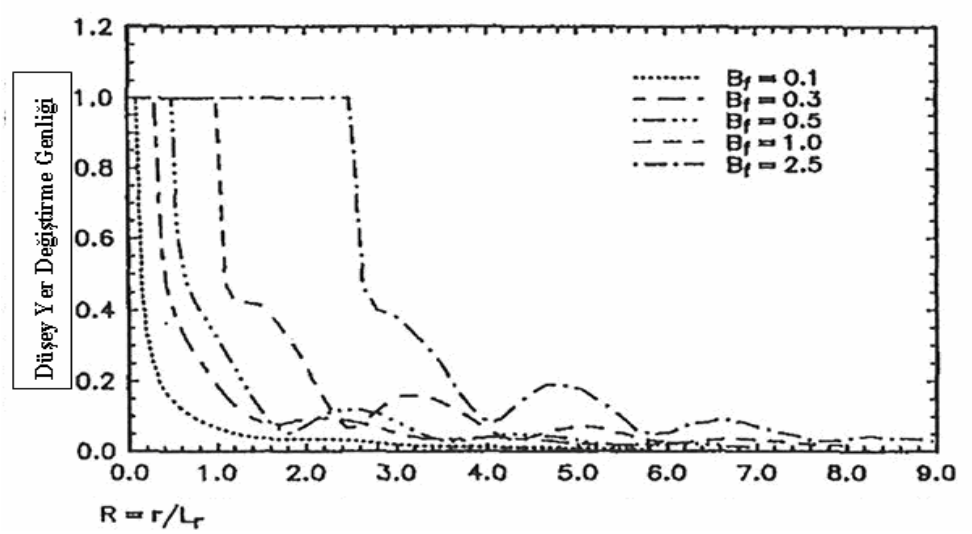
Şekil 8.25: Kaynak ve Hendek Arasında Normalleştirilmiş Temiz Uzunluk (L) nin B_f =2.5 İçin Genlik azalması Üzerindeki Etkisi (Ahmad ve diğ., 1996)



Şekil 8.26: Normalleştirilmiş Pabuç Yarıçapı B_f nin (D =1) Genlik azalması Üzerindeki Etkisi (Ahmad ve diğ., 1996)

Woods'un (1968) tasarımına karşın, hendek derinliği $d \geq 0.6L_r$ %75 oranında ortalama genlik azalmasını ($\overline{A}_{rr}$=0.25) her zaman garanti etmez. Çünkü, açık bir hendeğin perdeleme etkinliği hendeğin derinliğine, yerine ve pabuç boyutuna bağlıdır. B_f nin önemi ayrıca Şekil 8.26 dan da görülebilir ki burada genlik azalım oranı $\overline{A}_{rr}$ bir hendek derinliği için, D=1.0, B_f ve L nin fonksiyonu olarak çizilmiştir. Bariyer etkinliğinin B_f ye bağımlılığı aşağıda açıklanmıştır. Şekil 8.27 B_f nin değişik değerleri için dik düşey titreşimler üreten dairesel pabuç için uzaklık ile dik zemin titreşimlerinin değimini göstermektedir. B_f nin B_f=0.1 gibi küçük değerleri için dik titreşim genliği uzaklıkla bozulur. B_f=0.3 de, dalgalanmalar görülmeye başlar. B_f=0.5 ve B_f nin daha yüksek değerlerinde, dalgalanmalar daha güçlüdür ve büyük tepe ve çukurlar görülür. Kaynağa doğru dalgalanmalar artar, kaynaktan uzaklaştıkça azalır, kademeli olarak serbest bir Rayleigh dalgası formunu alır. Kaynaktaki her bir nokta tek bir titreşim kaynağı olarak ele alınabilir. Temel bütün bu noktalarla rijit gövde titreşimi yapar. Bütün noktalar aynı fazdadır. Fakat, her bir nokta tarafından üretilen dalgalar değişik uzunluklara kadar hareket ederler.

Eğer B_f büyükse, bu önemli bir faz karlılığına neden olur ve dalga karışması ile sonuçlanıp tepe ve çukurlar oluşur. B_f nin küçük değerleri için, bütün temel bir nokta kaynağı gibi davranır ve dalga karışması etkisi küçük olur. B_f değerine bağlı tepe ve çukurlar kaynağa yaklaştıkça güçlenir. Bununla birlikte, Woods'un (1968) saha çalışmasında, B_f nin etkisi düşünülmemiştir. Dahası, bariyerin kaynaktan uzak olduğu pasif yalıtım durumunda (Ahmad ve Al-Hussaini, 1991) bu davranış elde edilmemiştir. Çünkü, dalga hareketinin tepe ve çukurları kaynaktan uzakta daha zayıftır, kademeli olarak serbest Rayleigh dalgası formunu alır (Ahmad ve diğ., 1996).



Şekil 8.27: Rijit Dairesel Temelin Dik Harmonik Titreşimlerinden Dolayı Yüzey Yer Değiştirmesi (Ahmad ve diğ., 1996)

Hendek Derinliğinin Etkisi

Ortalama genlik azalması $\overline{A}_{rr}$ üzerinde normalleştirilmiş hendek derinliği D nin etkisi Şekil 8.21 – 8.22 – 8.23 – 8.24 – 8.25 da görülmektedir. Bunun etkisi, normalleştirilmiş kaynak genişliği (B_f) nin etkisi ve hendeğin kaynaktan uzaklığı (L) ile kupledir ve kompleks bir davranıştadır. B_f nin daha büyük değerleri için (Şekil 8.26, B_f =2.5), maksimum etkinliğin başarılması için daha büyük derinliklere ihtiyaç duyulur. Daha yüksek B_f için, önceki kısımda açıklandığı gibi, dalga karışması temel yakınında güçlü tepe ve çukurlara sebep olur. Sonuç olarak, temele yakın yerleştirilen açık bir hendeğin perdeleme etkisinde bozulmalar olur. Daha yüksek B_f için, hendek titreşen temelden uzakta olmalıdır. Bu daha geniş hacimdeki elastik dalgaların hendek gerisinde yayılmasını sağlar. Böylece, daha büyük normalleştirilmiş derinliğe, D, maksimum perdeleme etkisi için ihtiyaç duyulur.

Hendek Yerinin Etkisi

Aktif yalıtımda açık hendek bariyerinin perdeleme etkisi, Şekil 8.22 – 8.26 de kaynak ile hendek arasında normalleştirilmiş temiz uzaklığın ($L = L' - B_f - w/2$) bir fonksiyonu olarak elde edilmiştir. L nin optimum değeri B_f nin bir fonksiyonudur ve temel boyutundaki artış ile artar. B_f nin 0.1 den 1 e kadarki değerlerinde, hendek

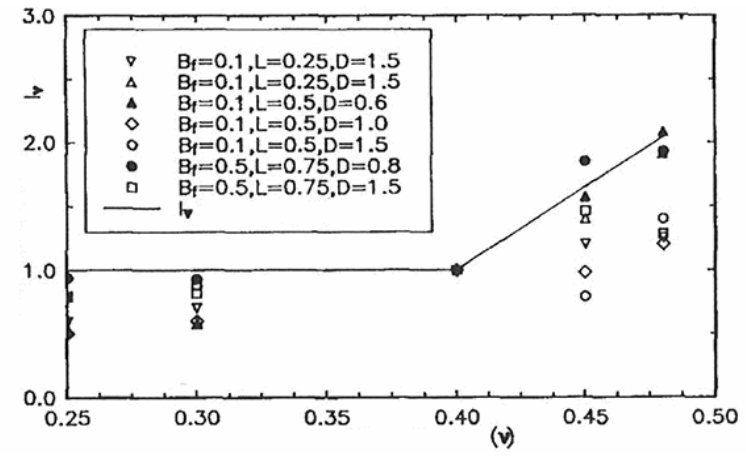
yerinin etkisi $B_f / L \leq 1.0$ için , $L \geq 0.25$ koşuluyla, önemsizdir. B_f nin daha yüksek değerleri için, mesela $L = 2.5$, L nin etkisi kompleks bir hal alır. Bunun nedeni, dalga karışması etkisinin daha yüksek olması olabilir. Kaynağa yakın yerleştirilen hendekler için, değişik hendek derinliklerinin, D, perdeleme etkisi değişir. Buna ek olarak, kaynak tarafından üretilen dalgalar ile yansıyan dalgaların karışması kaynak ile hendek arasındaki uzaklık azaldıkça daha belirginleşir (Ahmad ve diğ., 1996).

Hendek Genişliğinin Etkisi

B_f, D ve L nin geniş arlıkları için hendek genişliğinin aktif yalıtım üzerindeki etkisini çalışmak için normalleştirilmiş genişlik W 0.1 den 0.5 e kadar değiştirilmiştir. Pratiklik için, hendek genişliğinin etkisi dikkate alınmamıştır.

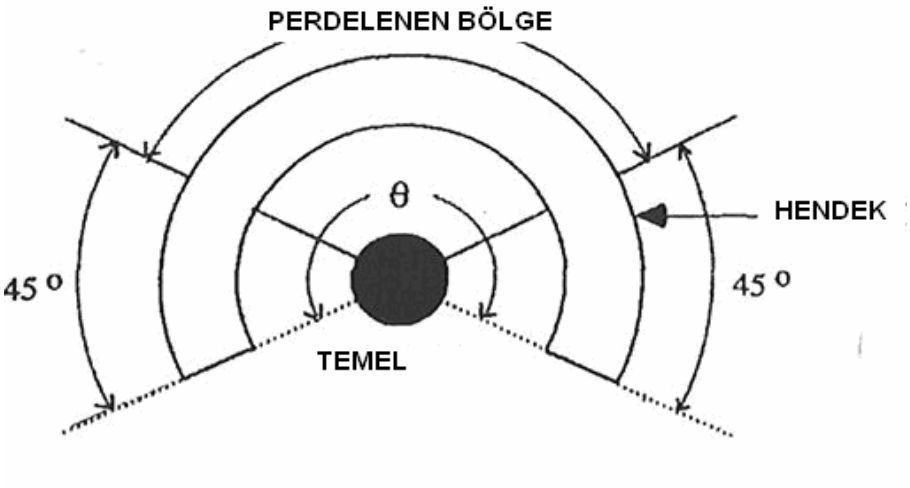
Zeminin Poisson Oranının Etkisi

Zeminin Poisson oranının açık hendeklerle titreşimlerin perdelenmesi üzerindeki etkisi, B_f, D ve L nin farklı kombinasyonları için Şekil 8.28 de gösterilmiştir. Poisson oranı faktörü, I_v, gerçek Poisson oranında, ν_s, $\overline{A}_{rr}$ nin örnek olarak ν_s=0.4 ise, $(\overline{A}_{rr})_\nu / (\overline{A}_{rr})_{0.4}$ oranı olarak tanımlanır. 0.25-0.4 aralığında Poisson oranı için, ortalama genlik azalması oranı, ν_s=0.4 de $\overline{A}_{rr}$, bütün aralık için genlik azalmasını göstermek üzere kullanılabilir. Bununla birlikte, Poisson oranının 0.4 den büyük değerleri için bazı durumlarda, $\overline{A}_{rr}$ de artış olur.



Şekil 8.28: Zeminin Poisson Oranının Genlik Azalması Üzerindeki Etkisi

(Ahmad ve diğ., 1996)



Şekil 8.29: Daire Parçası Hendek ve Perdeleme Bölgesi İçin Plan Görünüşü

(Ahmad ve diğ., 1996)

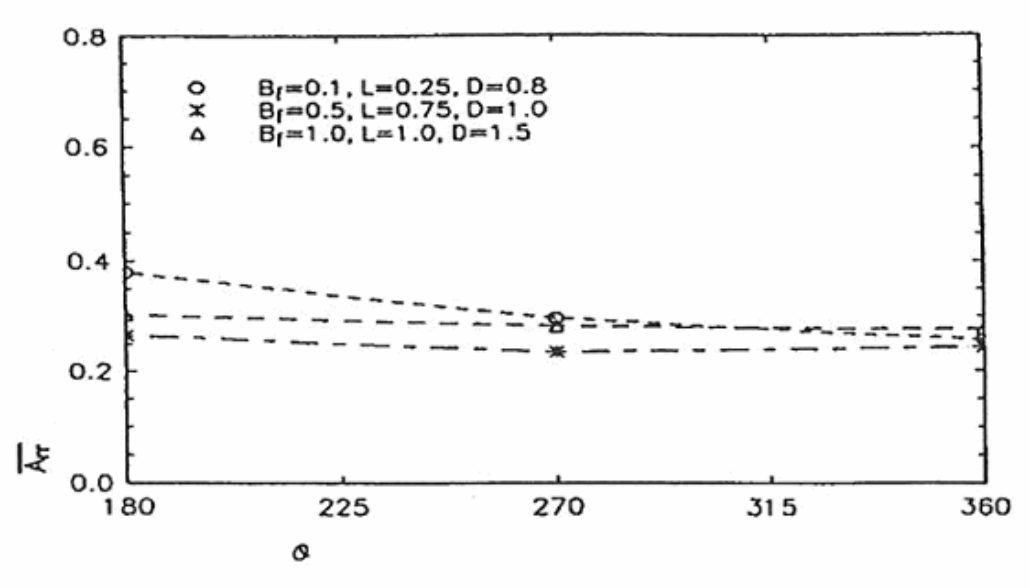
Hendeğin Açısal Uzunluğunun Etkisi

Bu kısımda, kaynak çevresindeki daire parçası hendekler tam daire hendeklerin yerine ele alınmıştır. Woods (1967, 1968) deneysel sonuçlarına dayanarak, daire parçası hendekler için perdelenen bölgeyi, hendek ve kaynak merkezlerinden geçen radyal çizgiye simetrik bölge olarak tanımladı. Bölge sınırı yatayda, kaynak merkezinden hendeğin her bir bitiş noktası ile 45° yapan noktalara uzanan iki radyal çizgidir (Şekil 8.29). Karşılaştırma için, ortalama genlik azalması oranı perdelenen bölge üzerinde hesaplanır.

$$\text{Ortalama Genlik Azalmasi Orani} = \overline{A}_r = 1/A \int_{\alpha=0}^{\theta-\pi/2} \int_{r_b=0}^{5L_r} A_{rr}\, dA \qquad \textbf{(8.31)}$$

Burada, A=perdelenen bölgenin alanı; r_b=hendeğin dış kenarından radyal uzaklıktır. α açısı hendeğin bir kenarından başlayarak ölçülür.

Şekil 8.30, 270º ve 180º hendekler için, tam daire 360º hendekler boyunca, B_f, D ve L nin farklı kombinasyonları için genlik azalması oranını göstermektedir. Daire parçası hendekler tam daire hendekler gibi perdeleme etkisine sahiptir. Woods'un (1968) test sonuçları da benzerdir.



Şekil 8.30: Daire Parçası Hendeğin Açısal Uzunluğunun (θ) Perdeleme Etkisi Üzerine Etkisi (Ahmad ve diğ., 1996)

Tasarım Formülünün Geliştirilmesi

Yoğun parametrik araştırmalara dayanarak, açık hendekler ile aktif yalıtım üzerinde etkili olan parametreler B_f, D, L ve ν_s olarak bulunmuştur. B_f, D ve L nin etkileri birbirine bağımıdır ve ayrı olarak değerlendirilemez. B_f=0.1-1.0 için sınır elemanlar metodunu kullanarak, $\bar{A}_{rr}$ için daha önce bahsedilen parametrelerin etkisi ile de, cebirsel bir ifade geliştirilmiştir. $\bar{A}_r$ de aşağıdaki gibi tanımlanır.

$$\bar{A}_r = I_{BLD} I_v \qquad \textbf{(8.32)}$$

Burada, $I_{BLD} = B_f$, D ve L nin etki faktörü ve I_v=Poisson oranı faktörüdür. Şekil 8.21 – 8.24 B_f, D ve L nin farklı kombinasyonları için 8.28 denklemini göstermektedir.

Etki faktörü I_{BLD}, polinomal formda r^2=0.874 korelasyon katsayısına sahip olmakla beraber, ν_s=0.4 de sınır elemanlar yöntemi sonuçlarının regresyon analizi ile elde edilmiştir. Tahminin standart hatası % 4.6, ve bütün regresyon katsayıları % 99 güvenlilik düzeyinde önemlidir (Önemlilik düzeyi=0.01).

$$I_{BLD} = C_0 + C_1\sqrt{B_f / L} + C_2 / \sqrt{L + D} + C_3 / \sqrt{L^2 + D^2} \quad \textbf{(8.33)}$$

$$C_0 = 5.114 \quad \textbf{(8.34)}$$

$$C_1 = 0.881 + \left(\frac{A}{D}\right)\left[-0.548 + 0.19\sqrt{\frac{B_f}{L}} + 0.046\left(\frac{A}{D}\right) - 0.073\left(\frac{A}{D}\right)\sqrt{\frac{B_f}{L}}\right] - \frac{1.308}{\sqrt{L + D}} \quad \textbf{8.35}$$

$$C_2 := -23.081 + 0.713\left(\frac{A}{D}\right) + \frac{25.937}{\sqrt{L + D}} - \frac{19.895}{\sqrt{L^2 + D^2}} \quad \textbf{(8.36)}$$

$$C_3 = 8.955 + \left(\frac{A}{D}\right)\left[0.549\sqrt{\frac{B_f}{L}} - 0.575\right] + \frac{4.018}{\sqrt{L^2 + D^2}} \quad \textbf{(8.37)}$$

Burada, $A = \pi B_f^2 =$ pabuç alanıdır. 8.29 denklemi içindeki her terimin fiziksel bir önemi vardır. Mesela, $\sqrt{B_f / L}$ Rayleigh dalgalarından dolayı yüzeyde yer değiştirme genliğindeki bozulmayı gösterir; $1/\sqrt{L + D}$ Rayleigh dalgalarının ilk yüzeydeki hareketi ve daha sonra hendek kenarlarına hareketi ile tabana ulaşması sonucu hendek tabanında genlik bozulmasını ifade eder; $1/\sqrt{L^2 + D^2}$ Rayleigh dalgalarının pabuçtan direkt hareketi sonucu hendek tabanındaki genlik bozulmasını gösterir.

Poisson oranı faktörü I_v, ν_s nin basit bir fonksiyonu olarak kabul edilebilir (Şekil 8.28); bu da $\overline{A}_r$ nin ,ν_s nin bütün Arallıklarında doğru tahminine öncülük eder.

$I_v = 1.0$; $\nu_s \leq 0.4$ için **(8.38a)**

$I_v = 1 + 13(\nu_s - 0.4)$; $\nu_s \geq 0.4$ **(8.38b)**

B_f nin 0.1 den küçük değerleri için, titreşim kaynağı bir nokta kaynak gibi davranır, ve perdeleme davranışı B_f =0.1 durumundaki gibidir. Sonuç olarak, 0.1 değerinden küçük B_f halinde pabuç için, genlik azalması 8.29 denkleminde B_f =0.1 durumu düşünülerek elde edilebilir (Ahmad ve diğ., 1996).

Tasarım Formülü Üzerinde Şekillerle Örnekler

Çeşitli problemlerde ortalama genlik azalmasının tahmini için, $\overline{A}_r$ için burada cebirsel bir ifade kullanılmıştır. Bunun doğruluğu sayısal sonuçlar ve yayınlanmış deneysel verilerin karşılaştırılması yapılarak kontrol edilmiştir.

Tablo 8.2: Sınır Elemanlar Sonuçları İle Tasarım Formülünün Karşılaştırılması

(Ahmad ve diğ., 1996)

G_s (MN/m^2) (1)	γ_s (kN/m^3) (2)	ν_s (3)	f (Hz) (4)	B_r (5)	L (6)	D (7)	$\overline{A}_r$ (BEM) (8)	$\overline{A}_r$ (Model) (9)
129.5	17.5	0.3	50	0.5	0.75	0.8	0.24	0.23
129.5	17.5	0.3	50	0.5	0.75	1.5	0.15	0.16
54.6	18.2	0.35	30	0.18	0.5	0.73	0.22	0.20
36.1	14.0	0.4	10	1.0	1.3	0.6	0.24	0.28
8.7	16.5	0.45	20	0.3	0.6	1.0	0.28	0.24

Tablo 8.3: Woods'un Saha Testi Verileri İle Tasarım Formülünün Karşılaştırılması

(Ahmad ve diğ., 1996)

Test number (1)	B_r (2)	L (3)	D (4)	W (5)	V (m/s) (6)	$H = h/L_r$ (7)	V_{s1}/V_{s2} (8)	$\overline{A}_{rr}$ (Woods) (9)	$\overline{A}_r$ (Model) (10)
AF7-300	0.121	0.514	0.363	0.182	126	2.9	0.87	0.37	0.41
AF5-300	0.121	0.514	0.726	0.182	126	2.9	0.87	0.17	0.22
AF6-300	0.121	0.514	1.452	0.182	126	2.9	0.87	0.15	0.12
AF5-250	0.100	0.422	0.596	0.149	128	2.4	0.88	0.20	0.31
AF5-350	0.152	0.644	0.91	0.228	117	3.64	0.8	0.26	0.16

Yarı Sonsuzda Dairesel Pabuçlar

Harmonik dik dalgalara maruz, ve normalleştirilmiş derinliği D, hendek kenarından normalleştirilmiş temiz uzaklığı L olan dairesel hendekle izole edilmiş bir dairesel yüzey pabucu dikkate alınsın. Tasarım formülü ile sınır elemanlar yöntemi sonuçları arasında Şekil 8.21 - 8.24 da bir karşılaştırma yapılmıştır, Tablo 8.2 de ek olarak test durumları verilmiştir. Bütün bu karşılaştırmalar şunu göstermektedir, cebirsel

ifadeler $\overline{A}_r$ ortalama genlik azalması tahmini için cebirsel ifadeler ile doğruluk derecesi yeterli tahminler yapılabilmektedir.

Tabakalı Zeminde Dairesel Pabuç

Tasarım formülü ile Woods'un saha testi verileri Tablo 8.3 de karşılaştırılmıştır. Saha testi verileri için ortalama genlik azalması oranı, Woods'un hendek kenarından $5\,L_r$ uzaklığa kadar uzanan bir bölge üzerinde radyal uzaklık ile değişen genlik azalması oranı için ortalama eğriler ile hesaplanır. Bu eğrilerden sadece altısı Woods (1967,1968) tarafından elde edilmiştir ve buradaki karşılaştırma bu altı eğriden beşi ile limitlidir. Woods'un altıncı test için eğrisi (AF5-200) hendek kenarından $4\,L_r$ uzaklığın üzerinde $\overline{A}_{rr}$ değerlerini verir ve burada karşılaştırma için kullanılmamıştır.

Tasarım formülü ile elde edilen tahminler saha verileri ile uyum içindedir. Gerçek zemin yarı sonsuzda homojen olmayan bir profile sahip olsa bile, tasarımdaki homojen yarı sonsuzda zemin kabulü ile yeterli tahminler elde edilmiştir. Açık hendekler ile iki boyutlu pasif yalıtım (Ahmad ve Al-Hussaini 1991; Al-Hussaini 1992) için tabaka etkisi üst tabakanın normalleştirilmiş tabaka derinliğine bağlıdır, $H = \text{tabaka derinligi}/\text{L}_\text{r}$. İki tabakanın kesme dalgası hızı oranı, V_{s1}/V_{s2} dir. Üst tabaka alt tabakadan daha sıkıdır ($V_{s1}/V_{s2}>1$), ya da eğer üst tabaka daha derinse (mesela; $H \geq 6$), ortalama genlik azalması oranına tabaka etkisi önemsiz derecede küçüktür ve ihmal edilebilir. Dahası, $H \geq 3$ normalleştirilmiş tabaka derinliği için sadece $V_{s1}/V_{s2} \geq 0.8$ durumuna haiz zemin profili için tabaka etkisi önemsizdir. Aktif yalıtım için tabaka etkisinin pasif yalıtımdaki gibi olduğunun kabulü ile, Woods'un saha testlerinde (Tablo 8.3) tabaka etkisi küçük olarak düşünülebilir.

Yarı Sonsuzda Dikdörtgen Pabuçlar

Mühendislik uygulamalarında, makina temelleri genellikle dikdörtgen şekle sahiptir. Böylece bu örnekte dikdörtgen makina temellerinin açık hendekler ile titreşim yalıtımı tartışılmıştır. Şekil 8.31 problemi göstermektedir. Önce, problemin gerçek geometrisi kati çözümü elde etmek için sınır elemanlar yöntemi ile elde edilmiştir. Daha sonra, dairesel hendeklerle izole edilmiş eşdeğer dairesel temelin genlik azalması oranının tahmini için bu basit model kullanılmıştır. $2a * 2b$ boyutunda

dikdörtgen pabucun eşdeğer yarıçapı, b_{eq}, dikdörtgen pabucun alanına sahip dairesel pabucun yarıçapı olarak hesaplanır.

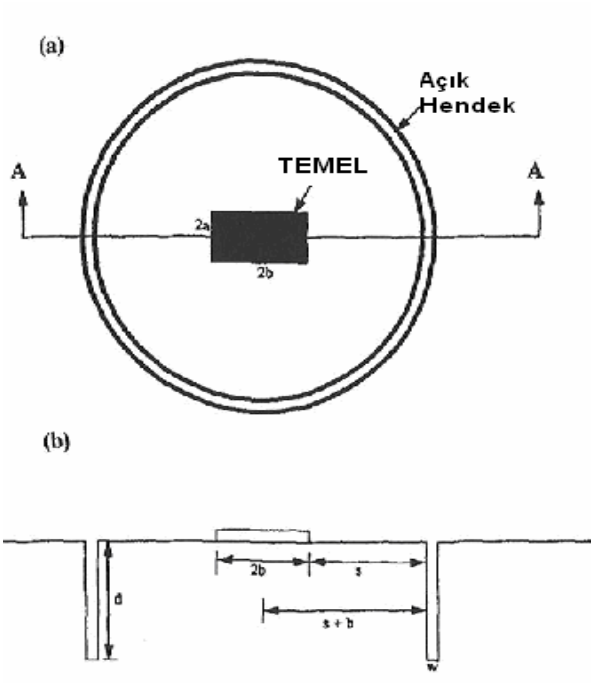
$$b_{eq} = \sqrt{4ab/\pi} \quad \textbf{(8.39)}$$

Sonuç olarak, eşdeğer dairesel pabucun kenarları ile hendek arasındaki temiz uzaklık,

$$l_{eq} = (s+b) - b_{eq} \quad \textbf{(8.40)}$$

dır.

Tasarım formülü (eşdeğer dairesel pabuç için) ile sınır elemanlar yöntemi sonuçlarının (gerçek dikdörtgen pabuç için) karşılaştırması Tablo 8.4 de verilmiştir. B_f <1.0 koşulunun sağlanmasıyla, tasarım daireden farklı şekillerde temel için genlik azalım oranının tahmininde yeterli sonuç sağlamaktadır (Ahmad ve diğ., 1996).



Şekil 8.31: Açık Hendekler İle Dairesel Temelin Aktif Yalıtımı

a) Plan b) A-A Kesiti (Ahmad ve diğ., 1996)

Tablo 8.4: Dairesel Temellerin Aktif Yalıtımı İçin Tasarım Formülü İle Sınır Elemanlar Yönteminin Karşılaştırması (Ahmad ve diğ., 1996)

a/L_r (1)	b/L_r (2)	s/L_r (3)	B_r (4)	L (5)	D (6)	$\bar{A}_r$ (BEM) (7)	$\bar{A}_r$ (Model) (8)
0.1	0.1	1.0	0.113	0.987	0.6	0.188	0.179
0.3	0.3	1.0	0.339	0.961	1.0	0.135	0.155
0.5	0.5	0.25	0.564	0.186	1.0	0.432	0.469
0.6	0.6	1.0	0.677	0.923	0.6	0.376	0.379
0.8	0.8	1.0	0.903	0.897	0.6	0.445	0.431
0.1	0.2	0.5	0.160	0.54	1.0	0.126	0.154
0.1	0.3	0.5	0.195	0.605	0.8	0.170	0.177
0.25	0.50	1.0	0.400	1.101	1.0	0.187	0.165
0.50	1.0	1.0	0.798	1.202	0.8	0.288	0.282
0.25	1.0	1.0	0.600	0.564	0.6	0.277	0.247

8.5.2 Dolgulu Hendek Bariyerler İle Makina Temellerinin Aktif Yalıtımı

Makina tarafından üretilen dengelenmemiş kuvvetler temelde önemli titreşimlere neden olur. Makina temeli tarafından üretilen ve zeminde yayılan dalgalar komşu yapı ve ekipmanı olumsuz etkileyebilir. Bu tarz olumsuzluklar makina ile makina temeli arasında yay ya da yay-sönümleyici gibi lokal izolatörler kullanarak kontrol edilebilir (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996). Bununla birlikte, böyle mekanik izolatörlerin eksik veya uygun olmayan tasarımdan ya da öngörülmeyen durumlardan kaynaklanan yetersiz olduğu durumlar da vardır. Bu gibi bir probleme, temel etrafına uygun bir dalga bariyeri kurulması (açık hendek veya katı duvar) çözümlerden biridir. Bu, kaynağı izole etme yöntemi aktif yalıtım olarak bilinir (Woods, 1968). Bariyerin boyutları yayılan yüzey dalgasının dalga boyu civarında olmalıdır ve sonuç olarak bu sadece orta ve yüksek frekansta titreşimler için makuldür.

Literatürde dalga bariyeri kullanarak titreşim yalıtımı ile ilgili bir çok çalışma vardır. Buna güzel bir örnek Ahmad ve Al-Hussaini (1991) ve Al-Hussaini (1992) nin çalışmasıdır. Dalga bariyeri ile titreşim yalıtımı aktif ve pasif yalıtım olmak üzere ikiye ayrılır. Şimdiye kadar ki bir çok çalışma pasif yalıtım ile sınırlı kalmıştır. Pasif yalıtımda bariyer uzağa yerleştirilmiştir ve problem iki boyutta düzlem şekil değiştirme problemidir. Aktif yalıtım üzerine çalışmalar problemin üç boyutlu doğasından dolayı sınırlıdır (Dasgupta 1986, Banerjee 1988, Ahmad 1996). Dahası,

bu çalışmaların birçoğu açık hendeklerle yalıtım ile ilgilidir. Diğer tarafta, bakım ve onarım kolaylığı ve yapım kolaylığı nedeniyle pratikte dolgulu hendek açık hendeklere göre daha çok tercih edilir. Dolgulu hendekler kullanarak temellerin aktif yalıtımı problemi Haupt (1978, 1981) tarafından yapılan çalışma dışında pek araştırılmamıştır. Haupt (1981) dalga bariyerleri kullanarak titreşim yalıtım üzerine bir dizi model laboratuar deneyleri yapmıştır. Testleri arasında iki çalışma kaynak yakınında katı bariyer kullanımı ile aktif yalıtım (vibratör) ile ilgilidir. Haupt (1978) gömülü duvarlarla aktif yalıtımı araştırmak için sonlu elemanlar yöntemini de kullanmıştır. Pasif yalıtım için, dalga bariyeri titreşim kaynağından uzaktır ve bariyere varan dalga treni (çoğunluğu yüzey dalgaları) düzlem dalgalar olarak düşünülebilir. Sonuçta pasif yalıtım problemi iki boyutlu bir problem olarak modellenir. Halbuki, sonlu boyuttaki dalga kaynağının üç doğrultuda dalga yaydığı aktif yalıtım halinde, problem iki boyutta çalışılamaz ve üç boyutta gerçekçi bir analiz gerekir. Dalga bariyeri kullanarak titreşim yalıtımı probleminin üç boyutlu analizi sınır elemanlar yöntemi ile yapılır. Bu yaklaşım Dapgusta (1986), Banerjee (1988), Ahmad (1996) tarafından birkaç açık hendek bariyeri analizi olarak yapılmıştır.

Dolgulu hendek bariyerlerin temellerin aktif yalıtımındaki performansı için sistematik bir araştırma ihtiyacı üzerine, sayısal bir araştırma yapılmış ve sonuçlar burada gösterilmiştir. Bu çalışmada, Banerjee ve Ahmad (1985), Ahmad (1986), ve Ahmad ve Manolis (1987) tarafından raporlanan sınır elemanlar yöntemi kodunun "BEST3D", geliştirilmiş versiyonu olan 3D sınır elemanlar yöntemi algoritması "BENAS" kullanılarak makina temellerinin dolgulu hendeklerle üç boyutlu titreşim yalıtımı analizi yapılmıştır. Sınır elmanlar yöntemi formülasyonu detayları ve sayısal integrasyon şemaları daha önceki yayınlarda mevcuttur. Zemin homojen, izotropik, viskoelastik, boşluklu ve harmonik dik dalgalara maruz rijit dairesel yüzey temeli de titreşim kaynağı olarak modellenmiştir. Dalga bariyeri temel etrafında beton ya da zemin-bentonit (zemin ve bentonit sıvısının karışımı) ile doldurulmuş halka şeklinde hendek olarak modellenmiştir. Dalga bariyeri problemlerinin analizi için kullanılacak bu mevcut sınır elemanlar yöntemi kodunun doğruluğu ve gerçekçiliği Ahmad (1996) tarafından diğer çalışmaların karşılaştırılması ile; açık hendekler ile aktif yalıtım üzerine yapılan çalışmalar ile Woods (1968) un deney sonuçlarının karşılaştırılması; kurulmuştur. Dolgulu hendek bariyerler ile aktif yalıtım problemi

için sınır elemanlar yöntemi sonuçlarının onayı, verilen geometrik ve malzeme parametrelerinin kontrolü, çok yumuşak malzeme ile doldurulmuş hendek bariyerler için sınır elemanlar yöntemi sonucu ile yapılmıştır.

Yoğun parametrik sonuçlar hendek derinliği ve genişliğinin geniş bir aralığı, hendeğin yeri, temel boyutları, kesme dalgası hızı oranı, bariyer malzemesi ile zemin arasındaki yoğunluk oranı için boyutsuz grafikler formunda gösterilmiştir. Bu makalede gösterilen sonuçlar dolgulu hendekler ile aktif yalıtım mekanizmasını daha iyi anlamak içindir. Dahası, önemli bazı boyutsuz parametreler tanıtılmış ve bir tasarım rehberi verilmiştir.

Problemin Tanınması

Şekil 8.32, viskoelastik yarı sonsuz zemin üzerine oturan, b_f yarıçapında, $P_0 e^{iwt}$ harmonik dik kuvvetine maruz rijit dairesel pabucun söz konusu olduğu problem şemasını göstermektedir. d derinliğinde, w genişliğinde halka şeklinde ve dolgulu hendekler kaynaktan merkezden merkeze $l^{'}$ uzaklığına yerleştirilmiştir. Hendek ile titreşim yalıtımı yüzey (Rayleigh) dalgalarının perdelenmesi ile daha önce başarıldığından, gerçek boyutlar d, w, b_f, $l^{'}$ Rayleigh dalgası uzunluğu L_r a göre normalleştirilerek D, W, B_f, $L^{'}$ elde edilmiştir. Problemin aksimetrik özelliğinden (Şekil 8.32 (b)) dolayı, bütün radyal çizgiler boyunca genlik azalması hemen hemen aynı olmalıdır. Böylece, halka şeklinde bir hendek ile izole edilmiş dairesel pabuçlar için genlik azalması oranı radyal bir çizgi boyunca hesaplanır ve A_{rr} ile gösterilir.

$$A_{rr} = \delta_0 / \delta_b \qquad \textbf{(8.41)}$$

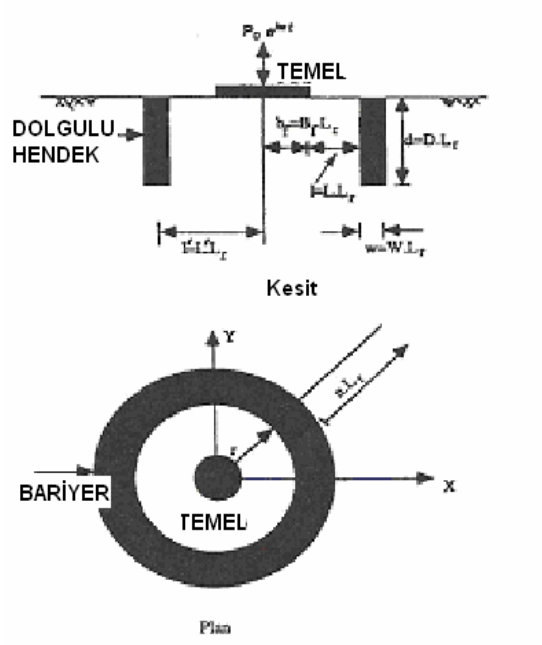
Burada, δ_0=zemin yüzeyinin bariyer ile düşey yer değiştirmesi; δ_b=zemin yüzeyinin bariyersiz düşey yer değiştirme genliğidir. A_{rr} nin bir ortalama değeri radyal bir çizgi boyunca hesaplanır ve aşağıdaki gibi verilir.

$$\overline{A}_{rr} = \frac{1}{nL_r} \int_{r_b=0}^{nL_r} A_{rr} dr_b \qquad \textbf{(8.42)}$$

Burada, $r_b = r - l^{'}$=bariyerin dış kenarından radyal uzaklık; ve nL_r=ortalama A_{rr} değerinin hesabı için düşünülen bölge büyüklüğüdür.

Sayısal Çevrimler

Bir parçalar bütünü yaklaşımı optimum parça bütünü konfigürasyonunun seçilmesi için yapılmıştır. Problemin aksimetrik doğasından dolayı (Şekil 8.32 (b)), sınır (yüzey) elemanların radyal uzunluğu sayısal modelleme kriterine esas teşkil etmektedir. Dahası, yüzey diskretizasyonu için kuadratik elemanlar kullanıldığından, elemanların radyal uzunluğunun, temel çözümün (dinamik Kelvin problemi için) dalga formu ile hesaplanabilir olması için, Rayleigh dalgası uzunluğunun; L_r; bir yarısından küçük olmalıdır. Radyal uzunluğu 0.25 L_r, 0.4 L_r ve 0.6 L_r a eşit elemanların oluşturduğu parça bütünleri bir beton bariyer kullanarak aktif yalıtım probleminin analizi için kullanılmışlardır. Parça bütünü hassaslaştıkça sonuçların yakınsaklığı artar. Yakınsaklık çalışması ile ilgili detaylar Al-Hussaini'nin (1992) çalışmalarında bulunabilir. Bu çalışmanın sonuçlarına dayalı olarak, radyal uzunluğu en az 0.4 L_r olan elemanlardan (temelden uzaklığı $5B$ olan elemanlar için 0.25 L_r) oluşan parça bütünü parametrik araştırma için tipik parça bütünü olarak seçilmiştir.



Şekil 8.32: Dolgulu Hendeklerle Aktif Yalıtım a) Kesit b) Plan

(Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

Parametrik Çalışma

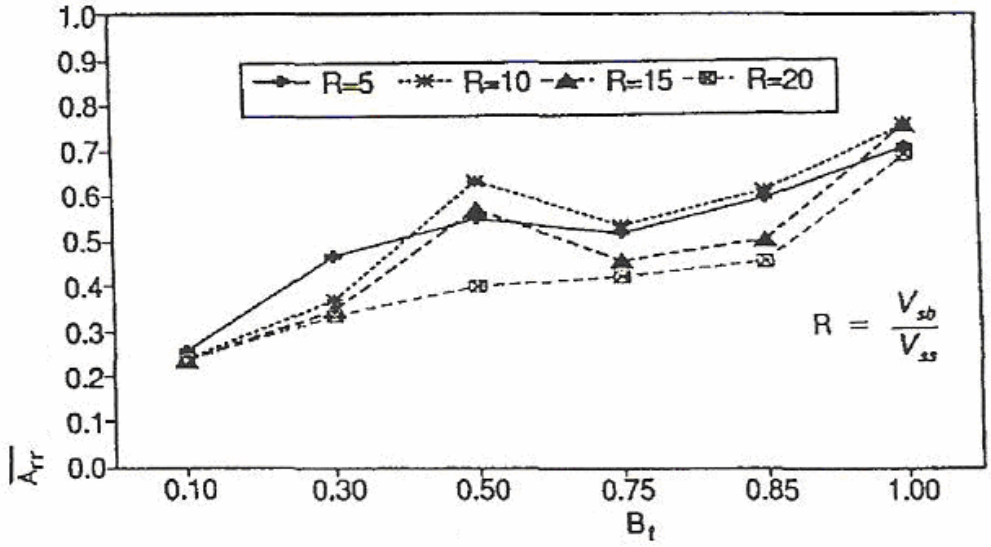
Homojen zeminin malzeme özellikleri (mesela, kayma modülü G_s ve birim ağırlık γ_s) ve frekans, f, Rayleigh dalga uzunluğu daima birlik olacak şekilde seçilmiştir. Zeminin sönüm oranı, β_s, %5 olarak alınmıştır ve mevcut sınır eleman formülasyonu (Ahmad ve Al-Hussaini 1991) içinde kompleks kayma modülü formunda, $G_s^* = G_s(1+i\beta_s)$, vardır. Aksi belirtilmediği takdirde, zemin için Poisson oranı $\upsilon_s = 0.4$, normalleştirilmiş temel yarıçapı $B_f = 0.5$, normalleştirilmiş bariyer genişliği $W = 0.3$ ve yoğunluk oranı beton bariyer için $\rho_b / \rho_s = 1.4$ ve bentonit bariyer (zemin ve bentonit sıvısının karışımı ile doldurulmuş hendek) için $\rho_b / \rho_s = 1.0$ olarak alınmıştır. Titreşim kaynağı periyodik dik titreşimlere maruz rijit dairesel yüzey pabucu olarak modellenmiştir. Hendeğin dış kenarından $5L_r$ uzaklık üzerinde hesaplanan ortalama genlik azalması oranı $\overline{A}_{rr}$ bariyerin perdeleme etkinliğinin güzel bir representasyonu olarak bulunmuştur. Hendekten $5L_r$, $10L_r$ ve $15L_r$ uzaklığa uzanan perdeleme bölgesi üzerinde $\overline{A}_{rr}$ değerleri bir dizi test sonucu hesaplanmış ve $5L_r$ bölgesindeki $\overline{A}_{rr}$ değerinin $10L_r$ ve $15L_r$ bölgesindeki $\overline{A}_{rr}$ değerlerine yakın ya da biraz daha yüksek olduğu bulunmuştur. Dahası, titreşen dairesel temelden dolayı zeminin yer değiştirme genlikleri uzaklıkla hızlı bir biçimde bozulmuştur ve pabucun kenarından $5L_r$, $6L_r$ uzaklık sonra genlik değerleri pabuç kenarındakilere göre çok küçüktür. Perdeleme ihtiyacı duyulan kritik bölge $5L_r$ uzaklıktadır.

Beton Bariyer

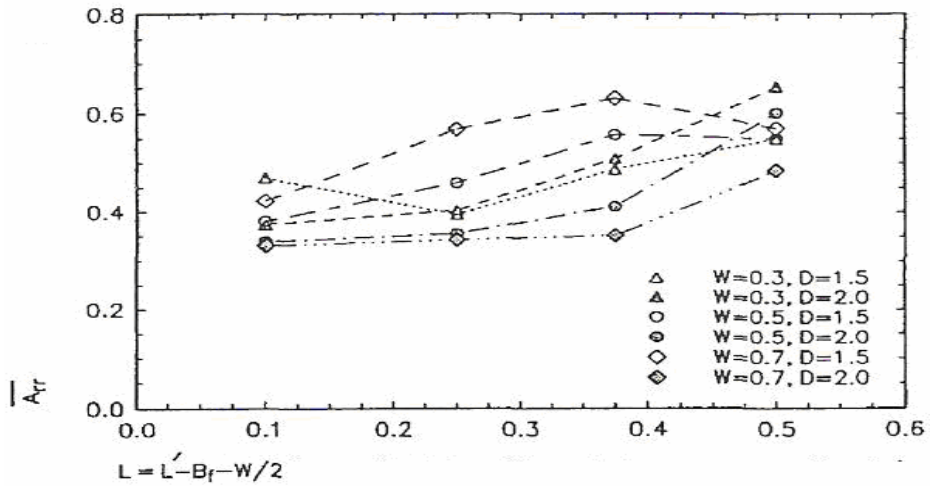
Pabuç Boyutunun Etkisi

Beton bariyerin perdeleme etkinliği üzerine titreşen temelin normalleştirilmiş yarıçapının etkisi $, B_f (= b_f / L_r)$, şu geometrik ve malzeme parametreleri ile çalışılmıştır: D=1.0-1.5; W=0.3; L=0.1-0.75; ρ_{sb} / ρ_{ss}=1.4; V_{sb} / V_{ss}=5, 10, 15, 20 (V_{sb}= bariyer malzemesinde kesme dalgası hızı, ve V_{ss}= zeminde kesme dalgası hızı).

Şekil 8.33, V_{sb}/V_{ss}=5, 10, 15, 20 ile (W = 0.3, D=1, $L = B_f$) beton bariyer için normalleştirilmiş yarıçap, B_f, ile ortalama genlik azalması oranı $\overline{A}_{rr}$ ile değişimini göstermektedir. Perdeleme etkinliği genelde temel boyutundaki artış ile azalır. B_f nin daha yüksek değerleri için, dalga bariyeri temel merkezinden daha uzaktadır. Bu hendek altında ilerleyen elastik dalga hacminde artışa olanak verir ve daha yüksek $\overline{A}_{rr}$ değerleri şeklinde sonuç verir (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996). Bundan başka, B_f=0.5 için $\overline{A}_{rr}$ değeri B_f=0.1-1.0 aralığı üzerinde ortalama $\overline{A}_{rr}$ değerini göstereceği Şekil 8.33 den anlaşılmaktadır.

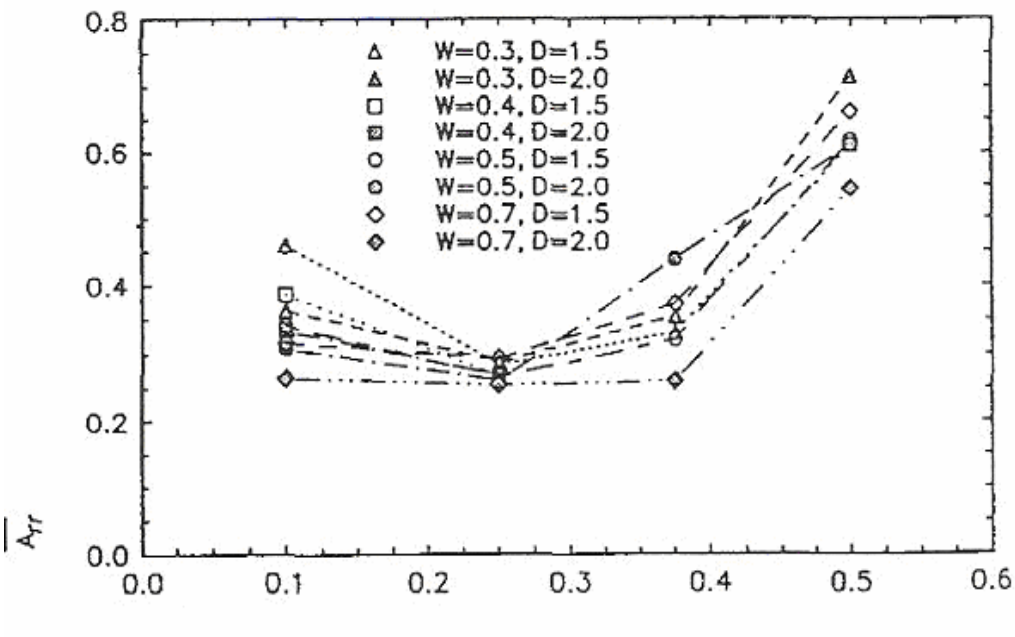


Şekil 8.33: (W = 0.3, D=1, $L = B_f$) ile Beton Bariyer İçin Genlik azalması Üzerinde Normalleştirilmiş Pabuç Yarıçapı B_f nin Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)



Şekil 8.34: (V_{sb} / V_{ss} =5) ile Beton Bariyer İçin Kaynak İle Dolgulu Hendek Arasında Normalleştirilmiş Temiz Uzaklık L nin Etkisi

(Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)



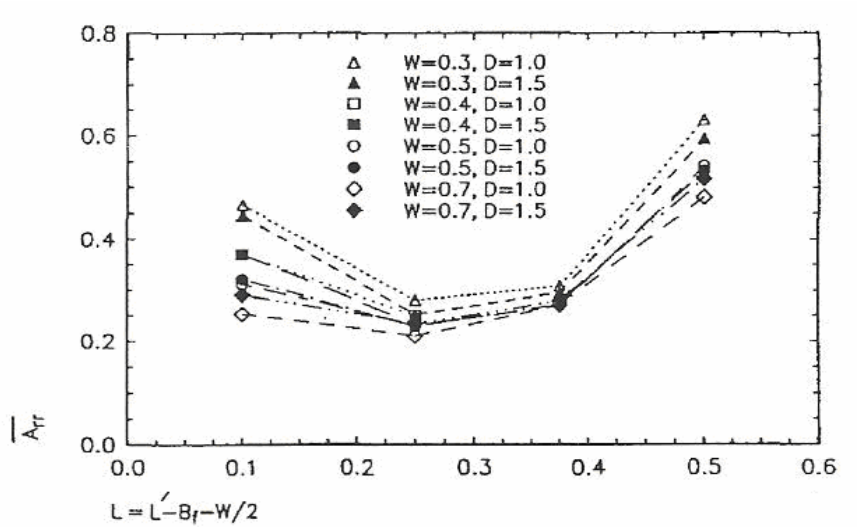
Şekil 8.35: (V_{sb} / V_{ss} =7.5) ile Beton Bariyer İçin Kaynak İle Dolgulu Hendek Arasında Normalleştirilmiş Temiz Uzaklık L nin Etkisi

(Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

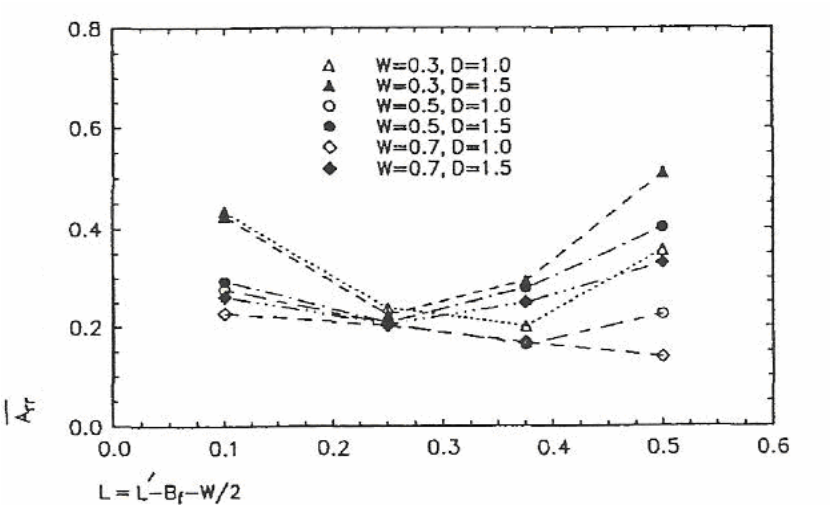
Bariyer Yerinin Etkisi

Aktif yalıtımda beton bariyerin perdeleme etkinliği Şekil 8.34 – 8.37 dan görüldüğü gibi büyük oranda normalleştirilmiş temiz uzaklığa $L = L^{'} - B_f - W/2$ bağlıdır. Bu şekiller V_{sb}/V_{ss} = 5, 7.5, 10, 20 için çeşitli beton bariyerler için ortalama genlik azalmasını, $\overline{A}_{rr}$, göstermektedir. V_{sb}/V_{ss}=35 için $\overline{A}_{rr}$ değerleri hesaplanmış ve V_{sb}/V_{ss}=20 için $\overline{A}_{rr}$ değerlerine yakın bulunmuştur. Dahası, $1.0 \le L \le 0.5$ ile beton bariyerler ile yer değiştirme genliğindeki azalmalar küçük bulunmuştur ($\overline{A}_{rr}$ değerlerinde artış olarak sonuçlanır). Bu durum Şekil 8.34 – 8.37 da gösterilmiştir. Bu şekillerin incelenmesi ile, maksimum perdeleme etkinliği için optimum L aralığı tanımlanır. Optimum L aralığı $L_{opt} = L_{\min} - 0.375$ olarak tanımlanır. Burada $L_{\min}$ normalleştirilmiş bariyer genişliği W nun bir fonksiyonudur ve W=0.3, 0.4, 0.5 ve 0.7 için 0.2, 0.175, 0.15 ve 0.10 değerlerini alır. Optimum aralıkta $\overline{A}_{rr}$ değeri küçük bazı değişikliklere sahiptir, bununla birlikte pratikte bu ihmal edilebilir. Gereksiz hesaplamalardan kurtulmak için, diğer parametrelerin etkisi L_{opt} aralığında bir değere sahip normalleştirilmiş temiz uzaklık L ile araştırılacaktır.

Hendek yerinin ortalama genlik azalması üzerindeki etkisi dalga yayılımının kompleks doğasından dolayı aktif yalıtım problemi içine katılır. Dalga yayılımı döngüsü dalgaların mod değişimi gibi yansıma, refraksiyon, difraksiyon, interaksiyon olaylarına da haizdir (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996).



Şekil 8.36: (V_{sb}/V_{ss}=10) ile Beton Bariyer İçin Kaynak İle Dolgulu Hendek Arasında Normalleştirilmiş Temiz Uzaklık L nin Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

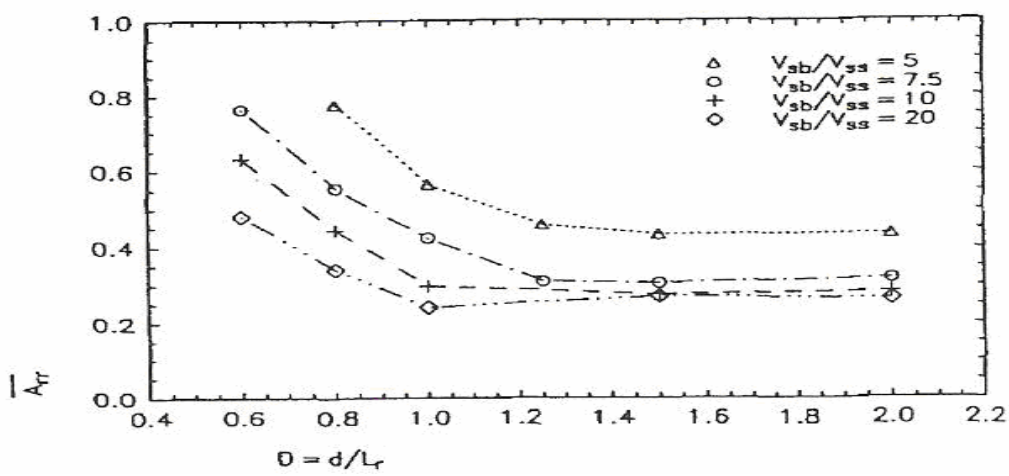


Şekil 8.37: (V_{sb}/V_{ss}=20) ile Beton Bariyer İçin Kaynak İle Dolgulu Hendek Arasında Normalleştirilmiş Temiz Uzaklık L nin Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

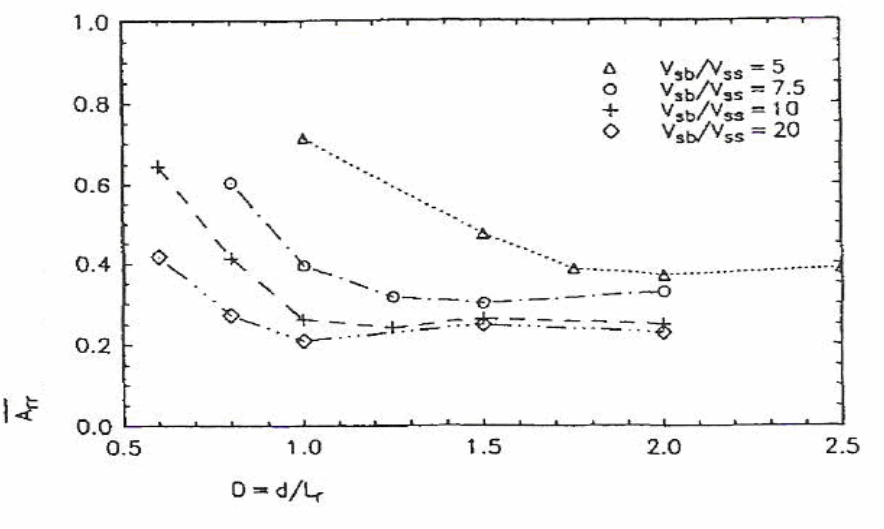
Bariyer Derinliğinin Etkisi

Optimum L aralığında ortalama genlik azalması oranı normalleştirilmiş hendek derinliği D nin bir fonksiyonu olarak W=0.3 ve W=0.5 için gösterilmiştir. D nin etkisi genel olarak kesme dalgası hızına, V_{sb}/V_{ss}, bağlıdır ve daha az olarak normalleştirilmiş bariyer genişliğine, W, bağlıdır. Normalleştirilmiş hendek derinliğinin optimum değerine kadar, D_{opt}, derinlikteki artış perdeleme etkinliğinde dereceli bir artışa neden olur. D_{opt} dan daha yüksek D değerleri için, genlik azalması daha fazla ya da eksik üniform kalır. Optimum derinlik, D_{opt}, V_{sb}/V_{ss} nin bir fonksiyonu gibi gözükmesiyle beraber, V_{sb}/V_{ss} küçük olduğu zaman, mesela V_{sb}/V_{ss}=5, W ya bağlıdır. D_{opt} ile V_{sb}/V_{ss} arasındaki ilişki Şekil 8.40 da gösterilmiştir. Daha yüksek V_{sb}/V_{ss} değerleri için (mesela, yumuşak bir zeminde beton bariyer), sığ bir bariyer (D=1.0) maksimum perdeleme için yeterli olabilir.

Hesaplamaları azaltmak için, geriye kalan parametrelerin etkisi en az D_{opt} değeri kadar normalleştirilmiş derinlik, D, kullanılarak araştırılacaktır.

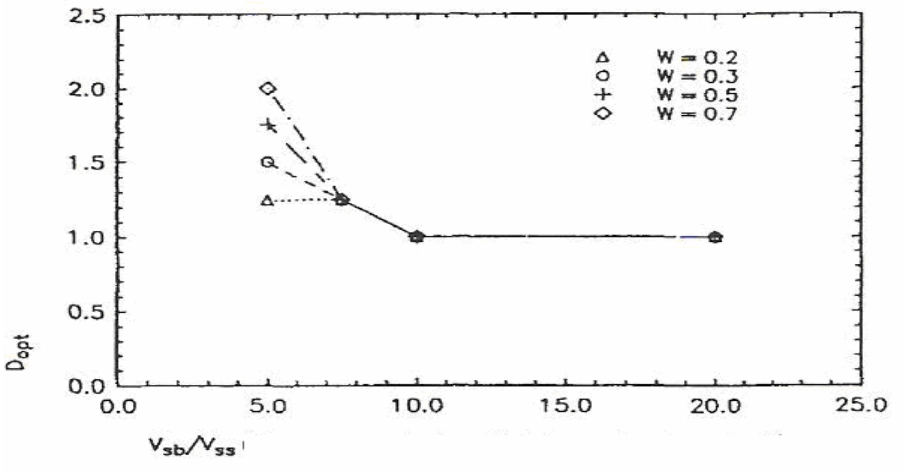


Şekil 8.38: Optimum Aralıktaki L ve W=0.3 İle Beton Bariyer İçin Normalleştirilmiş Hendek Derinliğinin (D) Genlik Azalmasına Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)



Şekil 8.39: Optimum Aralıktaki L ve W=0.5 İle Beton Bariyer İçin Normalleştirilmiş Hendek Derinliğinin (D) Genlik Azalmasına Etkisi

(Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

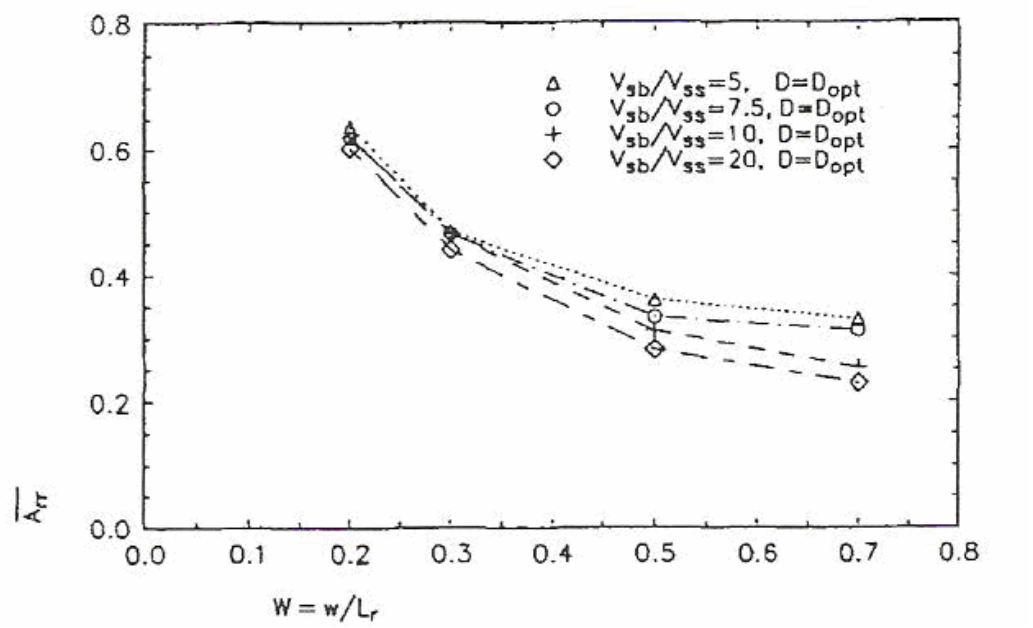


Şekil 8.40: Optimum Aralıktaki L İle Beton Bariyer İçin W ve V_{sb}/V_{ss} nin Bir Fonksiyonu Olarak Optimum Bariyer Derinliği

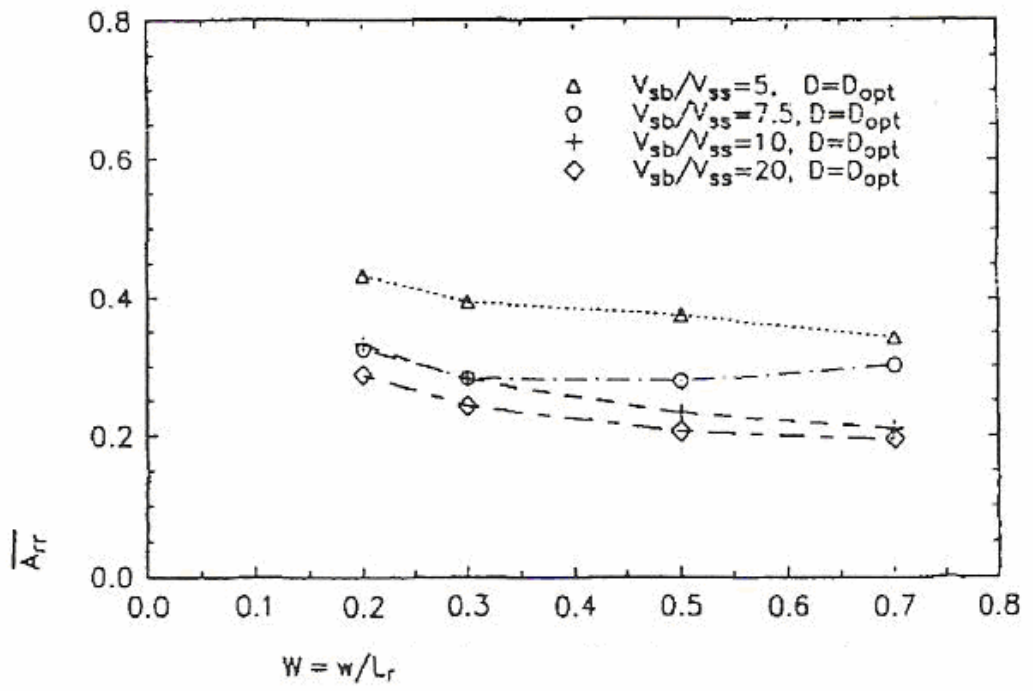
(Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

Bariyer Genişliğinin Etkisi

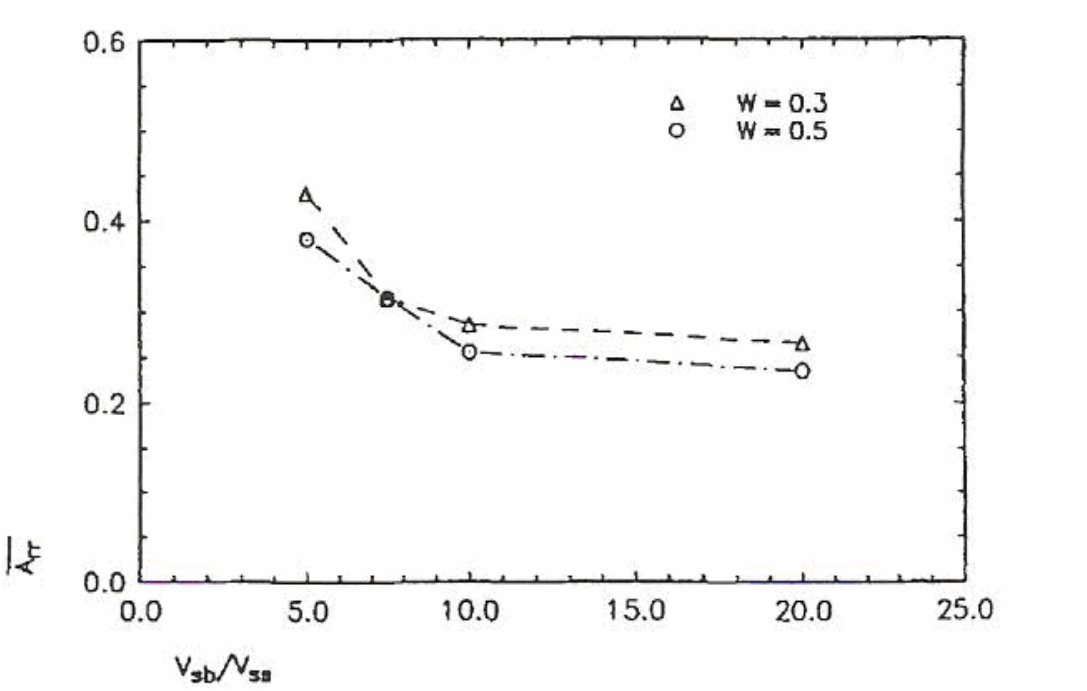
Normalleştirilmiş bariyer genişliğinin önemi Şekil 8.34 – 8.37 ve Şekil 8.40 dan görülebilir. $D = D_{opt}$ ve L=0.1 ve 0.25 için W nin 0.2 den 0.7 ye kadar değişen değerleri ile ortalama genlik azalması oranları, $\overline{A}_{rr}$, Şekil 8.41 ve Şekil 8.42 de gösterilmiştir. Şekil 8.41 ve Şekil 8.42 arasında bir karşılaştırma yapılırsa, normalleştirilmiş bariyer genişliğinin etkisinin büyük oranda bariyer yeri parametrelerine, L, bağlı olduğu görülür. W nun etkisi L=0.1 gibi kaynağa yakın yerleştirilen bariyerler için çok önemlidir. Halbuki, kaynaktan uzak yerleştirilen bariyerler için, mesela L=0.25, bu etki daha azdır. Genelde, perdeleme etkinliği W arttıkça artar. W=0.5 den büyük ise, W daki artışın genlik azalması oranına etkisi küçüktür (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996).



Şekil 8.41: L=0.1 İle Beton Bariyer İçin Normalleştirilmiş Hendek Genişliğinin (W) Genlik Azalmasına Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)



Şekil 8.42: L=0.25 İle Beton Bariyer İçin Normalleştirilmiş Hendek Genişliğinin (W) Genlik Azalmasına Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)



Şekil 8.43: Optimum Aralıkta L ve $D \geq D_{opt}$ İle Beton Bariyer İçin Kayma Dalgası Hızı Oranının Genlik Azalmasına Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

Kayma Dalgası Hızı Oranının Etkisi

Bariyer ve zeminin kayma dalgası hızlarının oranının ortalama genlik azalması oranı üzerine etkisi Şekil 8.38 ve 8.39 de gösterilmiştir. Kayma dalgası hızı oranı 5 ile 20 arasında değişmektedir. Şekil 8.34 de gösterildiği gibi, V_{sb}/V_{ss} de, $D \geq 1.0$ ile bariyerler optimum L aralığında bile 0.5 den daha büyük $\bar{A}_{rr}$ değerlerine sebep olurlar. Böylece, V_{sb}/V_{ss} değerlerinin 5.0 dan daha büyük ve tercihen 7.5 olması tavsiye edilir. 5.0 dan daha küçük V_{sb}/V_{ss} değerleri düşünülmez, çünkü daha yüksek değerde $\bar{A}_{rr}$ değerleri ile karşılaşılır. V_{sb}/V_{ss}=35 için $\bar{A}_{rr}$ eğrileri (Al-Hussaini 1992) V_{sb}/V_{ss}=20 durumundaki $\bar{A}_{rr}$ değerleri ile hemen hemen aynıdır. Sonuç olarak, V_{sb}/V_{ss}=20 de $\bar{A}_{rr}$ değerleri $V_{sb}/V_{ss} \geq 20$ için $\bar{A}_{rr}$ değerlerinin tahmini için kullanılabilir. Şekil 8.43 de, $D \geq D_{opt}$ ve $L = L_{opt}$ ile bariyerler için ortalama genlik azalması oranı ve kayma dalgası hızı oranı ilişkisi gösterilmiştir. V_{sb}/V_{ss}=10

değerine kadar V_{sb}/V_{ss} oranındaki artış bariyerin perdeleme etkinliğine olumlu etki yapar. Halbuki, $V_{sb}/V_{ss} \geq 10$ için, V_{sb}/V_{ss} deki artıştan kaynaklanan perdeleme etkinliğindeki artış göreceli olarak küçüktür (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996).

Yoğunluk Oranının Etkisi

Bariyer ve zeminin kütle yoğunluklarının oranının ortalama genlik azalmasına etkisi, ρ_b/ρ_s, L=0.25 ve 0.375 gibi bir bariyer uzaklığı için çalışılmıştır. Kayma dalgası hızı oranının etkisini elemine etmek için, kayma dalgası hızı oranı çalışma boyunca sabit tutulmuştur. Yoğunluk oranı 1.0 dan 2.0 a kadar değiştirilmiştir. Sonuçlar (Al-Hussaini 1992), pratiklik için yoğunluk oranının genlik azalması oranına etkisi önemsiz sayılır.

Zeminin Poisson Oranının Etkisi

L=0.25 ve 0.375 için zeminin Poisson oranının beton bariyerin (W=0.3) perdeleme etkinliğine etkisi araştırılmıştır. Şekil 8.44, L=0.25 için sonuçları göstermektedir. 0.25-0.4 aralığındaki Poisson oranı için, genlik azalması oranındaki değişme çok küçüktür. Bununla beraber, $\gamma_s \geq 0.4$ için bir çok durumda genlik azalması oranında artış gözlenir.

Betonun Sönüm Malzemesinin Etkisi

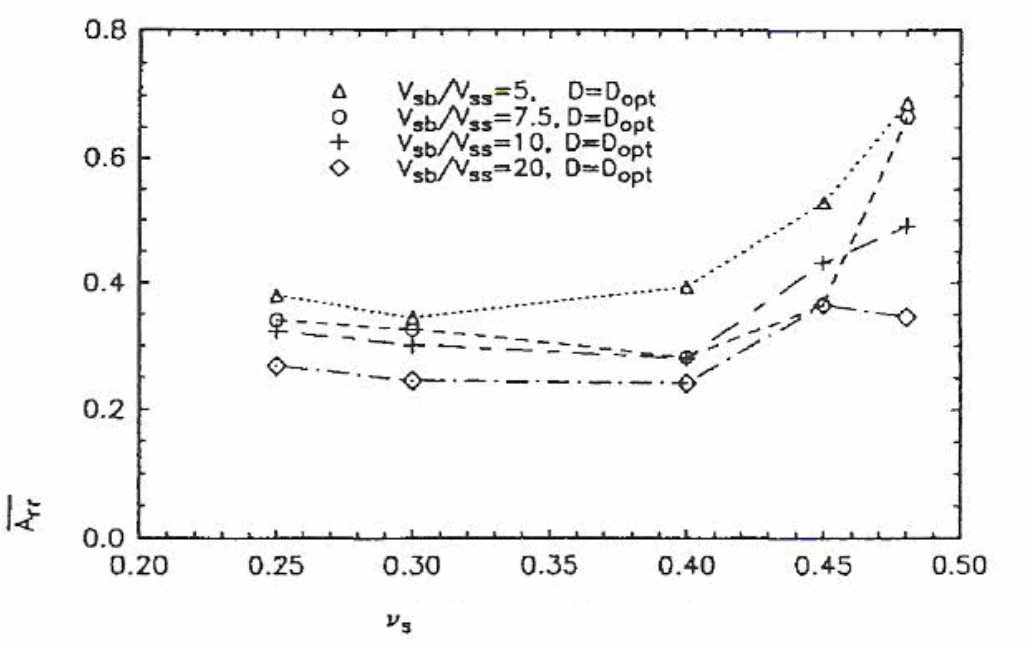
L=0.25 ve 0.375 için betonun sönüm malzemesinin beton bariyerin (W=0.3) perdeleme etkinliğine etkisi araştırılmıştır. Sönüm oranı 0.0 dan %8 e kadar değiştirilmiştir. Sonuçlar (Al-Hussaini 1992) bariyer malzemesinin sönüm oranındaki artışın perdeleme etkinliğine olumlu etki ettiğini (%10 a kadar) göstermektedir. Bununla birlikte, bu olumlu etki V_{sb}/V_{ss} deki artışla azalır ve pratikte $V_{sb}/V_{ss} \geq 10$ için ihmal edilir.

Bariyerin Açısal Uzunluğunun Etkisi

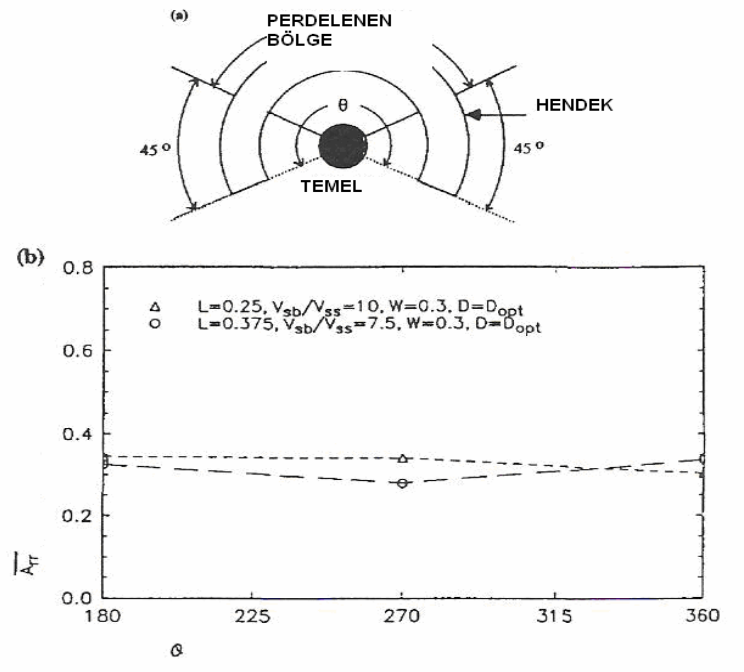
Tam daire bariyerler yerine kaynak etrafında daire parçası bariyerlerin etkisi araştırılmıştır. Daire parçası bir hendek için perdelenen bölge (Woods 1968) Şekil 8.45(a) daki gibidir.

Şekil 8.45(b) L, V_{sb}/V_{ss}, W nun iki farklı kombinasyonu için $\theta = 270°,180°$ ve tam daire için perdelenen bölgede ortalama genlik azalması oranını göstermektedir. Şu görülmektedir ki, daire parçası hendekler de tam daire hendekler gibi etki yapar.

Woods'un (1968) yaptığı açık hendekler için yaptığı saha testleri de benzer sonuçları göstermektedir.



Şekil 8.44: L=0.25 ve 0.375 İçin Beton Bariyer İle, Zeminin Poisson Oranının Genlik Azalmasına Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

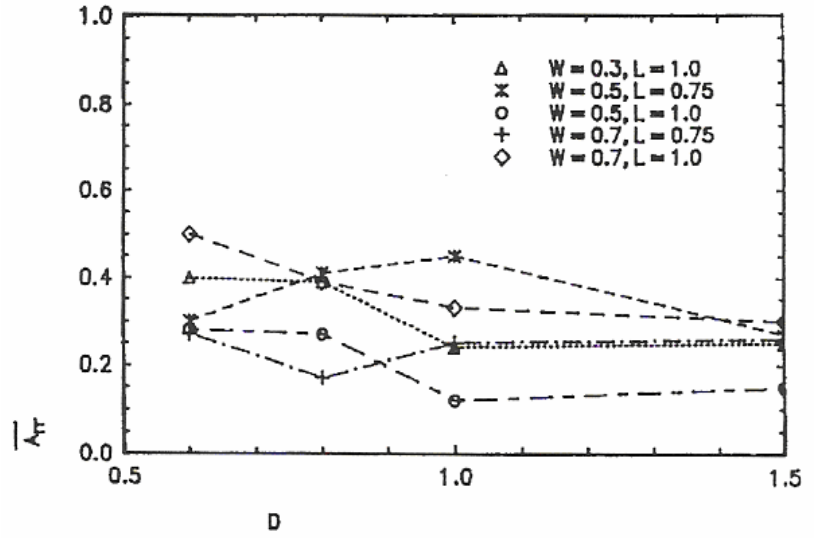


Şekil 8.45: Daire Parçası Beton Bariyerler ve Perdeleme Bölgesi a) Plan b) Açısal Uzunluğun Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

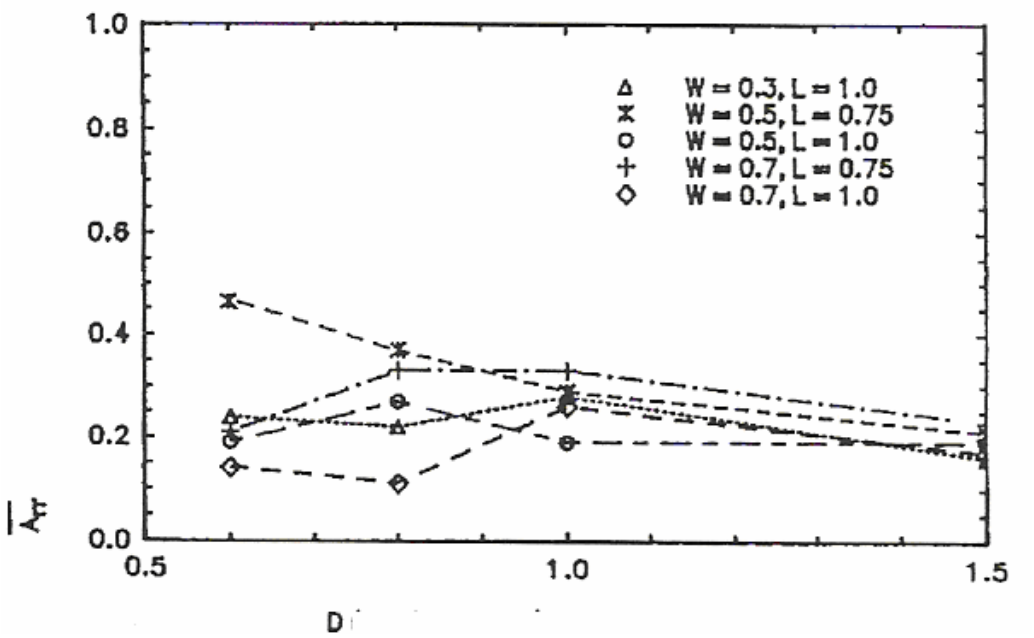
Zemin – Bentonit Bariyer

Bariyer ve zeminin kayma dalgası hızlarının oranı (bu iki malzeme arasındaki göreceli rijitlik) dolgulu hendek bariyerlerin perdeleme etkinliğini yöneten en önemli parametrelerden biridir. V_{sb}/V_{ss} nin $\bar{A}_{rr}$ ye etkisi, V_{sb}/V_{ss} oranının 0.05 ile 0.5 arlığındaki değerleri için, değişken boyutlar ve bariyer yerleri için çalışıldı. Sonuçlar (Al-Hussaini 1992), 0.3, 0.4, 0.5 V_{sb}/V_{ss} değerleri için, zemin-bentonit bariyerlerin perdeleme etkinliğinin zayıf olduğunu ve 0.5 den büyük $\bar{A}_{rr}$ değerlerine neden olduğunu göstermektedir. Sonuç olarak, etkili bir perdeleme için bariyerin V_{sb}/V_{ss} oranı 0.3 den az ve tercihen 0.2 ya da daha az olmalıdır. Bundan sonra, $V_{sb}/V_{ss} \leq 0.2$ durumu düşünülmüştür. V_{sb}/V_{ss} nin böyle küçük değerleri düzgün tasarlanmış zemin-bentonit karışımı kullanarak elde edilebilir.

Şekil 8.46, 8.47 ve 8.48; 0.2, 0.1 ve 0.05 kayma dalgası hızı oranları için $\bar{A}_{rr}$ değişimlerini göstermektedir. Bu şekiller, bariyer malzemesinin yumuşaklaştıkça perdeleme etkinliğinin arttığını gösterir. Dahası, dolgu malzemesinin zemine göre çok yumuşak olduğu durumda ($V_{sb}/V_{ss} \leq 0.05$) dolgulu hendek bariyerin perdeleme etkinliği açık hendek bariyer gibi olur.



Şekil 8.46: V_{sb}/V_{ss} =0.2 Olan Zemin-Bentonit Bariyer Durumda Normalleştirilmiş Hendek Derinliğinin, D, Genlik Azalmasına Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)



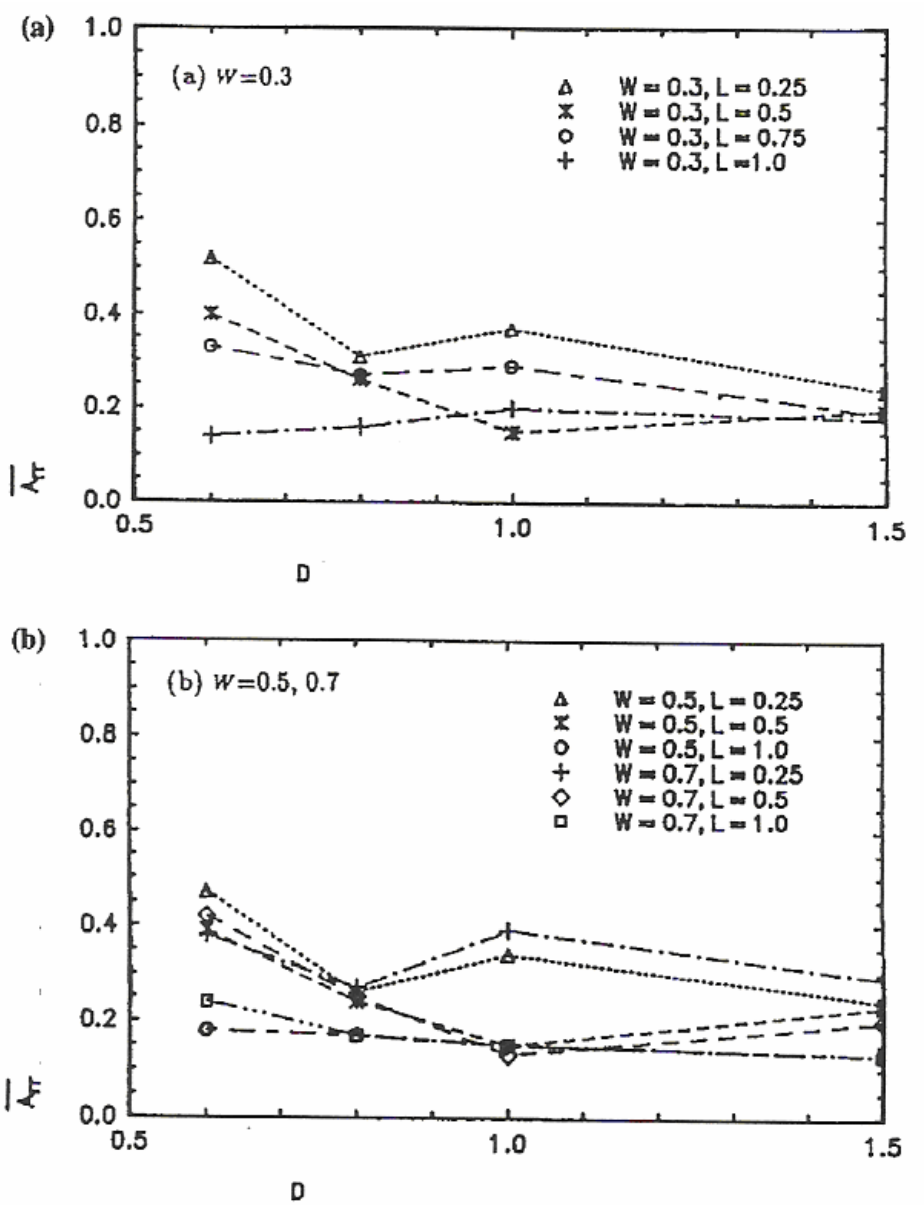
Şekil 8.47: V_{sb}/V_{ss}=0.1 Olan Zemin-Bentonit Bariyer Durumda Normalleştirilmiş Hendek Derinliğinin, D, Genlik Azalmasına Etkisi

(Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

Bariyer Yerinin Etkisi

Kaynak ile bariyer arasında normalleştirilmiş temiz uzaklığın zemin-bentonit bariyerin perdeleme etkinliğine etkisi L=0.25, 0.5, 0.75 ve 1.0 durumları için araştırılmıştır. $V_{sb}/V_{ss} \geq 0.1$ olduğu zaman L nin perdeleme etkinliğine etkisi önemlidir (Şekil 8.46 ve 8.47). Dahası, etkili bir perdeleme için ($\overline{A}_{rr} \leq 0.5$), bariyer yerinin V_{sb}/V_{ss} ve W nun bir fonksiyonu olduğu bulunmuştur. V_{sb}/V_{ss}=0.1 ya da 0.2 için, W=0.3 olan bir bariyer yalnızca L=1.0 olduğu zaman etkilidir; halbuki eğer W=0.5 ya da 0.7 ise, bariyer L=0.5-1.0 olduğu zaman etkilidir. V_{sb}/V_{ss}=0.05 için, bütün bariyer yerleri (L=0.25 den 1.0 a kadar) efektiftir. Şekil 8.46, 8.47 ve 8.48 bariyer yerinin perdeleme etkinliğine etkisini göstermektedir ($\overline{A}_{rr} \leq 0.5$). İnefektif perdeleme ($\overline{A}_{rr} \geq 0.5$) ile sonuçlanan bariyer yerleri burada gösterilmemiştir. Şekil 8.48 (a) ile 8.48 (b) arasında bir karşılaştırma yapılırsa, V_{sb}/V_{ss}=0.05 de, efektif perdeleme için bariyer yerinin normalleştirilmiş bariyer

genişliğinden bağımsız olduğu görülür. Bunun sebebi V_{sb}/V_{ss} oranının böyle küçük bir değerinde zemin-bentonit bariyerin açık hendek bariyer gibi davranmasıdır.



Şekil 8.48: V_{sb}/V_{ss} =0.05 Olan Zemin-Bentonit Bariyer Durumda Normalleştirilmiş Hendek Derinliğinin, D, Genlik Azalmasına Etkisi;

a) W =0.3 b) W =0.5,0.7 (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

Bariyer Boyutlarının Etkisi

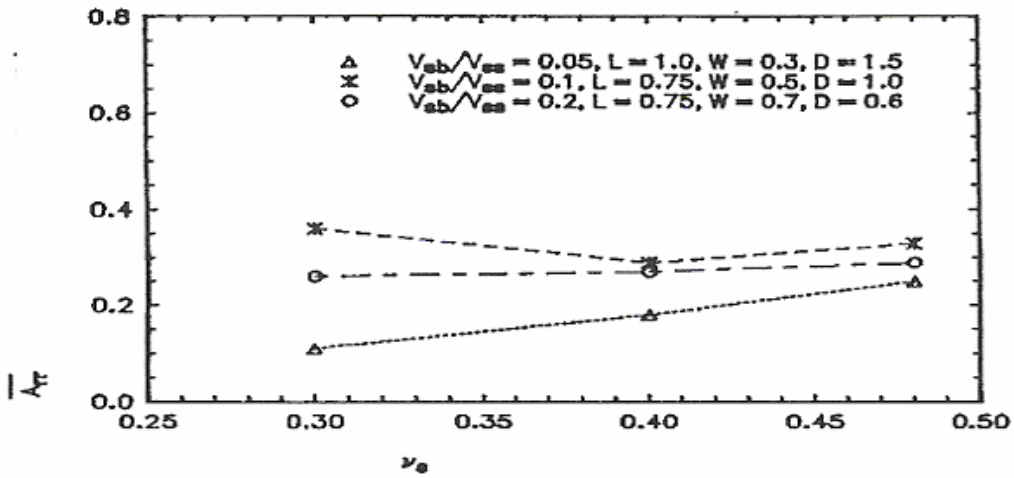
Normalleştirilmiş bariyer derinliği ve normalleştirilmiş bariyer genişliğinin ortalama genlik azalması oranına etkisi Şekil 8.46 – 8.47 – 8.48 de görülmektedir. $0.6\,L_r$ dan küçük bariyer derinlikleri bu şekillerde gösterilmemiştir, çünkü yüksek genlik azalması oranına sebebiyet verirler. Genelde, $D \geq 0.8$ olan açık hendekler efektif perdeleme ($\overline{A}_{rr}$=0.1 den 0.4 e kadar) gösterirler. W=0.3, 0.5 ve 0.7 burada düşünülmüştür ve bu genişlikler için bariyer yeri önceki kısımda anlatıldığı gibidir.

Yoğunluk Oranının Etkisi

Bu etkiyi araştırmak için, bariyer ve zeminin yoğunluk oranları 0.7 ile 1.0 arasında değiştirilmiştir. Bu oranlar zemin-bentonit karışımı için görülür. Sonuçlar (Al-Hussaini 1992), yoğunluk oranı düştükçe perdeleme etkinliğinin arttığını (%4 e kadar) göstermektedir. Bununla birlikte, bu olumlu etki pratikte önemsizdir.

Zeminin Poisson Oranının Etkisi

Şekil 8.49 zeminin Poisson oranının zemin-bentonit bariyerlerin perdeleme etkinliğine etkisini göstermektedir. Çalışılan üç durum için ortalama genlik azalması oranında bir değişim vardır. $\upsilon_s = 0.4$ de elde edilen genlik azalması oranı $\upsilon_s = 0.3 - 0.48$ aralığında kullanılabilir.



Şekil 8.49: Zeminin Poisson Oranının Zemin-Bentonit Bariyer Durumunda Genlik Azalmasına Etkisi (Al-Hussaini ve Ahmad, 1996)

8.5.3 Makina Temellerinde Titreşimlerin Periyodik Hendekler İle Yalıtımı

Zeminde titreşim yayılımını perdelemek için hem sayısal hem de yoğun deneysel çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalardaki uygulamalar, makina temellerinin sebep olduğu istenmeyen titreşimlerin zeminde ilerleyişini engellemek adına tasarlanan dalga bariyerlerini de içerir. Hem açık hem de dolgulu hendekler dalga bariyerlerine örnek olarak gösterilebilir. Dalgayı yansıtma açısından farklı etkinlik derecesine sahip olan bu hendekler literatürde mevcuttur. Bu çalışmanın amacı, istenmeyen yayılımların eleminasyonunu sığ hendekler kullanarak kesin olarak sağlayan bir dalga bariyeri tasarım prosedürü göstermektir. Bu prosedür Bragg rezonansının katı hal fizik döngüsü üzerine kuruludur.

1962 yılında Barkan'ın çalışması hendeklerin arkasında yer değiştirme genliklerini düşürme olasılığı üzerine deneysel bir çalışmaydı. Onun elde ettiği olumsuz sonuçlar hendeklerin tasarımında daha rasyonel bir tasarım prosedürü ihtiyacını ortaya çıkardı. Bunu 1968 yılında Woods tarafından yapılan kapsamlı saha testleri izledi. Woods açık hendekler ile elastik yüzey dalgalarının hem aktif hem de pasif perdelenmesi adına temel bilgileri elde etmiştir. Woods tarafından elde edilen olumlu sonuçlar titreşimlerin perdelenmesi probleminin daha iyi anlaşılmasını sağlamış ve araştırmacıları bu konuda teşvik etmiştir. Problem için analitik bir çözümün zorluğu dolayısı ile sayısal metotlara başvurulmuştur. Lysmer ve Waas 1972 yılında rijit temel üzerinde homojen zemin katmanı içinde hendekler ile SH dalgalarının perdelenmesi çalışması için sonlu elemanlar metodunu kullanmışlardır. 1973 yılında Aboudi ince bariyerler kullanarak yüzey elastik dalgaları problemi için sonlu elemanlar yöntemini de içeren bir metot kullanmıştır. Haupt 1978 yılında, dolgulu hendekler kullanarak yüzey dalgalarının perdelenmesi üzerine yaptığı çalışmaları yorumlamak için sonlu elemanlar yöntemine başvurmuştur. Yine 1978 yılında, Segol sonsuz yatay mesafedeki döşeme içinde ilerleyen P-SV dalgaları üzerinde yaptığı çalışmada, lineer hendeklerin titreşimleri perdeleme üzerindeki etkisini incelemek için sonlu elemanlar metodunu kullanmıştır. Onların sonuçları Woods ile çelişmemekte ve genişliğin önemsiz olduğu şeklindedir. 1980 yılında Fuyuki ve Matsumoto dikdörtgen açık hendekler tarafından saçılan Rayleigh dalgalarını araştırmak için sonlu farklar metoduna başvurdular ve hendeklerin genişliğinin önemli olabileceği sonucuna vardılar. May ve Bolt 1982 yılında yarı sonsuzda tek bir tabaka üzerinde ilerleyen P, SV ve SH dalgalarına açık hendeklerin etkisi üzerine

yaptıkları çalışmada zaman-tanım sonlu elemanlar yöntemini kullandılar. 1985 yılında Emad ve Manolis dikdörtgen ve yarım daire şeklindeki hendeklerden sismik hareketin nasıl etkilendiğini araştırmak için sınır elemanlar yöntemine başvurmuşlardır. 1985 ve 1986 yıllarında Beskos homojen, yarı sonsuzda ve tabakalı zeminde yüzey dalgalarının perdelenmesi ile makina temellerinin titreşim yalıtımını araştırmak amacıyla sınır elemanlar yöntemini kullandı. 1987 yılında Leung tabakalı yarı sonsuzda yüzey dalgalarının perdelenmesi konusu için ince tabaka yarı düzlem Gren fonksiyonu sınır elemanlar yöntemini kullandı. 1988 yılında Dasgupta makina temellerinin titreşim yalıtımı için üç boyutlu sınır elemanlar yöntemini kullandı. Banerjee 1988 yılında çok tabakalı zeminde titreşim yalıtımı problemi için yüksek mertebeden sınır elemanlar yöntemini kullandı. 1991 yılında Al Hussaini ve Ahmad homojen yarı sonsuzda yüzey dalgalarının perdelenmesi üzerinde yüksek mertebeden sınır elemanlar yöntemini kullanarak parametrik bir çalışma yaptılar. Aynı çalışmayı tabakalı yarı sonsuzda tekrarladılar. Her iki çalışma da dikdörtgen hendekler için tasarım formüllerinin gelişmesini teşvik etti. 1996 yılında Al Hussaini ve Ahmad titreşim üreten makinaya yakın hendekler ile temellerin yalıtımı problemini çalıştılar.

Bütün bu çalışmalarda, periyodik hendekler ile titreşim yalıtımı olasılığı dikkate alınmamıştır. Şu iyi bilinen bir durumdur ki, periyodik waveguide lar dalga filtresi görevi görürler. Filtreleme işlemi dalganın ve dalganın yansıyan kısmının karşılaşması sonucu olur. Bu yayılma spektrumunu geçen ve duran bantlardan oluşan bantlı bir yapıya böler.

Bu çalışmada, belirli frekans bantları üzerinden iletimi tamamen elemine etmek için periyodik bir yapıya sahip bir temelin filtreleme durumu ele alınmıştır. Bu amaçla, düşünülen durum rijit kaya zemin üzerinde periyodik sığ hendekler ile elastik bir tabaka üzerinde kesme dalgalarının yayılımı durumudur. Asimptotik açılımlar rezonans durumuna karar vermek için kullanıldılar.

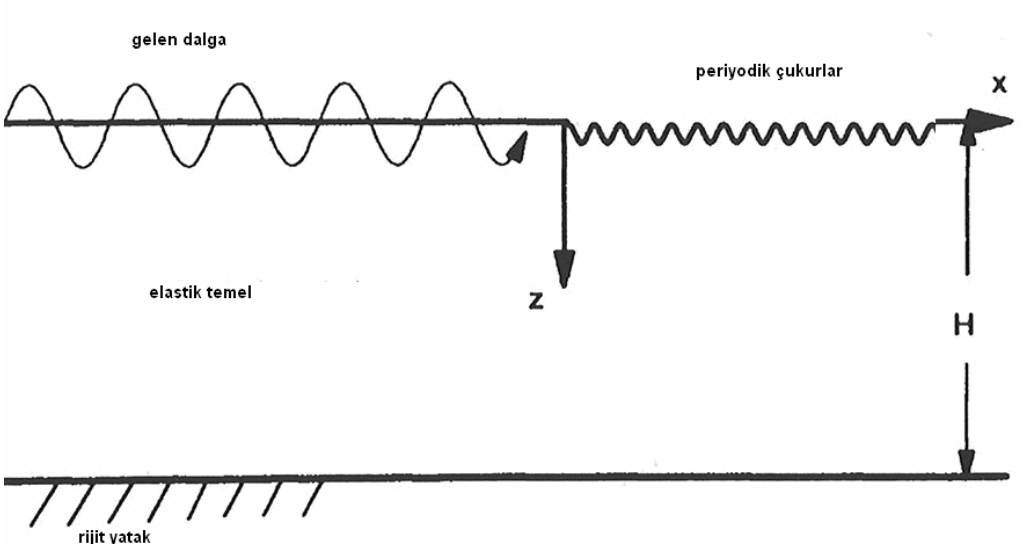
Problemin Formülasyonu

Rijit tabaka üzerinde bir elastik temel ve bu elastik temel üzerinde titreşin üreten bir makina olsun. Makina tarafından üretilen istenmeyen titreşimleri izole etmek için periyodik sığ hendekler kullanılsın. Bu hendekler dikdörtgen, yamuk veya başka bir geometriye sahip olabilirler. Bununla birlikte, bütün bu geometriler Fourier serileri cinsinden ifade edilebilirler. Böylece, sinüzoidal oluklara sahip zemin üzerinde

çalışmak yerinde bir yaklaşım olur. Şekil 8.50 problem için tipik bir örnek teşkil eder. Periyodik oluklu yüzeyin geometrisi kartezyen koordinatlarla ifade edilebilir.($\bar{x}$, $\bar{y}$, $\bar{z}$)

$$\bar{z} = \bar{\delta}(1 - \cos \bar{k}_s \bar{x}) \qquad \textbf{(8.43)}$$

Burada, $\bar{k}_s$ periyodik yüzeyin dalga numarasıdır ve $\bar{\delta}$ ise hendek genliğidir.



Şekil 8.50: Periyodik Hendeklerle Elastik Temel (Hawwa, 1998)

$\bar{H}$ tabaka kalınlığıdır. Burada, boyutsuz bir büyüklüğün tanımı yapılacaktır. ε, $\bar{\delta}$ nın $\bar{H}$ a oranı olarak tanımlanır (Hawwa, 1998).

Yatay elastik tabaka içinde harmonik hareketin yayılımı düşünülmüştür. Burada geçici bir değişken $\exp(-i\bar{w}\bar{t})$ formunda düşünülmüştür. $\bar{w}$ titreşim frekansı, $\bar{t}$ zaman koordinatıdır. Sonuç olarak, yer değiştirme cinsinden hareket denklemi aşağıdaki boyutsuz formu alır.

$$\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} + k_t^2 v = 0 \qquad \textbf{(8.44)}$$

Burada, $v(x,z)$ düzlemde yer değiştirmenin y bileşenidir. $k_t = \bar{w}\bar{H}/c_t$ dalga bütününde dalga numarasını gösterir. $c_t = (\mu/\rho)^{1/2}$ ise elastik bir katı içinde kesme dalgasının hızıdır.

Elastik tabakanın serbest yüzeyinin sınır koşulu alanın bitişidir. Böylece,

$$\frac{\partial v}{\partial x} n_x + \frac{\partial v}{\partial z} n_z = 0,\ z = \varepsilon(1-\cos k_s x) \text{ olur.} \qquad \textbf{(8.45)}$$

n_x ve n_z birim normallerdir. Diğer sınır koşulu, elastik tabaka ve rijit tabanın kesişiminde, yer değiştirmenin bitişidir.

$$v = 0,\ z = 1 \qquad \textbf{(8.46)}$$

8.40 ve 8.42 denklemleri bir sonraki bölümde tartışılan asimptotik açılımların kullanımı ile analitik olarak çözülür.

Açılımlar

ε un kuvvetleri cinsinden v için,

$$v(x,z) = v_0(x,z) + \varepsilon v_1(x,z) + ... \qquad \textbf{(8.47)}$$

yazılır. 8.43 denklemini 8.40 ve 8.42 denklemleri içinde kullanarak ve $z = 0$ da v değerini açarak, her iki tarafta ε^0 ve ε^1 katsayılarının hesap edilmesiyle aşağıdaki denklemler elde edilir.

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial x^2} = k_t^2 v = 0 \qquad \textbf{(8.48)}$$

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2} = 0,\ z = 0 \text{ da,} \qquad \textbf{(8.49)}$$

$$v_0 = 0,\ z = 1 \text{ de,} \qquad \textbf{(8.50)}$$

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial x^2} + k_t^2 v_1 = 0 \qquad \textbf{(8.51)}$$

$$\frac{\partial v_0}{\partial z} = k_s \sin(k_s x)\frac{\partial v_0}{\partial x} - \left[1-\cos(k_s x)\right]\frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2},\ z = 0 \text{ da,} \qquad \textbf{(8.52)}$$

$$v_1 = 0,\ z = 1 \text{ de,} \qquad \textbf{(8.53)}$$

Sıfırıncı mertebe 8.44 ve 8.46 sistemi aşağıdaki formda çözüme olanak verir.

$$v_0 = A\cos(\frac{j\pi}{2}z)e^{ik_j x}\,,\ \ j = 1,3,5... \qquad \textbf{(8.54)}$$

Burada,

$$k_j^2 = k_t^2 - (\frac{j\pi}{2})^2 \qquad \textbf{(8.55)}$$

Birinci mertebe sistemi çözmek için, v_1 in özel çözümü aranmalıdır.

$$v_1 = A_1\Phi_1(z)e^{ik_j x} + A_2\Phi_2(z)e^{i(k_j+k_s)x} - A_3\Phi_3(z)e^{i(k_j-k_s)x} \qquad \textbf{(8.56)}$$

8.50 ve 8.52, 8.47 ve 8.49 içinde kullanılırsa ve her iki tarafta $e^{ik_j x}$, $e^{i(k_j+k_s)x}$, $e^{i(k_j-k_s)x}$ katsayıları hesaplanırsa, aşağıdaki eşitlik elde edilir.

$$\left(\frac{d^2}{dz^2} + \gamma_n^2\right)\Phi_n = 0\,,\ \ n = 1,2,3 \qquad \textbf{(8.57)}$$

Burada,

$\gamma_{1j} = (k_t^2 - k_s^2)^{1/2}$, $\gamma_{2j} = (k_t^2 - (k_j + k_s)^2)^{1/2}$ ve $\gamma_{3j} = (k_t^2 - (k_j - k_s)^2)^{1/2}$ dir.

$$\frac{d\Phi_n}{dz} = 1\,,\ \ z = 0 \qquad \textbf{(8.58)}$$

$$\Phi_n = 0\,,\ z = 1 \qquad \textbf{(8.59)}$$

8.53 ve 8.55 denklem sisteminin çözümü aşağıdaki gibidir.

$$\Phi_n(z) = \frac{1}{\gamma_{nj}\cos\gamma_{nj}}\left[\cos\gamma_{nj}\sin\gamma_{nj}z - \sin\gamma_{nj}\cos\gamma_{nj}z\right] \qquad \textbf{(8.60)}$$

Böylece 5 asimptotik açılımı bulunur. Bu açılımın geçerli olması için v_1 / v_0 ın $O(\varepsilon)$ un bir elemanı olması gerekir. Bu, $\gamma_{nj} = j\pi/2$, $j = 1,3,5...$ olduğu zaman geçerli olmaz. Ve aşağıdaki rezonans koşuluna gider.

$$2k_j \approx k_s \qquad \textbf{(8.61)}$$

Bu Bragg rezonansı olarak bilinir. Bu tip rezonans ilk olarak kristal düzlemlerden dağılan X ışınları çalışmasında elde edilmiştir. Bundan daha sonra periyodik sistemlerde dalga hareketinde yararlanıldı. Çoklu ölçekler metodu asimptotik

açılımları düzeltmek için, rezonans durumunda üniform bir çözüm bulmak için kullanılır (Hawwa, 1998).

Çoklu Ölçekler Metodu

ε un kuvvetleri cinsinden v için birinci mertebeden bozuk açılımlar,

$$v(x,z) = v_0(z, X_0, X_1) + \varepsilon v_1(z, X_0, X_1) + ... \quad \textbf{(8.62)}$$

şeklindedir.

Burada, $X_0 = x$ dalga uzunluğu sırasının kısa ölçeğidir ve $X_1 = \varepsilon x$ ise uzun ölçektir. Bu yüzey hendeklerinden dolayı faz modülasyonunu ve genliği ifade eder. Zincir kuralı kullanılarak , X_0 ve X_1 cinsinden x e göre türevler yazılırsa,

$$\frac{\partial}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial X_0} + \varepsilon \frac{\partial}{\partial X_1} + ... \quad \textbf{(8.63)}$$

$$\frac{\partial^2}{\partial x^2} = \frac{\partial^2}{\partial X_0^2} + 2\varepsilon \frac{\partial^2}{\partial X_0 \partial X_1} + ... \quad \textbf{(8.64)}$$

elde edilir.

8.58 ve 8.60 denklemleri 8.40 ve 8.42 içinde kullanılırsa, $z = \varepsilon(1 - \cos k_s X_0)$ da v, $z = 0$ da Taylor serisine açılırsa, ve her iki tarafta ε^0 ve ε^1 katsayıları hesaplanırsa aşağıdaki sıfırıncı mertebe sistem $O(1)$ elde edilir.

$$\frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_0}{\partial X_0^2} + k_t^2 v_0 = 0 \quad \textbf{(8.65)}$$

$$\frac{\partial v_0}{\partial z} = 0, \; z = 0 \quad \textbf{(8.66)}$$

$$v_0 = 0, \; z = 1 \quad \textbf{(8.67)}$$

Ve aşağıdaki birinci mertebeden sistem $O(\varepsilon)$,

$$\frac{\partial^2 v_1}{\partial z^2} + \frac{\partial^2 v_1}{\partial X_0^2} + k_t^2 v_1 = -2 \frac{\partial^2 v_0}{\partial X_0 \partial X_1} \quad \textbf{(8.68)}$$

$$\frac{\partial v_1}{\partial z} = k_s \sin(k_s X_0) \frac{\partial v_0}{\partial X_0} - [1 - \cos(k_s X_0)] \frac{\partial^2 v_0}{\partial z^2}, \; z = 0 \quad \textbf{(8.69)}$$

$$v_1 = 0\,,\ z = 1 \qquad \textbf{(8.70)}$$

8.61 ve 8.63 denklem sistemleri, gelen ve yansıyan modların lineer kombinasyonları formunda bir çözüme olanak verir.

$$v_0 = \left[A_j^+(X_1)e^{ik_j x_0} + A_j^-(X_1)e^{-ik_j x_0}\right]\cos\left(\frac{j\pi}{2}z\right) \qquad \textbf{(8.71)}$$

Burada + ve – işaretleri gelen ve yansıyan modları gösterir. $A_j^{\pm}(X_1)$ yaklaşımın bu aşamasında bilinmeyen fonksiyonlardır. Bunlar yaklaşımın bir sonraki aşamasında bulunur.

Birinci mertebe probleminin homojen kısmı önemli bir çözüme sahiptir. Homojen olmayan birinci mertebe problemi ise ancak ve ancak bir çözülebilme şartının sağlanması ile bir çözüme sahip olur. Bu şarta karar verebilmek için, v_1 için özel çözüm aranır.

$$v_1 = \left[B_j^+(z)e^{ik_j x_0} + B_j^-(z)e^{-ik_j x_0}\right] \qquad \textbf{(8.72)}$$

8.58 ve 8.68 denklemleri 8.64 denklemi içinde kullanılırsa, $e^{\pm ik_j x_0}$ katsayıları her iki tarafta hesaplanırsa,

$$\left[\frac{d^2}{dz^2} + \left(\frac{j\pi}{2}\right)^2\right]B_j^{\pm} = \pm 2ik_j\frac{dA_j^{\pm}}{dX_1}\cos\left(\frac{j\pi}{2}z\right) \qquad \textbf{(8.73)}$$

elde edilir.

8.69 denklemi $\cos[(j\pi/2)z]$ ile çarpılıp $z = 0$ dan $z = 1$ e kadar integrasyonu alınırsa,

$$(B_j^{\pm})'(0) = \pm ik_j\frac{dA_j^{\mp}}{dX_1} \qquad \textbf{(8.74)}$$

elde edilir.

k_j dalga numarasının miktarsal olarak rezonansa yakınlığını tanımlamak için, $O(1)$ in bir parametresi σ karşımıza çıkar.

$$k_s = 2k_j + \varepsilon\sigma \qquad \textbf{(8.75)}$$

8.67 ve 8.68 çözümlerini 8.65 ve 8.66 sınır koşulları içinde kullanılırsa, $\cos(k_s X_0)$ polar formda yazılırsa, 8.71 rezonans şartı kullanılarak, sonuçta 8.70 denklemi içinde kullanılırsa,

$$\frac{dA_j^+}{dX_1} = f_j A_j^+ - g_j A_j^- e^{i\sigma X_1} \qquad \textbf{(8.76)}$$

$$\frac{dA_j^-}{dX_1} = -f_j A_j^- + g_j A_j^+ e^{-i\sigma X_1} \qquad \textbf{(8.77)}$$

elde edilir. Burada,

$$f_j = \frac{i}{k_j}\left(\frac{j\pi}{2}\right)^2,\ g_j = -\frac{i}{2k_j}\left[k_j k_s + \left(\frac{j\pi}{2}\right)^2\right] \qquad \textbf{(8.78)}$$

dır.

8.72 ve 8.73 denklemleri periyodik hendekler üzerinde yayılan dalgaların arsındaki ilişkiyi göstermektedir. Bu denklemleri çözmek için ilgili sınır koşullarına ihtiyaç vardır. Genelliğin bozulmaması açısından bu sınır koşullar aşağıdaki gibi verilsin.

$A_j^+ = 1 \ \ X_1 = 0$ da, $A_j^- = 0 \ X_1 = l$ de. **(8.79)**

Burada birinci koşul giden modun genliğini gösterir. İkinci koşul, yansıyan modun periyodik kısmın sonunda bittiğini gösterir. 8.72 ve 8.75 denklem sistemi standart bir iki noktada sınır değeri problemidir ve analitik çözümü vardır.

İşlem kolaylığı için aşağıdaki formasyon kullanılırsa,

$$A_j^- = a_j^- \text{ ve } A_j^+ = a_j^+ e^{i\sigma X_1} \qquad \textbf{(8.80)}$$

$$\frac{da_j^+}{dX_1} = (f_j - i\sigma)a_j^+ - g_j a_j^- \qquad \textbf{(8.81)}$$

$$\frac{da_j^-}{dX_1} = -f_j a_j^- + g_j a_j^+ \qquad \textbf{(8.82)}$$

$$a_j^+(0) = 1,\ a_j^-(l) = 0 \qquad \textbf{(8.83)}$$

elde edilir.

8.77 ve 8.79 denklem sistemi $x = 0$ da sınır koşulu için çözülebilir.Mesala,

$$a_j^-(0) = \frac{g_j\left[1 - e^{(\lambda_1-\lambda_2)l}\right]}{\left[\lambda_1 - \lambda_2 e^{(\lambda_1-\lambda_2)l}\right] + f_j\left[1 - e^{(\lambda_1-\lambda_2)l}\right]} \text{ olur.} \quad \textbf{(8.84)}$$

Burada,

$$\lambda_{1,2} = \frac{1}{2}\left[-i\sigma \mp (4\Omega_j - \sigma^2)^{1/2}\right] \quad \textbf{(8.85)}$$

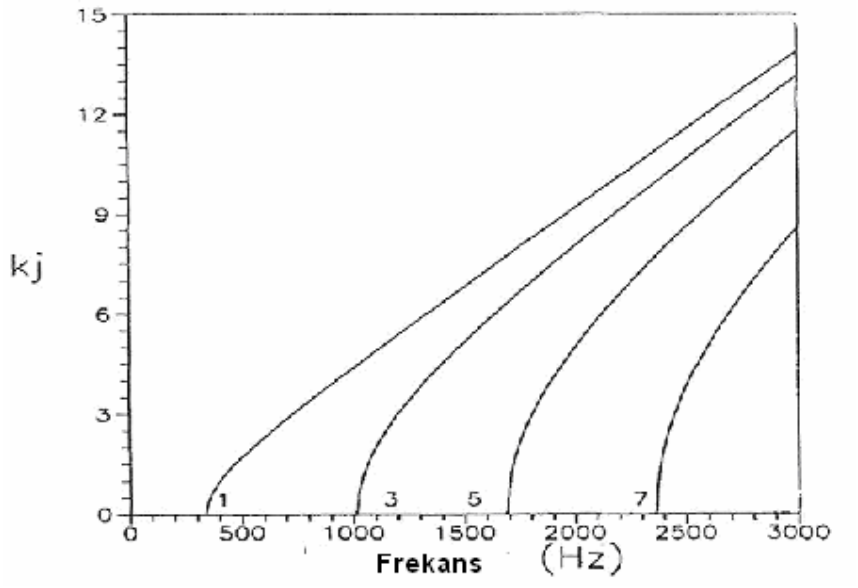
$\Omega_j = (f_j^2 - g_j^2 - i\sigma f_j)$ dir. Periyodik temelin performansını miktarsal olarak ölçmek için bu yansıma katsayısı kullanılır. Bu $R_j = \left|a_j^-(0)/a_j^+(0)\right|$ ilişkisinden hesaplanır.

Sayısal Örnekler

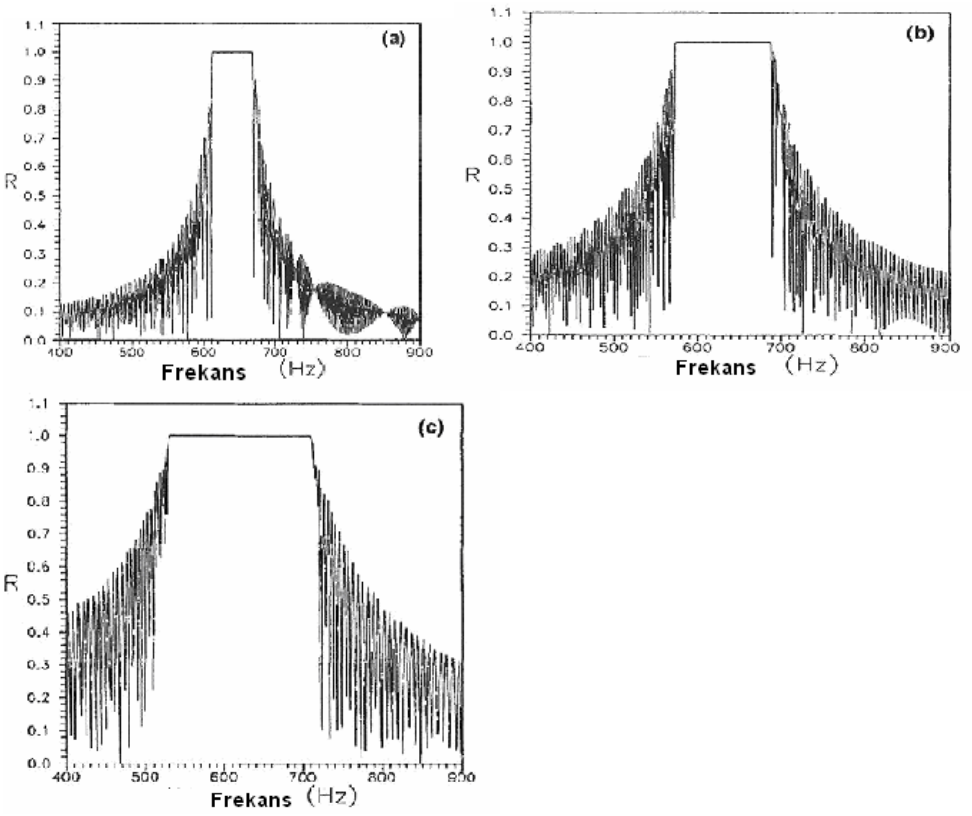
Bu bölümde sayısal örnekler verilecek ve periyodik hendekler ile elastik tabakada yansıma karakteristikleri tartışılacaktır. Elastik tabakanın $\rho = 2{,}400 kg/m^3$ ve $c_t = 1{,}350 m/s$ olmakla beraber betondan yapıldığı kabul edilmiştir. Elastik tabaka kalınlığı 1 m.dir. Şekil 8.51 elastik tabakada ilk dört modun eğrilerinin dağılımını göstermektedir.

İki tasarım örneği verilmiştir. Birincide, perdeleyici elastik tabaka 650 Hz frekansta çalışmaktadır ki burada sadece bir yayılım modu vardır. Sonuç olarak, elastik tabakanın serbest yüzeyinde periyotluk dalga numarası olarak verilir ki bu da çift katlı dalga numarası k_j ye 650 Hz. de eşittir. Örnek olarak, $k_s = 2x2.585$ ise bu $\lambda = 1.216m$ dalga boyunu işaret eder. Periyodik kısmın uzunluğu 10λ alınır. Periyodik hendeklerin genliği ε parametresi ile ölçülür ki, buna 0.05, 0.1 ya da 0.15 e kadar izin verilir.

Perdeleyici elastik tabakanın özellikleri Şekil 8.52 (a-c) de gösterilmiştir. Bu ε un farklı değerlerinin üç durumu için de frekansın bir fonksiyonu olarak yansıma katsayısını gösterir. Şuna dikkat etmek gerekir ki, rezonans frekansı civarındaki bir frekans aralığı için yansıma tamdır. ε 0.05, 0.1 ve 0.15 olduğu zaman durma bandının genişliği 54, 115 ve 179 Hz. dir. Sonuçta, geniş bantta bir yansıma için ε un yüksek değerleri gerekir (Hawwa, 1998).

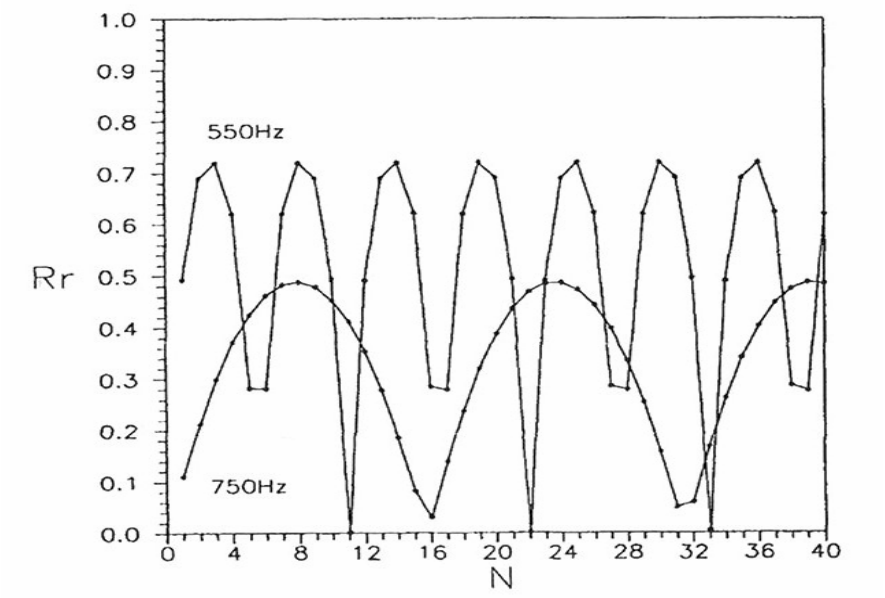


Şekil 8.51: Kayma Dalgalarının Dağılım Eğrileri (Hawwa, 1998)

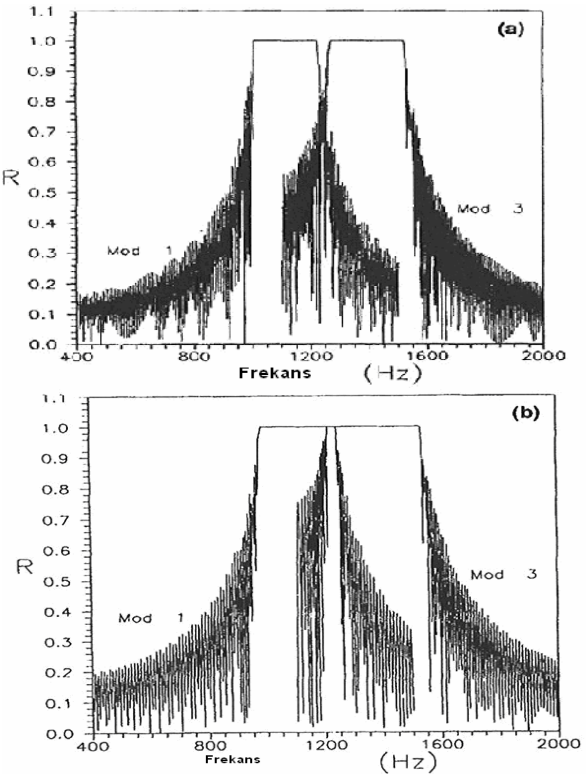


Şekil 8.52: Mod 1 İçin Yansıma Katsayısı- Frekans İlişkisi (Hawwa, 1998)

a) ε=0.05 b) ε=0.1 c) ε=0.15



Şekil 8.53: Yansıma Katsayısı- Elastik Tabakanın Periyodik Kısmının Rezonant Dalga Numarası Uzunluğu (Hawwa, 1998)



Şekil 8.54: Mod 1 ve 3 İçin Yansıma Katsayısı- Frekans İlişkisi (Hawwa, 1998)

a) $\varepsilon = 0.1$ b) $\varepsilon = 0.12$

Geçen dalga bandı seviyesi rezonans frekansından küçülür. Sonuç olarak, dalgalanan bölgedeki frekansta bazı yansımalardan mod zarar görür. Bunu kontrol etmek için, Şekil 8.52 (b) deki elastik tabakayı düşünelim. Şekil 8.53 de 550 ve 750 Hz. Frekans için bu temelin yansıma katsayısı ile periyodik bölgenin uzunluğu ilişkisi gösterilmiştir. Periyodik bölgenin uzunluğu periyotların sayısı ile ölçülür. Yansıma katsayısı periyodik bölgenin uzunluğu ile periyodik bir davranışta değişir.

İkinci örnekte, perdeleyici elastik tabaka çoklu mod "çevre" üzerinde çalışır. Zaten kesme dalgalarının dağılımı yüksek frekansta çeşitli modların varlığını gösterir. İlk ayrılan frekansın ötesinde bir frekans bandında çalışmak gerekir. Burada, frekans aralığı (1020, 1695) Hz. olarak düşünülmüştür. Bu aralıkta, 1 m kalınlıkta uniform elastik tabaka içinde iki mod yayılabilir. $k_s = 10.0$ dalga numarasını elde etmek için elastik tabakanın serbest yüzeyindeki periyotu ele alalım. Bu dalga numarası $\lambda = 0.628m$ olan dalga boyuna tekabül eder. Periyodik kısmın 10λ olduğu kabul edilmiştir. Yansıma katsayısı- frekans ilişkisi Şekil 8.54 (a) da gösterilmiştir. Sonuçlar, değişik frekans bantlarında Mod 1 ve 3 için perdeleyici elastik tabakanın filtreleme görevini mükemmel bir şekilde yaptığını göstermiştir. Eğer hendeklerin genliği artırılırsa, modlar dah geniş bantlar üzerinde yansır. Bu da, iki mod tarafından paylaşılan tipik bir durma bandının varlığına neden olur. Şekil 8.54 (b) ε=0.12 için yansıma frekansını gösterir. Burada, 30 Hz. bandın üzerindeki her iki modu elemine etmek mümkündür.

Bir makina izotropik elastik yarı sonsuz üzerine oturuyorsa, sadece bir modda yayılım olur (Rayleigh dalgası). Bu ise önerilen metodu istenilen frekans bandı üzerinde yüzey dalgalarının perdelenmesi açısından daha güçlü kılar.

8.6 Açık ve Dolgulu Hendeklerin Aktif Yalıtım Etkinliği Açısından Karşılaştırılması

Kayma Dalgası Hızı Oranının Etkisi

Dolgulu hendek bariyerlerde zemine göre rölatif sıkılık yalıtım açısından önemli bir faktördür. Açık hendek bariyerlerde ise dolgu maddesi olmadığından bu oran zaten sıfırdır. V_{sb}/V_{ss} oranı yani dolgu maddesi ve zeminin kayma dalgası hızları oranı dolgu maddesi ile zemin arasındaki sıkılık ilişkisini göstermektedir. Burada esas alınan zemine göre sıkılığı daha fazla olan betonda ilgili şekiller incelendiğinde genel

olarak V_{sb}/V_{ss} oranı arttıkça yalıtım etkinliği de artar. Hendek derinliği ve yeri ile ilgili optimum koşullar sağlandığında kayma dalgası hızı oranı 10 değerini aldığında etkin yalıtım sağlanmış olur. Bu değerden sonra da yalıtım etkinliği artar. Ancak bu artış yavaştır. Zemin bentonit karışımı ise söz konusu zemine göre daha gevşektir. Zemin-bentonit bariyerlerde ise genel olarak V_{sb}/V_{ss} oranı azaldıkça etkin yalıtım sağlanmış olur. V_{sb}/V_{ss} değeri 0.2 ya da daha küçük olduğunda yalıtım etkinliği için yeterli sonuç alınmış olur. Yani genlik azalması % 50 oranında sağlanmış olur. V_{sb}/V_{ss} değeri çok küçük ise zemin-bentonit bariyerler açık hendek bariyerler gibi davranmaya başlar.

Zeminin Poisson Oranının Etkisi

Dolgulu hendek bariyerler için ilgili grafikler incelendiğinde zeminin Poisson oranı 0.4 olduğunda yalıtım etkinliği açısından en iyi sonuç elde edilir. Bu değerden uzaklaştıkça yalıtım etkinliği azalır. Açık hendek bariyerler için de durum aynıdır. Poisson oranının 0.4 den büyük değerleri için A_{rr} değerlerinin artışı beton bariyer ve açık hendek bariyerler için hızlıdır.

Yoğunluk Oranının Etkisi

Yoğunluk oranı dolgu malzemesinin yoğunluğunun zeminin yoğunluğuna oranı olarak tanımlanmıştır. Dolayısıyla, açık hendek bariyerler için böyle bir oran söz konusu değildir. Yapılan araştırmalar sonucu, yoğunluk oranının genlik azalmasına etkisi dolgulu hendek bariyerler için önemsizdir.

Hendeğin Açısal Uzunluğunun Etkisi

Hem açık hendeklerde hem de dolgulu hendek bariyerlerde yalıtım etkinliği üzerinde etkili olan diğer parametrelerin değişik kombinasyonları için 180 º ve 270 º gibi daire parçası hendeklerin ilgili şekillerde de görüldüğü gibi tam daire hendek gibi etkin yalıtım sağladığı görülmektedir.

Hendek Genişliğinin Etkisi

Açık hendek bariyerlerde hendek genişliğinin yalıtım etkinliği açısından önemsiz olduğu görülmektedir. Ancak dolgulu hendek bariyerlerde durum böyle değildir. Dolgulu hendek bariyerler için hendek genişliğinin etkisini yalnız başına incelemek yanlış olur. Çünkü hendek genişliğinin etkisi büyük ölçüde bariyerin yerine bağlıdır. İlgili şekiller incelendiğinde beton bariyer için L=0.25 olduğunda hendek

genişliğinin çok önemli olmadığı ancak L=0.1 olduğunda genişlik arttıkça yalıtım etkinliğinin önemli ölçüde arttığı görülmektedir. V_{sb}/V_{ss} oranı 0.05 den küçük zemin bentonit bariyerler açık hendek gibi davrandığından hendek genişliğinin etkisi düşüktür. Ancak zemin bentonit bariyerlerde de genel olarak hendek genişliği arttıkça yalıtım etkinliği artar.

Hendek Derinliğinin Etkisi

Hendek derinliğinin etkisi de hendek genişliği gibi yalnız başına incelenmemelidir. Açık hendek bariyerlerde hendek derinliğinin etkisi kaynak yarıçapı ve hendeğin kaynaktan uzaklığı ile beraber incelenir. Açık hendek bariyerlerde kaynak yarıçapının büyük değerlerinde kaynağa yakın yerlerde yer değiştirme genliğinde yüksek tepe ve çukurlar gözlenir. Bunu yenmek için daha derin hendekler gerekir. Dolgulu hendek bariyerlerde ise hendek derinliğinin etkisi önemli ölçüde kayma dalgası hızı oranına bağlıdır. İlgili şekillerden hendek derinliğinin artışının D_{opt} değerine kadar yalıtım etkinliğini artırdığı bu değerden sonrada etkisinin azaldığı görülmektedir. Derinliğin optimum değeri de kayma dalgası hızının bir fonksiyonudur. V_{sb}/V_{ss} oranı arttıkça D_{opt} düşer.

Bariyer Yerinin Etkisi

Açık hendek bariyerlerde hendek yerinin etkisi hendek derinliğine ve kaynak yarıçapına da bağlıdır. 1.0 dan küçük yarıçaplar için bariyer yerinin etkisi daha belirgindir. 1.0 dan büyük değerler için ise daha komplekstir. Küçük yarıçaplar için, seçilen bir derinlikte kaynaktan uzaklık arttıkça yalıtım etkinliği artar. 1.0 dan büyük yarıçaplar için seçilen bir derinlikte kaynaktan belli bir mesafeye kadar yalıtım etkinliği artar, sonra azalmaya başlar. Beton bariyerler için ise yalıtım etkinliği büyük ölçüde hendek yerine bağlıdır. Bu açıdan hendeğin yeri çok önemli bir parametredir. Beton bariyerler için L_{opt} =0.375 değerine kadar yalıtım etkinliği kaynaktan uzaklaştıkça artar. Bu değerden sonra azalmaya başlar. Zemin bentonit bariyerlerde etkin yalıtım sağlamak için hendek yeri; hendek genişliği ve V_{sb}/V_{ss} oranı ile beraber değerlendirilir. Düşük V_{sb}/V_{ss} değerleri için hendek genişliğinin etkisi düşünülmez. V_{sb}/V_{ss} nin 0.1 den büyük değerleri için kaynak yerinin etkisi daha önemlidir. Bu durumda eğer kaynak genişliği yeterince büyükse nispeten daha küçük uzaklıklarda etkin yalıtım sağlanabilir.

Temel Boyutunun Etkisi

Açık hendekler için, temel yarıçapının büyük olması kaynağa yakın yerlerde düşey yer değiştirme genliği büyük tepe ve çukurlar yapar. Ancak küçük B_f değerlerinde kaynak noktasal kaynak olarak davranır ve bu dalgalanmalar olmaz. Büyük B_f değerlerinde yalıtım etkinliği özellikle kaynağa yakın yerlerde düşüktür. Dolgulu hendek bariyerler için de düşük B_f değerlerinde yüksek yalıtım etkinliği elde edilir.

8.7 Uygulamalar

Örnek 1: 750 rpm hızla çalışan bir makina için temel tasarımı yapılacaktır. Makinanın ağırlığı 2.0 t olup düşey doğrultuda 0.5 t değerinde sinüzoidal değişen dengelenmemiş kuvvet üretmektedir. Temel için ayrılan alan sınırlı olduğundan temel alanının 3 m x 2 m yi geçmemesi istenmektedir. Çevredeki hassas ekipmanın varlığı nedeniyle titreşim genliği 0.025 mm den küçük olmalıdır. Zeminin dinamik kayma modülü G = 1950 t / m² ve υ = 0.305 dir. Betonun birim ağırlığı 2.4 t / m³ olarak alınacaktır.

Çözüm:

1. Tasarım Verileri

Makinanın ağırlığı = 2.0 t

İşletme hızı = 750 rpm = 78.53 rad / s

Düşey dengelenmemiş kuvvet P_z = 0.5 t

Dinamik kayma modülü G = 1950 t / m²

Zeminin Poisson oranı = 0.305

İzin verilen titreşim genliği = 0.025 mm

2. Birinci deneme

Temelin titreşim genliği 0.025 mm ile sınırlandırılmıştır. Temel alanınında 3 m x 2 m ile sınırlandırıldığı göz önüne alındığında istenen kriterde yeterli bir tasarım için basit bir blok temel tasarımı mümkün olmayacaktır. 7. adımda hesaplandığı gibi düşey titreşim genliği 0.2024 olacaktır. Sönümleyiciler üzerine oturan bir temel tasarımı yapılacaktır.

3. İkinci deneme

Temel alanı 3 m x 2 m olarak seçilsin. Sönümleyiciler altındaki döşeme boyutları da 3 m x 2 m x 0.3 m ve sönümleyiciler üzerindeki temel boyutları da 3 m x 2m x 1 m olsun (Şekil 8.1).

Sönümleyiciler altında temel bloğunun ağırlığı W_1 = 3 x 2 x 0.3 x 2.4 = 4.32 t

Kütle m_1 = 4.32 / 9.81 = 0.4403 t.s² / m

Sönümleyiciler üzerinde temel bloğunun ağırlığı W_2 = 3 x 2 x 1 x 2.4 = 14.4 t

Sönümleyiciler üzerinde toplam ağırlık = 14.4 + 2 = 16.4 t

Kütle m_2 = 16.4 / 9.81 = 1.6177 t.s² / m

Kütlelerin oranı m_2 / m_1 = 1.6717 / 0.4403 = 3.796

4. Temel altında zemin yay katsayısı k_1

Eşdeğer yarıçap r_0

$r_0 = \sqrt{6/\pi}$ = 1.382 m

$k_1 = k_z$ = (4 x 1950 x 1.382) / (1 – 0.305) = 15510 t / m

5. Zemin üzerine oturan tüm sistemin sınırlı doğal frekansı w_1

$$w_1 = \sqrt{\frac{k_1}{m_1 + m_2}} = \sqrt{\frac{15510}{0.443 + 1.6717}} = 85.69 \text{ rad / s}$$

6. Frekans oranı r_1

$$r_1 = \frac{w_1}{w} = \frac{85.69}{78.53} = 1.0911$$

7. Zemin üzerine oturan sistemin genliği (Sönümleyici kullanılmaması durumu)

$$Z = \frac{F_0}{(m_1 + m_2)(w_1^2 - w^2)} = \frac{0.5}{(0.4407 + 1.6716)(85.69^2 - 78.53^2)} = 0.0002024 \text{ m}$$

= 0.2024 mm

8. Sönümleme derecesi

$$\frac{Z}{Z_1} = \frac{0.2024}{0.025} = 8.096$$

Tasarım için -10 alınsın.

9. Frekans oranı r_2

$$\frac{Z}{Z_1} = \frac{\left[1-(1+m_2/m_1)(r_1^2+r_2^2-r_1^2r_2^2)\right]}{r_2^2\left[(1+m_2/m_1)(r_1^2-1)\right]}$$

Buradan,

$$r_2^2 = \frac{1-(1+m_2/m_1)r_1^2}{(1+m_2/m_1)(Z/Z_1-1)(r_1^2-1)} = \frac{1-(1+3.796)(1.0906)^2}{(1+3.796)(-10-1)(1.0906^2-1)} = 0.4706$$

10. w_2^2 **nin hesabı**

$r_2^2 = w_2^2 / w^2$

$w_2^2 = (0.4706)(78.53)^2$

$w_2 = 53.87$ rad / s

11. Sönümleyicinin rijitliği k_2

$k_2 = m_2 w_2^2 = (1.6717)(0.4706)(78.53)^2 = 4851$ t / m

$k_2 = 4851$ t / m sönümleyici sisteminin toplam rijitliğidir. Sekiz sönümleyici birimi kullanılırsa, her biri 600 t / m rijitliğe sahip olmuş olur. w_2 nin gerçek değeri $w_2 = \sqrt{4800/1.6717} = 53.58$ rad / s

12. Sönümleyiciler üzerindeki sistemin titreşim genliği Z_2

$$Z_2 = \frac{(1+m_2/m_1)w_1^2 + (m_2/m_1)w_2^2 - w^2}{m_2\Delta(w^2)}F_0$$

$\Delta(w^2) = w^4 - (1+m_2/m_1)(w_1^2+w_2^2)w^2 + (1+m_2/m_1)w_1^2w_2^2$

$\Delta(w^2) = 2.200$ x 10^8

$$Z_2 = \frac{(1+3.796)(85.65)^2 + 3.796(53.58)^2 - 78.53^2}{(1.6717)(2.20)(10^8)} = 0.000053 \text{ m} = 0.054 \text{ mm}$$

Her bir sönümleyici üzerindeki dinamik yük = 0.000053 x 600 = 0.0324 t

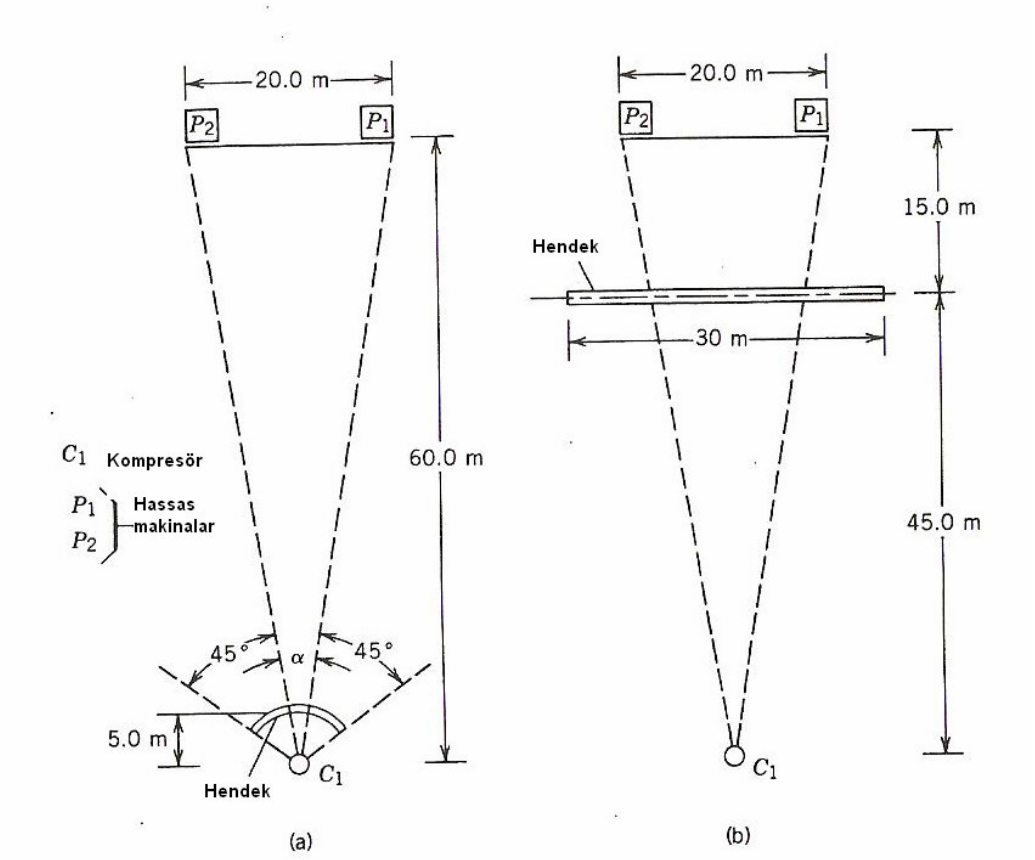
$$Z_1 = \frac{w_2^2}{m_1 \Delta(w^2)} F_0 = \frac{(53.58)^2}{(0.4403)(2.20)(10^8)}(0.5) = 0.0000148\,\text{m}$$

$= 0.0148$ mm < 0.025 mm

Z_2 genliği sönümleyici malzemesinde gerilme kontrolü için hesaplanmıştır.

Örnek 2: 1200 rpm işletme hızına sahip bir kompresör bir sanayi ünitesi içine kurulmuştur. İki hassas makina da plant üzerine daha sonra eklenmiştir. Hassas makinaları kompresörün çalışmasından kaynaklanan zararlı titreşimlerden korumak gerekmektedir. Kompresör ve makinaların yerleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.

Aktif ve pasif yalıtım durumları için efektif yalıtım sağlamak amacıyla açık hendek bariyer tasarımı yapılacaktır. Kayma dalgası hızı sondaj metodu ile 150 m / s olarak bulunmuştur.



Şekil 8.55: Uygulama

a) Aktif yalıtım b) Pasif yalıtım

(Prakash ve diğ., 1988)

Çözüm:

1. Kaynak verileri

Kompresörün işletme hızı = 1200 rpm

İşletme frekansı $f = 1200 / 60 = 20$ Hz

2. Zemin verileri

Kayma dalgası hızı $V_s = 150$ m / s

Rayleigh dalgası hızı $V_R \approx V_s = 150$ m / s

3. Kaynak merkezi ile makinaların merkezi arasındaki uzaklık

60 m dir.

4. Rayleigh dalgası uzunluğu

$$\lambda_R = \frac{V_R}{f} = \frac{150}{20} = 7.5 \text{ m}$$

Aktif Yalıtım:

5. Aktif yalıtım için hendek derinliği H

$H = 0.6\lambda_R = 0.6$ x $7.5 = 4.6$ m

6. Hendeğin yeri

Hendek kaynak merkezinden 5 m uzaklığa yerleştirilmiştir.

7. Hendeğin uzunluğu

Hendek daire parçası olarak planlanmıştır.

$\alpha = 2\tan^{-1}(10/60) = 18.92°$

Açısal uzunluk $\theta = \alpha + 45 + 45 = 108.92° = 110°$

Pasif Yalıtım:

8. Pasif yalıtım için hendek derinliği H

$H = 1.33\lambda_R$ = 1.33 x $7.5 = 9.975$ m

9. Hendeğin yeri

Hendeğin hassas makinalardan 15 m uzaklığa yerleştirilmesi planlanmıştır. Bu uzaklık kaynaktan $2\lambda_R$ ile $7\lambda_R$ arasındadır.

10. Hendek uzunluğu L

Ölçeklendirilmiş minimum alan $A_T = 5.3\lambda_R^2$

$$L = \frac{A_T}{H} = \frac{5.3x7.5^2}{9.975} = 29.88 \text{ m} = 30.0 \text{ m}$$

Bu uzaklık ayrıca P_1 ve P_2 arasındaki uzaklıktan daha fazladır.

Örnek 3: 1500 rpm işletme hızına sahip dönen bir makina söz konusudur. Beklenen yalıtım derecesi % 87.5 olduğunda 200 kg yük transfer eden makina ayaklarından biri için uygun kauçuk sönümleyici tasarımı yapılacaktır (Sönüm ihmal edilecektir).

Çözüm:

İşletme frekansı = 1500 / 60 = 25 cps

Titreşim azalması oranı $R = 0.875$

Transmisibilite $T = 1 - 0.875 = 0.125$

8.21 denklemi kullanılarak,

Frekans oranı $\zeta = 3$

Doğal frekans = 1500 / 3 = 500 cpm

Basınç deformasyonu δ,

$$\frac{300}{\sqrt{\delta}} = 500, \ \delta = 0.36 \text{ cm}$$

Rijitlik K = 200 / 0.36 = 555.6 kg / cm

55º kalitede $b = 5$ cm, $l = 10$ cm, $h = 4$ cm boyutlarında kauçuk blok seçilirse,

Alan oranı $A_r = \frac{10x5}{2x4(10+5)} = 0.4166$

$$\frac{1}{K_c} = \frac{4}{10x5}\left[\left(\frac{1}{33.129(1+2)x0.64x0.4166}\right) + \frac{1}{1111.11}\right]$$

Basınç rijitliği $K_c = 504.54$ kg / cm

Bu durumda,

Deformasyon δ = 200 / 504.54 = 0.4 cm < kalınlığın 0.2 katı

Gerilme = 200 / (5 x 10) = 4 kg / cm²

Kayma hesabı için aynı boyutlarda bir blok daha kullanıldığı varsayılacaktır.

Kayma rijitliği K_s = 8.257 x 2 x 50 / 4 = 20.426 kg / cm

Kayma deformasyonu = 200 / 206.426 = 0.97 cm < kalınlığın 0.4 katı

Kayma gerilmesi = 200 / (2x 5x 10) = 2 kg / cm²

9. MAKİNA TEMELLERİNİN YAPIM DETAYLARI

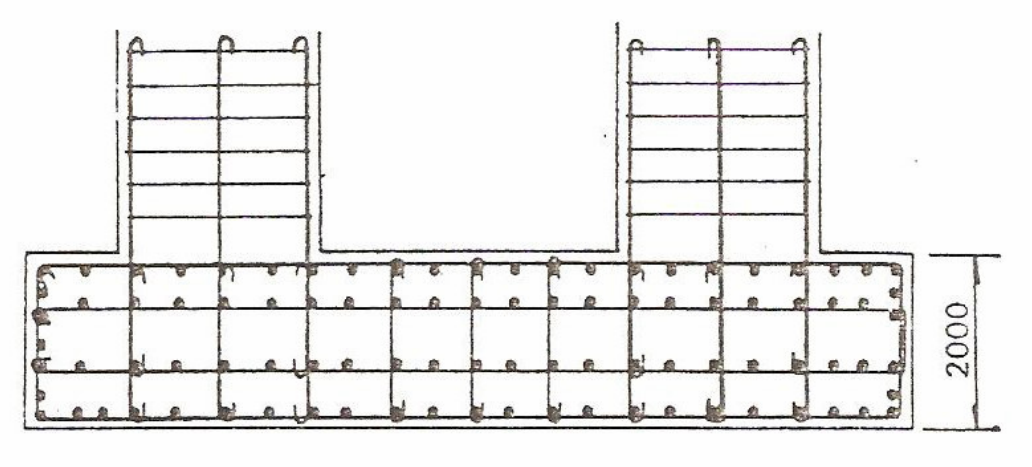
Bu bölümde tasarımcı kadar sahadaki mühendisi de ilgilendiren makina temellerinin yapım detayları genel hatlarıyla anlatılmıştır.

9.1 Temel Betonunun Dökülmesi

Temel betonu yatay tabakalarda dökülmelidir. Beton dökülmesi işlemi tek bir operasyonda bitirilmelidir ve temel gövdesinde soğuk birleşimler oluşmamasına dikkat edilmelidir. Çerçeve temeller halinde, önce taban döşemesinin betonu dökülmelidir ve üst yapının betonunun dökülmesi bir süre ertelenebilir. Birleşim noktalarının yerleri tasarımcı tarafından dikkatlice seçilmelidir ve yapının performansı açısından da uygulama mühendisi tarafından gereken önem verilmelidir. Eski beton üzerine beton dökülmeden önce, üst yüzey tel fırça ile fırçalandıktan sonra yeni beton dökülmeden önce ince bir çimento şerbeti tabakası eski yüzey üzerine uygulanmalıdır (Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976).

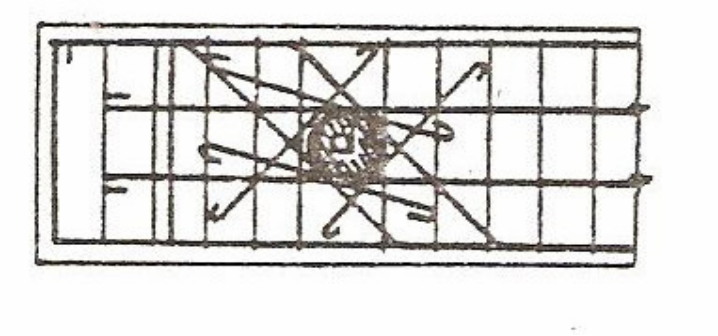
9.2 Donatı Düzenlemesi

Donatı düzenlemesi bütün yüzeyler üzerinde, boşluklar çevresinde uygulanmalıdır. Blok tip temellerde ve çerçeve temellerin taban döşemelerinde üç doğrultuda donatı kullanılır. Blok temellerde beton hacmine göre minimum donatı 25 kg / m³ olmalıdır. 16 – 25 mm çapında donatılar genellikle kullanılır. Donatının korunması için beton tabakası altta en az 75 mm, yanlarda ve üstte ise en az 50 mm olmalıdır. Çerçeve temellerin alt döşemelerinde donatı yoğunluğu 50 kg / m³ civarında olmalıdır. Dairesel boşluklar için, donatılar daire çapının 50 katı bir uzunlukta üst üste bindirilmeli ya da kesişim noktalarının ötesinde çapın 40 katı kadar uzatılmalıdır. Bütün boşluklar çevresinde çelik donatı boşluğun kesit alanının yüzde 0.5 – 0.75 i kadar olmalıdır. Bu bir kafes formu şeklinde sağlanır (Şekil 9.2). Şekil 9.1 de çerçeve temeller için taban döşemesi donatı detayı için tipik bir örnek görülmektedir.



Şekil 9.1: Çerçeve Temelin Taban Döşemesinde Tipik Donatı Detayı

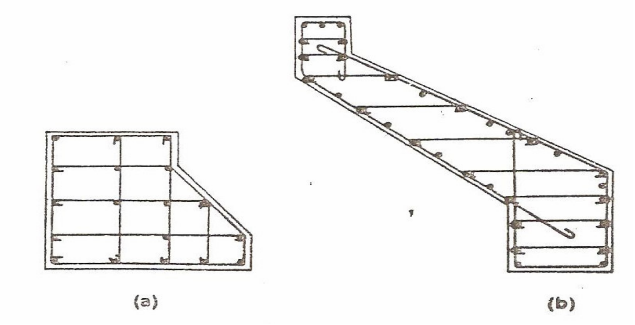
(Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)



Şekil 9.2: a Boşluğu Çevresinde Tipik Donatı Detayı

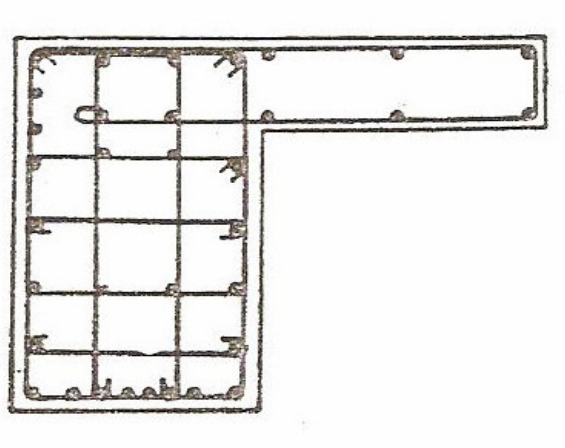
(Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)

Şekil 9.3 – 9.5 de çerçeve temeller için tipik detaylar gösterilmiştir. Şekil 9.6 ise tipik bir kolon kiriş birleşim bölgesi detayını göstermektedir.

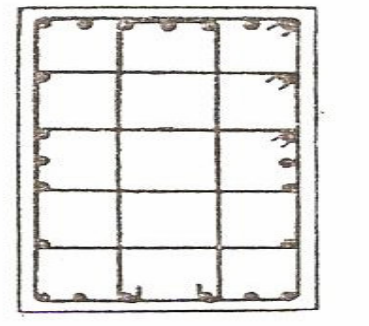


Şekil 9.3: Çerçeve Temel İçin Tipik Kiriş Donatı Detayı

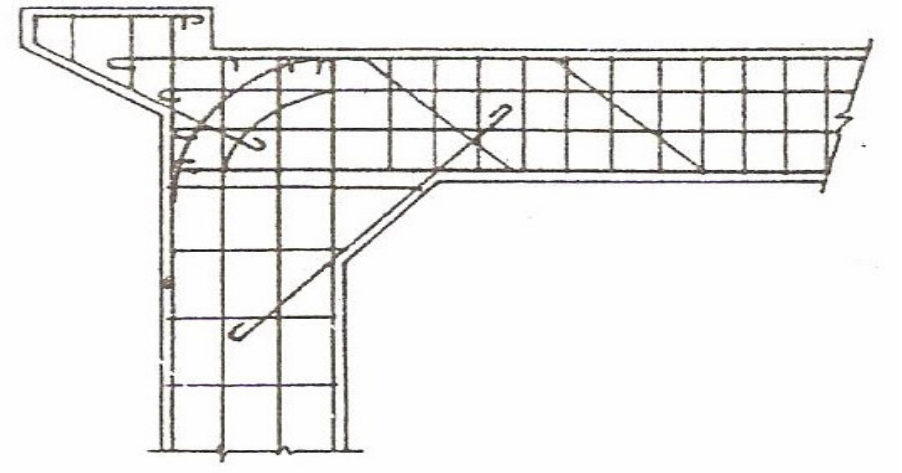
(Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)



Şekil 9.4: Boyuna Kiriş Tipik Donatı Detayı (Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)



Şekil 9.5: Tipik Kolon Donatı Detayı (Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)

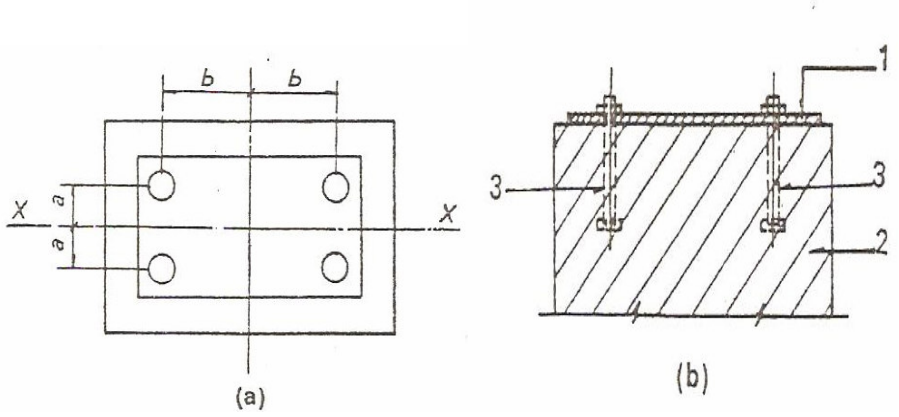


Şekil 9.6: Kolon-Kiriş Birleşim Detayı (Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)

9.3 Birleşim Elemanları

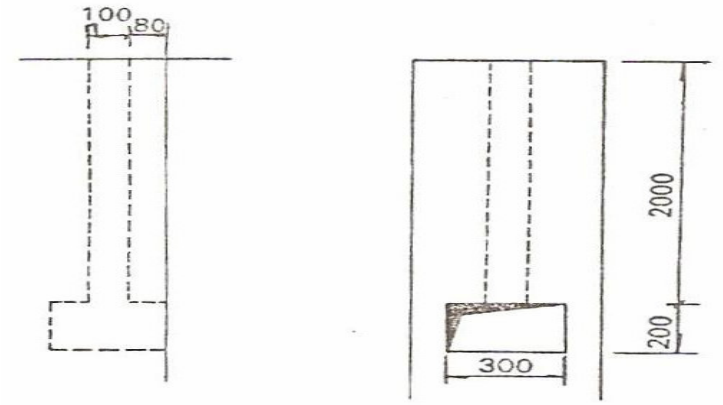
Makinalar genellikle temele taban plakaları ve ankraj bulonları ile sabitlenirler. Bu amaçla, temel betonu dökülmesi taban plakası seviyesinde durdurulmalıdır. Bu boşluk çimento şerbetiyle doldurulmalıdır. 20-30 cm genişliğinde taban plakaları için, 2-3 cm kalınlık idealdir. Daha geniş plakalar için kalınlık 5 cm ye kadar çıkabilir (Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976).

Taban plakları temele ankraj bulunları ile sabitlenir. Bunun için bulonlar taban plakasındaki deliklere uygun şekilde yerleştirilmelidir. Bu bir şablon kullanılarak yapılabilir. Bütün bulonlar şablona doğru pozisyonda vida somunları ile yerleştirilir ve betonun prizinden sonra çıkarılır. Ankraj bulonları için betonda uygun boşluklar bırakmakta uygundur. Bu boşluklar daha sonra çimento şerbeti ile doldurulur. Şekil 9.8 de bir ankraj bulonu deliği detayı görülmektedir. Cıvata delikleri tabanda yatay bir tüp şeklinde boşluk içine açık şekilde olmalıdır. Böylece deliklerin beton dökülmeden önce temizlenmesi sağlanır. Bulon delikleri çok fazla olmamalıdır. 15x15 cm boyutlarında bir delik yeterlidir. Bulon deliği köşesinden temelin en yakın köşesine 8 cm uzaklık sağlanmalıdır. Cıvata boyu çapın 30-40 katı kadar olmalıdır. Şekil 9.7 de ankraj bulonu yerleşim detayı görülmektedir. Tipik bir ankraj bulonu bağlantısı Şekil 9.9 da görülmektedir.



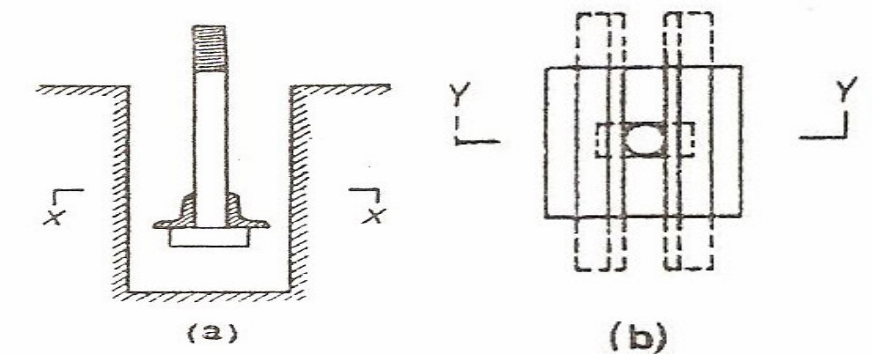
Şekil 9.7: Ankraj Bulonu Yerleşim Detayı (Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)

a) Plan b) x-x Kesiti, 1)Şablon, 2) Temel, 3) Ankraj Bulonu



Şekil 9.8: Köşeye Yakın Ankraj Bulonu Deliği Detayı

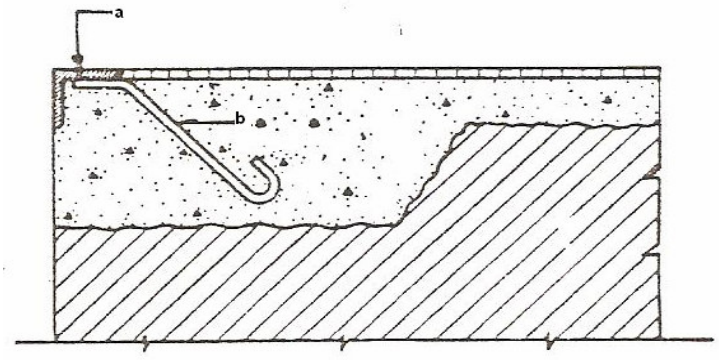
(Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)



Şekil 9.9: Tipik Ankraj Bulonu Bağlantı Detayı (Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)

a) y-y Kesiti b) x-x de Plan

Temel köşeleri çelik köşebentler ile korunmalıdır (Şekil 9.10). Bunlar genellikle 75x75x8 mm boyutundadır.



Şekil 9.10: Tipik Bir Köşe Detayı (Srinivasulu ve Vaidyanathan, 1976)

a) Köşebent b) Kanca

10. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Bu tez çalışması sonucunda, makina temellerinin tasarımı ve titreşimlerin yalıtımı ile ilgili olarak aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Zorlanmış titreşimler makinalar ile temele aktarılırlar. Burada önemli olan titreşen sistemin özel frekansı ile makinanın işletme hızı arasındaki farkın en büyük olmasıdır. Rezonans önlenmelidir. Yüksek hızda çalışan makinalar için temel sisteminin özel frekansı küçük olmalıdır. Düşük hızdaki makinalar içinse yüksek frekansta bir sistem seçmek gerekir. Sistemin frekansı temel taban alanı ile orantılı ve kütlesi ile de ters orantılıdır. Ayrıca yay katsayısı büyüdükçe temelin özel frekansı büyür. Makinanın frekansının temelin frekansından yüksek olması durumunda, makinanın çalışıp hızlanmaya başlaması evresinde geçici olarak makina ile temelin frekansı eşit olur. Yavaşlayıp hızlanma durumunda ise bu tekrarlanır. Bu durumda, sistemin frekansını makinanın frekansından yüksek seçmek gerekir. Bunun dışında genlik sınırlarına uyulmalıdır.

Büyük pistonlu makinalar, şahmerdanlar, pompalar gibi makinalar hızları 0-500 dev/ dak. arasında olan makinalar için büyük alanlı blok temel tipinin seçilmesi uygun olur. Bunlar doğrudan blok temele oturtulabilirler. Hızları 300-1000 dev/ dak. olan dizel motorları gibi makinalarda ise blok temel altına yaylar ya da sönümleyiciler kullanılmalıdır. Yüksek hızlı makinalar içinse çerçeve temeller kullanmak uygun olur.

Makina temel sisteminin istenmeyen titreşimlerden kurtulmak için titreşimler sönümlenir. Sönümleyicilerin titreşim genliği üzerinde etkin olabilmesi için, sönümleyiciler üzerindeki kütlenin doğal frekansı makinanın işletme frekansına göre olabildiğince küçük olmalıdır. Sönümleyiciler üzerindeki temelin istenen doğal frekansı uygun rijitlikte sönümleyici kullanarak ve sönümleyiciler üzerinde uygun kütlenin seçilmesi ile elde edilebilir. Yüksek hızlarda çalışan makinalar için, w_2 ve w arasındaki istenen ilişki sönümleyiciler üzerindeki temelin ağırlığında önemli bir artış yapmaksızın sağlanabilir. Düşük hızda çalışan makinalarda, sönümleyicilerin rijitliğini azaltmak ile bu ilişkiyi sağlamak çoğu zaman zordur. Çünkü bu azaltma belli bir değerden sonra gerekli mukavemetin sağlanabilmesi açısından uygun olmayabilir. Böyle bir durumda, yaylar üzerinde bir masif temel gereklidir.

Sönümleyici olarak doğal mantar, kauçuk, çelik yay, ahşap, neopren ya da pnömatik sönümleyici kullanılabilir.

İstenmeyen titreşimlerden kurtulmanın diğer bir yolu ise i yalıtımdır. Titreşen bir temel zeminde enerjinin dalga formunda ilerleyişi ile sonuçlanır. Bu enerjinin büyük bir kısmı Rayleigh dalgaları ile taşınır ki bu dalgalar yüzey dalgaları olduğundan yakın yapıları, makinaları ve insanları olumsuz etkileyebilir. Bir yapıyı Rayleigh dalgalarının bu zararlı etkilerinden korumanın bir yolu onu titreşim kaynağından uzak bir yere yerleştirmektir. Dalga hareketinin genliği kaynaktan uzaklık arttıkça geometrik sönüm ve malzeme sönümünden dolayı azalır. Rayleigh dalgalarının zararlı etkilerinden korunmanın efektif korunma ise dalga bariyerleri ile titreşimlerin perdelenmesi konsepti kullanılarak yapılır. Dalga bariyerler açık hendekler, beton, bentonit ya da kum ile dolgulu hendekler ve kazıklar olabilir. İki türlü yalıtım yöntemi vardır. Aktif yalıtım, titreşim kaynağında sağlanır. Pasif yalıtım, gelen dalgalardan yapıyı korumak üzere yapının yakınında yapılan yalıtımdır. Böylece dalga bariyerleri kaynaktan uzağa titreşim genliğinin azalmasının istendiği yerde uygulanır.

Açık hendek bariyerler ile temellerin aktif yalıtımı çalışmasını yürütmek ve bir tasarım formülü elde etmek için üç boyutlu sınır elemanlar metodu kullanılmıştır. Çalışmada elde edilen önemli sonuçlar aşağıda sıralanmıştır.

1. Rayleigh dalgası uzunluğu L_r normalizasyonda önemli bir role sahiptir. Titreşimde frekans etkisi L_r a göre normalleştirilmiş büyüklüklerin kullanılması ile hesaba katılmıştır.
2. Genlik azalması oranı sadece hendeğin derinliğine değil aynı zamanda kaynak boyutlarına ve bariyerlerin kaynaktan uzaklığına da bağlıdır.
3. Normalleştirilmiş kaynak boyutu arttıkça, B_f, zemin titreşim genliği ve bariyerlerin performansı üzerinde etkili olan kaynak üzerinde değişik noktalardan orijinini alan dalgaların karışma seviyesi artar.
4. Maksimum perdeleme etkisi için normalleştirilmiş optimum derinlik D; normalleştirilmiş kaynak boyutu, B_f, ve hendeğin pabuçtan normalleştirilmiş temiz uzaklığı, L ye bağlıdır.
5. B_f nin 0.1 den 1.0 a kadar değerleri için, hendek yerinin etkisi $B_f / L \leq 1.0$ için $L \geq 0.25$ koşulunun sağlanmasıyla önemsizdir.

B_f nin büyük değerleri için (mesela B_f =2.5), L nin etkisi daha komplekstir. Kaynak yakınında, hendek derinliği D deki değişimler genlik azalım oranı üzerinde kaynaktan uzak olma halinden daha etkilidir.

6. 0.4 den küçük ν_s değerleri için, Poisson oranı ,ν_s, etkisi ihmal edilebilir. Bununla birlikte, ν_s>0.4 için, genlik azalması oranında genel bir artış görülür (perdeleme etkisinde azalış).
7. Daire parçası hendeklerin tam daire hendekler gibi perdeleme etkisi vardır.
8. Tasarım formülü ortalama genlik azalması oranı için yeterli tahminler sağlar.

Dolgulu hendek bariyerler ile yapılan aktif yalıtımda, katı bir dalga bariyeri ile makina temellerinin aktif yalıtımının üç boyutlu analizi için direkt sınır elemanlar yöntemi kullanılmıştır. Zemine göre hem sert (beton) hem de yumuşak (zemin-bentonit) bariyer malzemesi ele alınmıştır. Hali hazırdaki analiz boyutsuz geometrik ve malzeme parametrelerinin anlamada yararlı olmuştur. Bu çalışma ile parametreler arası ilişki incelenmiştir. Çalışma ile aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir.

Beton Bariyer

1. Optimum L aralığı, $0.2 \le L \le 0.375$ dir.
2. D_{opt} değerine kadar D deki artış perdeleme etkinliğinde artış olarak sonuçlanır. D_{opt}, V_{sb}/V_{ss} oranının bir fonksiyonudur, ve küçük V_{sb}/V_{ss} değerlerinde ayrıca W ya bağlıdır.
3. V_{sb}/V_{ss} arttıkça beton bariyerin perdeleme etkinliği artar. V_{sb}/V_{ss} nin 5 den büyük ve tercihen 7.5 ya da daha fazlası olması önerilir. V_{sb}/V_{ss}=10 un ötesinde perdeleme etkinliğindeki düzelme dikkate alınmaz.
4. W arttıkça, beton bariyerin genlik azalması yeteneği artar. Etki bariyerlerin kaynağa yakın durumlarında artar (L=0.1 gibi). Bununla birlikte, W=0.5 den ötede genişlik etkisi minimumdur.
5. 0.25 ile 0.4 arasında zeminin Poisson oranı için, genlik azalması oranı değişimi küçüktür. Fakat 0.4 den sonra bir çok durumda perdeleme etkinliği ani olarak düşer.
6. Yoğunluk oranı ve bariyerin sönüm özellikleri oldukça küçüktür ve $V_{sb}/V_{ss} \ge 10$ için pratikte önemsizdir.

Zemin-Bentonit Bariyer

1. V_{sb}/V_{ss} oranı 0.2 ya da daha küçük olmalıdır. Bunun için dolgu malzemesi olarak zemin-bentonit karışımı kullanılmalıdır.
2. 0.8 ya da daha büyük D değerleri ile efektif perdeleme elde edilir. $(0.1 \le \overline{A}_{rr} \le 0.4)$
3. L, W ve V_{sb}/V_{ss} nin bir fonksiyonudur.
4. Yoğunluk oranının etkisi ihmal edilebilir.

Periyodik hendeklerle yalıtımda ise, önerilen metot makina titreşimlerinin sebep olduğu elastik dalgaların perdelenmesi için periyodik sığ hendeklerin kullanılmasıdır. Asimptotik açılımların kullanılarak problemin analitik yoldan çözümü dalga ilişkisini çift mod denklemler formunda ifade edilmesini sağlar. Yansıma katsayısı spektrumunun incelenmesi, modların toplam yansımasının sadece rezonans halinde başarılabileceğini göstermektedir. Hendeklerin derinliğinin artırılması etkisi de çalışılmıştır.

KAYNAKLAR

Demir, H. ve Öztürk, T., 1992. Makina Temellerinin Tasarım ve Hesabı, İ.T.Ü İnşaat Fakültesi Matbaası, İstanbul.

Celep, Z. ve Kumbasar, N., 2001. Yapı Dinamiği, Rehber Matbaacılık, İstanbul.

Srinivasulu, P. and Vaidyanathan, C.V., 1976. Handbook Of Machine Foundations, Structural Engineering Research Centre, Madras.

Prakash, S. and Vijay, K.P., 1988. Foundations For Machines: Analysis And Design., Wiley, New York.

Al-Hussaini, T.M., Ahmad, S. **and Fishman, K.L.,** 1996. Investigation On Active Isolation Of Machine Foundations By Open Trenches, *Journal Of Geotechnical Engineering,* **122.6,** 454-461.

Al-Hussaini, T.M., Ahmad, S. **and Fishman, K.L.,** 1996. Active Isolation Of Machine Foundations By In-Filled Trench Barriers. , *Journal Of Geotechnical Engineering,* **122.4,** 288-294.

Hawwa, M.A., 1998. Vibration Isolation Of Machine Foundations By Periodic Trenches., *Journal Of Engineering Mechanics,* **124.4,** 422-427.

Woods, R.D. and Richart, F.E., 1967. Screening Of Surface Waves By Trenches., *J Proc. Int. Symp. Wave Propag. Dyn. Prop. Earth Mater., Albuquerque,* NM, 275-284.

Woods, R.D., Barnett, N.E. and Sagessor, R., 1974. A New Tool For Soil Dynamics., *J. Geotech. Eng. Div.,* **100 (GT-11),** 1231-1247.

Segol, G., Lee, P.C. and Abel, J.F., 1978. Amplitude Reduction Of Surface Waves By Trenches., *J. Eng. Mech. Div.,* **104 (EM3),** 621-641.

Lysmer, J. and Wass, G., 1972. Shear Waves In Plane Infinite Structures., *J. Eng. Mech. Div.,* **98 (EM1),** 85-105.

Haupt, W.A., 1977. Isolation Of Vibrations By Concrete Core Walls*., Proc. Int. 9th Conf. Soil Mech. Found. Eng.* , Tokyo, Vol. 2, 251-256.

May, T.W. and Bolt, B.A., 1982.The Effectiveness Of Trenches In Reducing Seismic Motion., *Earthquake Eng. Struct. Dyn.,* **10,** 195-210.

Woods, R.D., 1968.Screening Of Surface Waves In Soils., *J. Soil Mech. Found. Div.,* **94(SM-4),** 951-979.

Barkan, D. D. , 1962. Dynamics Of Bases And Foundations., McGraw-Hill, New York.

Bescos, D.E., Dasgupta, B. and Vardoulakis, I.G., 1985.Vibration Isolation Of Machine Foundations., *Proc. Symp. Vib. Prob. Geotech. Eng. Am. Soc. Civ. Eng.,* Detroit, 138-151.

ÖZGEÇMİŞ

Ferhat Gül, 1981 yılında Elazığ'da doğdu. İlk Öğrenimini Elazığ Atatürk İlk Okulu'nda 1992 yılında, orta öğrenimini Elazığ Atatürk Orta Okulu'nda 1995 yılında ve lise öğrenimini Elazığ Balakgazi Lisesi'nde 1999 yılında tamamladı. 1999-2000 öğretim yılında kaydolduğu İstanbul Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden 2004 yılında mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Yapı Mühendisliği Yüksek Lisans öğrenimine başladı.

Ocak-2007