

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ (ENERJİ) SANTRALİ TEMELLERİNİN
SİSMİK TASARIMI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

ÖZGÜR BAŞARAN ERDEM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEPREM VE YAPI BİLİMLERİ

GEBZE

2010

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ

MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**GÜÇ (ENERJİ) SANTRALİ TEMELLERİNİN
SİSMİK TASARIMI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA**

DANIŞMAN

PROF.DR.BİLGE SİYAHİ

ÖZGÜR BAŞARAN ERDEM

YÜKSEK LİSANS TEZİ

DEPREM VE YAPI BİLİMLERİ

GEBZE

2010

ÖZET

TEZİN BAŞLIĞI : GÜÇ (ENERJİ) SANTRALİ TEMELLERİNİN SİSMİK TASARIMI ÜZERİNE BİR ÇALIŞMA

YAZAR ADI : ÖZGÜR BAŞARAN ERDEM

Güç(enerji) santralleri, hayat hatları olarak adlandırılan ve depremde sonra hiç ara vermeden işlemeye devam etmesi gereken ya da devre dışı kalsa bile kısa sürede devreye alınması gereken sistemlerdendir. Ayrıca enerji santrallerinin sadece depremin bulunduğu bölgede değil, aynı zamanda bütünleşik çalışan bütün ülke enerji sistemi üstünde etkisi vardır. Enerji santrallerinde, deprem sonrası oluşabilecek hasarlar, tüm ülkenin enerji sisteminde ekonomik olarak ciddi kayıplar doğurabilir. Bu nedenle bu hasarlardan sakınılması için gerekli tasarım kriterleri ve enerji santrallerinin ana elemanı olan türbin ünitelerinin üreticilerinin verdiği dinamik limit değerleri dikkate alınmalıdır.

Bu tez kapsamında; Güç(enerji) santrallerinin yer seçimi, güç santrallerinin tipine ve zemin koşullarına göre temel tiplerinin seçilmesi, dinamik yüklere maruz temellerin tasarım kriterleri, yapıların sismik performansını artırıcı önlemler irdelenmiştir. Son bölümde; tabla tipi temel yapılarında kullanılan sismik izolatörlerin, deprem yükü altındaki temele ait frekans ve deplasman değerlerindeki etkisi gözlenmiştir.

SUMMARY

**THESIS TOPIC : A STUDY ON SEISMIC DESIGN OF FOUNDATIONS FOR
POWER (ENERGY) PLANTS**

AUTHOR NAME : ÖZGÜR BAŞARAN ERDEM

Power (energy) plants are one of the lifeline systems which shall not be out of operation after earthquakes or in case of shut down shall be re-operated after a very short time period. Besides, power plants have effects not only at the region they are located, but also have effects on all country whose energy system operates interconnected. Hazards that may arise after earthquakes at power plants may yield to serious economic loss at whole country's energy system. Thus, the design criteria against these hazards, and limit states given for turbine units by turbine manufacturers, (whereas turbines are the main elements of power plants), shall be taken into account.

In scope of this thesis, the following subjects are discussed; the location selection of power(energy) plants, the selection of foundation types according to type of power plant and soil conditions, design criteria for foundations subjected to dynamic loads, and measures to improve the seismic performance of structures. Finally; the effect of seismic isolators was observed which are used in table type foundation under seismic loads.

TEŞEKKÜR

Bu tez konusunu belirlememde, Türkiye’deki enerji yatırımları kapsamında Bandırma Kombine Çevrim Santrali (919 MW) inşa ettirerek ülkenin gelişmesine katkı sağlayan EnerjiSA’ya,

Yüksek Lisans öğrenimimin tamamında bilgisini ve zamanını paylaşarak yönlendiren Sn.Yrd. Doç.Dr. Bülent Akbaş’a,

Tezimin başından sonuna desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sn. Prof. Dr. Bilge Siyahi’ye,

İçten teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

	<u>Sayfa</u>
ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	x
ŞEKİLLER DİZİNİ	xii
TABLolar DİZİNİ	xiii
ÇİZELGELER DİZİNİ	xiv
1. GİRİŞ	1
1.1 Çalışmanın Amacı	1
1.2 Kapsam ve İçerik	2
2.DİNAMİK YÜKLER İÇİN TEMEL ve EKİPMAN TİPLERİ	4
2.1 Genel Konular	4
2.2 Dinamik Yük Yaratan Makine Tipleri	5
2.3 Dinamik Yük Yaratan Makineler için Önerilen Temel Tipleri	6
3. TEMEL TASARIMI KRİTERLERİ	10
3.1 Tasarım kriterlerine genel bakış	10
3.2 Temel ve ekipman yükleri	11
3.2.1 Statik yükler	11
3.2.2 Rotatif makinelerin yükleri	13
3.2.3 Pistonlu makine yükleri	14
3.2.4 Darbeli makine yükleri	15
3.2.5 Yük koşulları	15
3.2.6 Yük kombinasyonları	16
3.2.7 Temel Elastisitelerinin Rotordinamik Hesaplara Dahil Edilmesi	17

3.3 Zemin mekaniği özellikleri	19
3.3.1 Poisson Oranı, ν	19
3.3.2 Dinamik kesme modülüsü, G	19
3.3.3 Zemin Sönümleme Özellikleri	22
3.4 Titreşim Performans Kriterleri	22
3.5 Beton performans kriterleri	25
3.6 Makine temel sistemleri için performans kriterleri	25
4. TASARIM METOTLARI	27
4.1 Tasarım metotlarına genel bakış	27
4.1.1 Genel Değerlendirme	27
4.1.2 Dinamik yüklerle tasarım metotlarının özeti	28
4.1.2.1 Pratik Metot	29
4.1.2.2 Eşdeğer statik yük metodu	30
4.1.2.3 Dinamik analiz	33
4.2 Destekleyen ortamca yaratılan atalet (Empedans)	35
4.3 Titreşim analizi	35
4.3.1. Formüller ve amprik yaklaşımlarla analiz	35
4.3.2 Bilgisayar ortamında dinamik analiz	36
4.4 Yapısal temel tasarımı ve beton özellikleri	36
4.5 Sismik izolasyon sistemleri kullanılması ve avantajları	37
4.5.1 Doğrudan destek sistemleri	38
4.5.1.1 Lastik dolgu tipi sönümleyiciler	38
4.5.1.2 Visko-sönümleyicilerle birleşik yay sistemleri	39
4.5.1.3 Hava destekleri	39
4.5.2 Atalet Blok Sistemleri	40
4.5.3 Yarı Aktif Ayarlanabilir Sönümleme Sistemleri	40

5. SÖNÜMLEME CİHAZLARI ÖZELLİKLERİ ÜSTÜNE TEORİK ÖZET	41
5.1 Modal Sönümleme Oranı ζ_i ve Efektif Sönümleme Katsayısı β_{eff}	41
5.2 Pratik İzolasyon Sistemlerinin Davranış Grafikleri	43
5.3 Sönümleme Cihazlarının Uygulama Örnekleri	44
6. DİNAMİK TEMEL TASARIMDA UYGULANAN SERVİS LİMİT DURUMLARI KONTROLLERİ	46
6.1 Dinamik Parametrelerin Kontrolü	46
6.2 İşletme Sırasındaki Titreşim Deplasmanlarının Belirlenmesi	47
6.3 İşletme Sırasındaki Titreşim Deplasmanlarının Değerlendirilmesi	47
6.4 Temelin Dinamik Rijitliği Kontrolü	48
6.5 Temelin Statik Rijitliği	49
7. SAP 2000 MODELİ İLE BİR MAKİNE TEMELİNİN MODELLENMESİ VE DİNAMİK ANALİZİNİN YAPILMASI	50
7.1 Tabla Tipi Temel Sisteminin Geometrisi	51
7.2 Temel Sisteminin SAP Modeli	52
7.2.1. Malzeme Özellikleri	52
7.2.2. Temelin Geometrisi	52
7.2.3 Temele Etki Eden Kuvvetler	53
7.2.4 Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi ile Deprem Analizi	56
7.2.5 Kolon Başlıklarında Uygulanan İzolatörlerin Özellikleri	57
7.3 Zaman Tanım Alanında Yapılan Analizle Bulunan Değerlerin Genel Yorumu ve Sonuç	58
7.3.1 Sistemin Deplasman ve Frekans Değerlerinin Yorumlanması	58
7.3.2 Sonuç ve Öneriler	61
8. KAYNAKLAR	62
9. ÖZGEÇMİŞ	63

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

g	:	Yer çekimi ivmesi
ACI	:	American Concrete Institute
DIN	:	Deutsches Institut für Normung
P_s	:	Makinenin şafta aktardığı güç kW
f_o	:	Rotasyon hızı
K	:	Kompleks dinamik rijitlik matrisi
u	:	Kompleks vektör şiddetleri
f	:	Kompleks kuvvet vektörü
K_{sub}	:	Yapının dinamik rijitlik matrisi
ν	:	Poisson oranı
G	:	Dinamik kesme modülü
V_s	:	Zemindeki kesme kuvveti dalga hızı, m/s
ρ	:	Zemin kütle dansitesi, kg/m ³
ASTM	:	American Society for Testing and Materials
e_v	:	Boşluk oranı
σ_o	:	Olası sıkışma basıncı
G_{max}	:	Maksimum kesme modülü
ΔA	:	Döngüsel olarak çevrelenen alan
W	:	Birim deformasyon enerjisi
B_μ	:	Malzeme sönümlemesi
D_z	:	Sönümleme %
ISO	:	International Organization for Standardization
f_n	:	Doğal Frekans
f_o	:	İşletme Frekansı
V	:	Amplifikasyon faktörü
G	:	Balans kalite seviyesi
e	:	mak.ek dış merkezlik, mm

ω	:	maks.açısal hız, rad/s
k_v^*	:	Düşey empedans
k_u^*	:	Yatay empedans
k_ψ^*	:	Sarsılma empedansı
k_η^*	:	Tork empedansı
ζ_i	:	Modal Sönümlleme Oranı
β_{eff}	:	Efektif Sönümlleme Katsayısı
C	:	Viskoz Sönümlleme Oranı
Ω	:	Osilasyon frekansı
s	:	Titreşim deplasmanı, μm
v	:	Titreşim hızı, mm/s
K_I	:	İzolatörün efektif rijitliği
L	:	Rotatif ağırlık
f_m	:	Rotasyon hızı
ω_m	:	Açısal frekans

ŞEKİLLER DİZİNİ

<u>Sekil</u>		<u>Sayfa</u>
2.1	: Blok Tipi Temel	6
2.2	: Birleşik Blok tipi Temel	6
2.3	: Tabla üstü temeller	7
2.4	: Tabla üstü izolatörlü temeller	7
2.5	: Yaylı sistem üstündeki temeller	8
2.6	: Yapının içinde eylemsizlik (atalet) bloğu	8
4.1	: Dinamik Ekipman Temeli altına uygulanmış elastomerik izolatörler	38
4.2	: Entegre vikso üniteli yaylı izolatör	39
4.3	: Havalı tip izolatör	39
4.4	: Bina tepesine yerleştirilmiş tipik atalet bloğu	40
5.1	: Tek Serbestlik Dereceli Sistemde İzolatör Uygulanması	41
5.2	: İki Serbestlik Dereceli Sistemde İzolatör Uygulanması	42
5.3	: Değişik İzolatör Tipleri için P(t)-U(t) grafikleri	44
5.4	: İzolatör uygulanmış türbin temeli tipik kesit	44
5.5	: İzolatör uygulanmış temele 2000 tonluk gaz türbinin yerleştirilmesi	45
5.6	: Türbin temelinin altına yerleştirilen entegre viskoz sönümleyecili yay sistemi	45
7.1	: Tipik Türbin Tabla Temeli Kesiti	51
7.2	: Modellenen tabla tipi türbin temeli planı	51
7.3	: Modellenen tabla tipi türbin temeli A-A kesiti	51
7.4	: 3D Tabla temel görünümü	53
7.5	: Makine Kuvvetlerinin Etki Ettirilmesi	55
7.6	: Hareketli Yükün Etki Ettirilmesi	55
7.7	: 1999 İzmit Depremi Gebze İstasyonu Doğu – Batı Yer İvmesi Grafiği	56
7.8	: Kolon – İzolatör – Tabla Modeli	57

TABLolar DİZİNİ

<u>Tablo</u>		<u>Sayfa</u>
3.1	: Dinamik ve statik tasarım yük tablosu	16
3.2	: Çeşitli zemin tipleri için karakteristik G değerleri	21
3.3	: Çeşitli zemin tipleri için karakteristik sönümleme değerleri Dz	22
4.1	: Basitleştirilmiş tasarım için ön şartlar	32
4.2	: Basitleştirilmiş tasarım prensipleri uygulama tablosu	33
7.1	: Çerçevenin geometrik özellikleri	52
7.2	: Çerçevenin ağırlık özellikleri	53
7.3	: Çerçeveye etki eden makinelerin yayılı yükleri	54
7.4	: Makine dengelenmemiş yükleri	54
7.5	Sismik İzolatörlere ait yay sabitleri	57
7.6	: Lineer ve Açısal deplasmanlar	58
7.7	Frekans ve Periyot değerleri	59

ÇİZELGELER DİZİNİ

<u>Cizelge</u>		<u>Sayfa</u>
3.1	: Geçişgenlik oranı	24
6.1	: Sönümlleme D-Amplifikasyon Faktörü İlişkisi	47
6.2	: Dinamik rijitlik – frekans ilişkisi	48

1. GİRİŞ:

1.1 Çalışmanın Amacı

Enerji hatları ve enerji üretim tesisleri, hayat hatları olarak adlandırılan ve depremden sonra hiç ara vermeden işlemeye devam etmesi gereken ya da devre dışı kalsa bile kısa sürede devreye alınması gereken sistemlerden biridir. Depremden zarar görmesi muhtemel; hayat hatlarının, genel tanımını yapmak gerekirse; ulaşım kategorisindekiler; karayolu, demiryolu, köprüler, altyapı kategorisindekiler; elektrik, su, gaz, atık su ve iletişim kategorisindekiler; telefon, internet olarak sıralanabilir. Deprem yükleri ile bu hatlarda; zemin deformasyonları, sıvılaşma, yer değiştirmeler ve suya doyan kumlu zeminler nedeniyle geniş çaplı hasarlar oluşur.

Özellikle, 1995 Kobe depremi ve 1999 İzmit depreminden sonra hayat hatlarının da belli sismik performans göstermesi gerektiği ortaya çıkmıştır. (Park R., 2000) Çünkü deprem kadar, deprem sonrasında, deprem bölgesine ulaşılması, ortaya çıkan hasarın ortadan kaldırılması, kentlerin ve yaşayanlarının üzerindeki etkilerinin azaltılması gerekmektedir. Farklı hayat hatlarının birbiriyle ilişkili çalıştığı da düşünülürse, hayat hatlarının modellenmesi, görselleştirme teknikleri ve karar destek sistemleri ve çoklu hasar durumlarında tekil performansının değerlendirilmesi gerekir. (Rourke D., Holzer T., Rojahn C., Tierney K.,2008)

Ayrıca enerji sistemlerinin sadece depremin bulunduğu bölge üstünde değil, aynı zamanda bütünleşik şekilde çalışan bütün ülke enerji sistemi üstünde etkisi vardır. Deprem sonrasında enerji santrallerinde meydana gelebilecek hasarlar ve enerji kesintisi; tüm ülke ekonomisi için ciddi kayıplar doğurabilir.

Bu nedenle; enerji santrallerinin yer seçiminden başlayıp, yapısal sistemin tasarımına uzanan tüm süreç deprem mühendisliğinin konusu içine girer. Bu süreçte birçok farklı disiplinle bilgi paylaşımı gerekecektir. Makine işletmecilerin, geoteknik ve yapısal tasarım mühendislerinin ve ekipman üreticisinin beraberce tüm parametreleri belirlemesi ve ortak şekilde çalışması gerekir.

Bu tezde esas olarak; temel yer seçimine etki eden parametrelerin ve temel tasarımı dikkate alınması gereken kriterlerinin incelenmesi amaçlanmıştır.

1.2 Kapsam ve İçerik

Enerji Santralleri; ağırlıkları 2.000 ton'a ulaşan gaz ve buhar türbinlerini taşıyan yapıları ve bu yapıların temellerini içerir. Bu yapılar aynı zamanda dinamik yükler taşımaktadır. Bu çalışma kapsamında; yapıların ve temellerin dinamik yükler altında tasarımı dikkate alınması gereken kriterler incelenmektedir.

Ağır makinelerde; rotatif, pistonlu yada darbeli kütlelerin yarattığı, dinamik kuvvetlere ve bunların yol açtığı titreşimlere dayanacak temel sistemlerine ihtiyaç vardır. Bu temel sistemleri; aynı zamanda deprem etkisiyle ortaya çıkacak yüklere ve deplasmanlara karşı makine sistemini korumalıdır. (Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T.,2008)

Deprem sırasında ve sonrasında; stabilite ve servis sağlayabilirlik kriterlerini sağlamak esas amaçtır. Kuvvetli depremlerin olduğu bölgelerde, elektrik enerjisi, yaşamsal tesisler (hastaneler ve enerji santralleri) için birinci derecede önemlidir. Yerel standartlar ve düzenlemeler belli şartlar getirirse de, genelde enerji santralinin sahibi depremden sonra santralin çalışabilirliği hakkında karar verir. Bu şartlar;

- Orta dereceli bir depremde makinelerin durmadan çalışması ve güçlü bir depremde bir gün sonra devreye alınabilmesi
- Güçlü bir depremde dahi kendiliğinden kapanma durumunun yaşanmaması,

olarak özetlenebilir.

Santralin bulunduğu saha için belirlenen yer ivmesi en önemli noktadır. Makine üreticisi genelde 0.4g ile 0.8g arasında bir makine ivmesine izin verir. Bu durumda muhtemel hasarlar; müsaade edilen shaft gerilmelerinin aşılması durumunda ortaya çıkan rotor arızası, aşırı mesnet basıncı nedeniyle, mesnetlerdeki hasarlar, rotor bıçaklarının dış çerçeveye dokunması, yüksek bağıl deplasmanlar nedeniyle, buhar ya da diğer tip boruların kopması, yapısal elemanların (örneğin makine gövdesi ile ara katların) çarpışması olacaktır.

Yukarıda açıklanan hasarların önlenmesi için; türbin binasındaki ve temellerindeki stabilitenin önemi açıktır. Genelde zemindeki ivme ile makine gövdesi arasındaki ivme için 3-4 gibi bir büyütme faktörü uygulanır. Bu da zeminde oluşan 0.2g'lik bir ivmenin, makinede 0.8 g olarak yansıması ve müsaade edilen limitlerin aşılması demektir. Özellikle, tabla tipi temelerde müsaade edilen ivmelere çabucak ulaşılır. Bir çok depremde; etkin yer ivmeleri 0.2g'den de büyüktür. Sismik izolatörlerin ya da elastik desteklerin varlığı; tabla temellerin tepki ivmesini azaltacaktır. (Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T.,2008)

Bütün bu konular tez kapsamında; temellerine dinamik yük aktaran makineler için, çeşitli tipte temellerin tasarım kriterleri, tasarım metotları, performans ve servis kriterleri başlıkları altında incelenmiştir. Tasarım ve performans kriterlerinin açıklandığı bölümlerin ardından; tezin içinde sunulan modelde, tabla tipi bir türbin temelinde mesnetlerde izolatör kullanılmasından önce ve sonra temelin titreşim frekanslarındaki ve deplasmanlardaki değişimler izlenmiştir.

2. DİNAMİK YÜKLER İÇİN TEMEL ve EKİPMAN TİPLERİ

2.1 Genel Konular

Deprem bölgelerinde; temellerin yer seçiminin doğru yapılarak, makinenin ve temelin yarattığı toplam yükün, zemin emniyet gerilmesini aşmaması birinci olarak dikkate alınması gereken konudur. Makinelerin konumlandırılırken,. dinamik kuvvetlerin merkezi ile makine-temel sisteminin ağırlık merkezinin arasındaki farkın minimize edilmesi için yere yakın şekilde yerleştirilirler. Dinamik ekipmanların temel seçiminde aşağıdaki faktörler dikkate alınmalıdır. (ACI 351.3R-04)

1. Zemin özellikleri, topografya, deprem bölgesi, iklim ve diğer çevresel etkiler.
2. Ekipmanının alt çerçevesini oluşturan öğeler; örneğin silindir şasinin yerleşimi, eksoz çıkışları vb.
3. Ekipmanın çalıştırılması esnasında gerekli olan bağlantılar ve borular ilgili olan geometrik kısıtlamalar
4. Tüm statik ve hareketli yükler; ekipmanın kendi ağırlığı ya da montaj, işletmeye alma, bakım ya da devreden çıkarma sırasında ortaya çıkabilecek tüm yükler.
5. Ekipmanın montajı sırasında ortaya çıkabilecek şantiye yerleşimi ve ekipmanları ya da yapım yöntemleri ile ilgili sınırlamalar.
6. Ekipmanının işletilmesi sırasında ortaya çıkan erişebilirlik, zemin oturması, ısısal etkilerle maruz kalma gibi değerlerdeki kısıtlamalar.
7. Ekipmanın bakımı için gerekli olabilecek şartları oluşturulması, tesis içi kreyn varlığı, yer değiştirme ihtiyaçları.
8. Yerel şartnamelerde yer alan koşullar; örneğin yüksek depremsellik içeren bölgelerde kazık başlarının başlık kirişi ile birleştirilmesi.
9. Yatırım maliyeti, ekonomik ömür, yenileme ya da tamir masrafları gibi ekonomik faktörler.
10. İkincil kontaminasyon ya da özel beton kaplama ihtiyaçları ile ilgili çevresel etkiler.
11. Bazı makinelerin, özellikle büyük pistonlu makinelerin makineye mukavemet ve rijitlik kazandırmak üzere temele dayanması.

2.2 Dinamik Yük Yaratan Makine Tipleri

2.2.1 Rotatif makineler

Rotatif makineler; gaz ve buhar türbinleri, diğer genleştiriciler, turbo pompalar ve kompresörler, fanlar, motorlar ve santrifüjler olarak sıralanabilir. Rotatif parçanın kütle merkezi ile rotasyonun merkezi çakışmadığı zaman; dengelenmemiş kuvvetler ortaya çıkar. Bu dinamik kuvvet; şaftın kütlesine, rotasyon hızına ve makineyi taşıyan yapının ağırlık merkezi ile makinenin ağırlık merkezi arasındaki sapmaya bağlıdır. Rotatif makinelerde; temellerin tasarımında belli bir titreşimin altında kalınması sağlanarak, bu şekilde makine performansının sürekliliği hedeflenir.

2.2.2 Pistonlu makineler

Kompresörler ya da dizel motorlar gibi pistonlu makineler de, bir pistonun içinde hareket eden piston başlığı, piston içindeki dönen bir şaft krank'ından oluşur. Bu sistem kendi içinde sıvı kinematığı ile etkileşir.

Silindir kendi rotasyonu ile belli frekanslarda, birbirinden bağımsız olarak dengelenmemiş kuvvetler üretir. Rijit bir silindir ve çerçevede bu kuvvetler kendi içinde dengelenir. Ancak, büyük makinelerde deformasyonlar nedeniyle mesnetlere ve temellere ciddi miktarda yük aktarılır.

2.2.3 Darbeli makineler

Şahmerdanlar, metal şekillendiren presler gibi makineler, düzenli darbelerle çalışır ve ekipmanın değişik parçalarının arasında şoklar iletir. Bu şok yükleri genelde ekipmanın temel sistemine aktarılır ve tasarımda bu dikkate alınmalıdır. Bu şoklar nedeniyle ortaya çıkan titreşimler, bir sonraki darbeye kadar sönümlenmelidir.

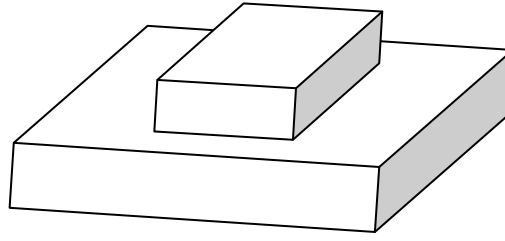
2.2.4 Diğer Makine Tipleri

Kaya kırıcılar ve metal kıyıcılar gibi diğer makineler dinamik yükler üretir ve bu yükler rotasyonel yüklerin yanında, tekil işlemler nedeniyle ortaya çıkan rastgele yükler de oluşur.

2.3 Dinamik Yük Yaratan Makineler için Önerilen Temel Tipleri

2.3.1 Blok tipi temeller

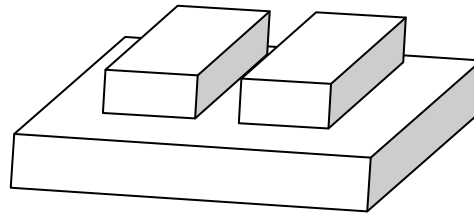
Bu tip bir temel, çevresindeki zeminin kalitesine bağlı olarak seçilebilir. Blok temeller hemen her zaman rijit temeller olarak tasarlanır. Temelin dinamik tepkisi, dinamik yük, temelin kütlesi, boyutları ve zemin özelliklerine bağlı olacaktır.



Şekil 2.1: Blok Tipi Temel

2.3.2 Birleşik blok tipi temeller

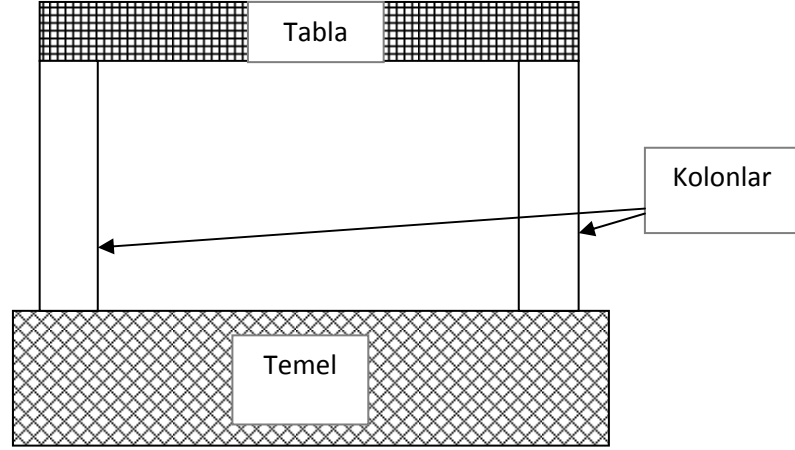
Bu tip temeller, yakın şekilde yerleştirilmesi gereken makineler için kullanılır.



Şekil 2.2 Birleşik Blok tipi Temeller

2.3.3 Tabla üstü temeller

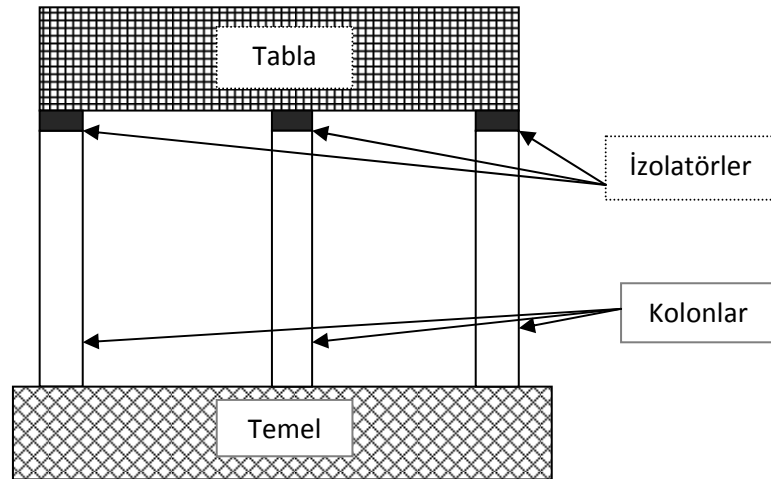
Elektrik jeneratörleri gibi büyük türbinleri içeren ekipmanlar için yükseltilmiş tablalar temel olarak kullanılır. Yüksekteki yerleştirilen türbin kanalların, boruların, diğer yardımcı ekipmanların yerleştirilmesini sağlar.



Şekil 2.3 Tabla Üstü Temel

2.3.4 Tabla üstü izolatörlü temeller

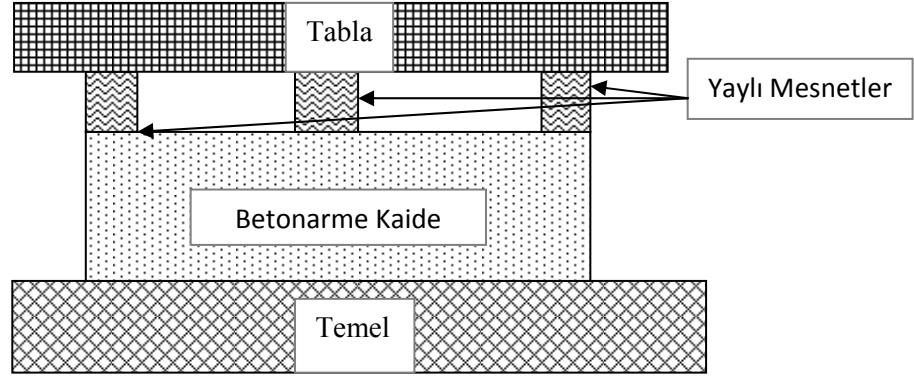
Dinamik yüklere tepkinin minimize edilmesi için tabla kolonların üstüne izolatörler (yaylar ya da damperler) yerleştirilir.



Şekil 2.4 Tabla Üstü İzolatörlü Temel

2.3.5Yaylı sistem üstündeki temeller

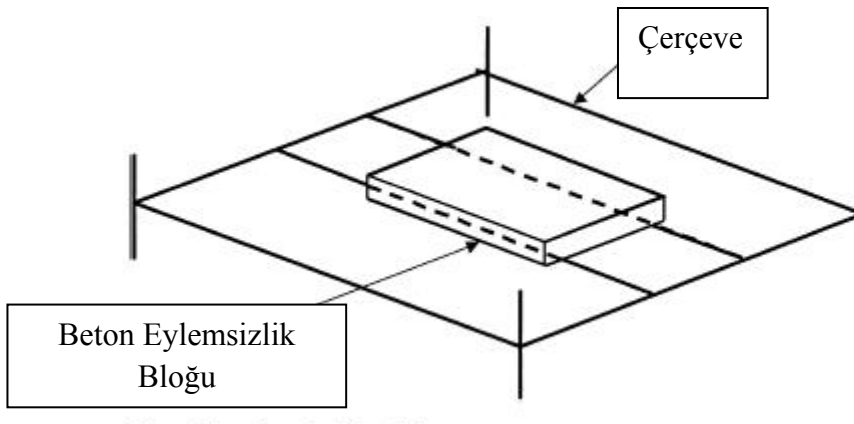
Genel olarak pompalar bağlantı borularından gelen ısıyı minimize etmek için yayların üstüne yerleştirilir. Yay tipi izolatörler blok temelle desteklenir. Bu düzenleme tabla üstü izolatörlü temellere benzemektedir.



Şekil 2. 5 Yaylı sistem üstündeki temeller

2.3.6Yapının içine eylemsizlik (atalet) bloğu yerleştirilmesi

Dinamik ekipmanının boyutlarının, yapının tümüne oranla küçük kaldığı durumlarda; eylemsizlik (atalet) bloğu yerleştirilerek direnç gösteren eylemsizlik artırılır. Bu şekilde doğal frekans; f_n , makinenin işletim hızlarına göre değişikliğe uğratılır.



Şekil 2.6 Yapının içinde eylemsizlik (atalet) bloğu

2.3.7Kazık temeller

Yukarıda temel tipleri, gerektiğinde kazıkların üstüne yerleştirilebilir. Temel tasarımıda; eğer yapıdan aktarılan yüklerle zemin emniyet gerilimi aşılyorsa, ya da temelde aşırı oturmalar söz konusuysa, temellerin altında kazık kullanmak gerekli olacaktır. Makinelerden ve temelden temele aktarılan yükler hesaplanarak, zeminde yeterli sayıca kazık çakılarak, radye temelle birleştirilir.

3 TEMEL TASARIMI KRİTERLERİ

20. Yüzyılın ilk yarısında sadece statik analizi baz alan, ve ölü yükler ve makinenin ağırlığının 3 ila 5 katı bir ağırlığı düşey, eşdeğer bir statik yük olarak etki ettirerek tasarım yapılmaktaydı. 1955 yılında DIN4024 ile statik ve dinamik analiz standardize edilmiştir. Bilgisayarların ve yazılımların devreye girmesiyle dinamik analizler daha detaylı yapılabilmektedir.

3.1 Tasarım kriterlerine genel bakış

Betonarme temellerin tasarımında aşamaları;

- Yüklerin tanımlanması,
- Performans kriterlerini belirlenmesi,
- Temelin boyutlandırılmaların yapılması,
- Yapısal elemanların detaylandırılmasıdır.

Makinelere gelen dinamik yükler; makinenin çalışma hızına ve hareketli parçaların makine bloğu içindeki tipi, büyüklüğü, ağırlığı ve pozisyonuna bağlıdır. Temel amaç; makinenin çalışması sırasında izin verilen limitlerin üstünde titreşim üreterek, kendisine ve kendisini çevreleyen yapıya zarar vermemesidir.

Bu nedenle; zemin-temel sisteminin dinamik yüklere maruz kaldığında vereceği tepkilerin incelenmesi tasarımın önemli bir aşamasıdır. Zemin tipleri ile ilgili genel kabuller ve doğrusal yaklaşımların yerine, sahada yapılacak bir etütle, kritik zemin parametreleri belirlenmelidir. (Örn. Dinamik zemin kesme katsayısı, G) Bu parametrelere bağlı olarak gereken tüm mühendislik çalışmalarının yapılması gereklidir.

Temel, servis ömrü boyunca meydana gelebilecek en kötü yük kombinasyonuna dayanabilecek şekilde yapısal olarak tasarlanmalıdır. Buna ek olarak dinamik yüklerin yol açtığı yorulma dayanımı kaybı ve tersine gerilimler nedeniyle; betonarme elemanlar herhangi çatlakların önüne geçecek şekilde tasarlanmalı ve detaylandırılmalıdır. Makineden temele yükün doğru şekilde aktarılması tasarımda dikkate alınmalıdır.

3.2 Temel ve ekipman yükleri

Genel olarak makinenin, ağırlığı, ağırlık merkezi, yüzey alanları, çalışma hızları makine üreticisi tarafından verilir. Dinamik yüklerin belirlenmesi için; makine üreticisi ile temel tasarım mühendisi arasında bilgilerin sürekli paylaşılması gereklidir. Makine üreticisi dengelenmemiş yüklerin hesabında dikkate alınması gereken emniyet faktörlerini ve ilgili diğer tüm bilgileri iletir. Aşağıda statik ve dinamik yüklerin hesabı daha detaylı irdelenmiştir. (ACI 351.3R-04)

3.2.1 Statik yükler

3.2.1.1 Ölü yükler

Makinenin ağırlığı, ek ekipmanlar, borular, vanalar ve temelin kendi ağırlığı bu kapsamdadır. Makinenin ağırlığının hangi noktalardan mesnetlere aktarıldığı da genelde üretici tarafından verilir.

3.2.1.2 Hareketli yükler

Personel, aletler, bakım ekipmanları ve malzemelerden gelen yüklerdir. Tasarımda kullanılan hareketli yükler, hizmet süresinde meydana gelebilecek en yüksek yük olarak alınmalıdır.

3.2.1.3 Rüzgar yükleri

Yerel kodlara ve standartlara göre hesaplanan rüzgar yükleri, tasarımda genelde pek etkili değildir. Yalnız, ekipmanın esnek izolatörler üzerinde yer aldığı ve rüzgara maruz kaldığı durumlarda, rüzgar yükü de hesaba katılmalıdır.

3.2.1.4 Deprem yükleri

Depremseel bölgelerdeki temeller için yerel şartnamelerdeki yükler alınır. Ayrıca yüksekte olan makineler için veya esnek yükseltilmiş döşemelerde yer alan makineler için sismik etki yükseltme katsayıları kullanılabilir.,

3.2.1.5 Statik işletme yükleri

Makinenin normal şartlar altında çalışırken içerdiği gaz ya da sıvı ağırlığı ve bunun yanında ısısal etkiyle makinede ya da borularda meydana gelen kuvvetler dikkate alınmalıdır. Makinenin çalışması sırasında ortaya çıkan tork yükü de dikkate alınmalıdır. Bu yük , normal tork olarak hesaplanır.

$$NT = \frac{9550 P_s}{f_o} \text{ N.m}$$

Burada ; P_s Makinenin şafta aktardığı güç kW olarak, ve f_o , rotasyon hızı, rpm olarak verilmektedir.

Tork yükü genellikle, düşey bir yük olarak etki ettirilir. Acil durumlarda ortaya çıkacak tork yükü, normal tork yükünün belli oranda arttırılması ile bulunur.

3.2.1.6 Yükseltilmiş tabla tipi temeller için özel tip yükler

Uygun mukavemete ve deplasman kontrolüne ulaşmak için aşağıdaki yüklerin temele etki ettirilmesi önerilir. (ACI 351.3R-04)

- Her bir makinenin ağırlığının %50 si kadar düşey yük
- Her bir makinenin ağırlığının %25 si kadar yatay yük –enine çapraz yönde
- Her bir makinenin ağırlığının %25 si kadar yatay yük – boyuna yönde

Bu yüklerin makinenin şaft eksenine etki ettiği ve bu yüklerin tekil olarak ettiği kabul edilir.

3.2.1.7 Montaj ve bakım yükleri

Kreynerler ya da forklift'ler gibi makineyi monte veya demonte etmek için kullanılan, ilk montaj ya da bakım esnasında gereken ekipmanlardan gelen yüklerdir. Bu yüklerinden deprem ve rüzgarla aynı anda etki etmedikleri kabul edilir.

3.2.1.8 Isısal yükler

Isı değişimleri, makinede genleşme ve büzölmelere sebep olmakta, bu nedenle ekipman mesnet yüzeylerinden kaymaya çalışmaktadır. Isısal değişimler, temelden zemin ya da kazıklar tarafından aktarılan yükler üretmez. Isısal yükler; mesnet harcı, kaide ya da alt tutucu tasarımında dikkate alınır.

3.2.2 Rotatif makinelerin yükleri

Santrifüj hava ve gaz kompresörleri, düşey ve yatay sıvı pompaları, jeneratörler, rotatif buhar ve gaz türbinleri, santrifüjler, elektrik motorlar, fanlar, üfleyici rotatif makineler olarak sıralanabilir. (ACI 351.3R-04)

3.2.2.1 Dengelenmemiş kütleler nedeniyle ortaya çıkan dinamik yükler

Rotatif parçanın kütle merkezi ile rotasyon eksenini çakışmayınca dengelenmemiş yükler oluşur. Teoride, rotatif makinelerin balans ayarını yapmak mümkün olsa da, pratikte bu mümkün olmayıp her zaman az miktarda olsa ek dış merkezlik kalır. Rotatif bir makine dinamik kuvvetleri temellere genelde mesnetler üzerinden aktarır. Bu kuvvetlerin analizi makine üreticisi tarafından yapılır ve temel tasarımcısına verilir. (ACI 351.3R-04) Temel tasarımcısı aşağıdaki veriler tamamlandıktan sonra temel tasarımına başlayabilir.

3.2.2.1.a Üretici tarafından verilen dinamik yükler

3.2.2.1.b Dengelenmemiş yükün üretici tarafından verilmesi

3.2.2.1.c Dengelenmemiş yüklerin belli endüstriyel kriterlerle tanımlanması

3.2.2.1.d Dinamik kuvvetin ampirik bir formülle belirlenmesi

3.2.2.1.e Makine dengesizliğinin trip titreşim seviyesi ve efektif taşıma mukavemeti ile belirlenmesi

DIN ISO 1940 Tablo 1’de Türbin ve jeneratörler için Balans Kalite Seviyesi $G = 2,5$ -- $e_{per} = 2,5$ mm/s olarak verilmektedir. Ancak modelde; yüksek depremsellik

düşünülerek, Balans Kalite Seviyesini $G=5,0$ -- $e_{per} = 5,0$ mm/s olarak belirlenmiştir. Yine DIN ISO 1940'da göre dengelenmemiş kuvvetler için;

$$U_{per}(f_m) = e_{per} * \omega^2 * L / g$$

Burada L ; rotatif ağırlık, f_m rotasyon hızı, $\omega = \omega_m = 2 \pi f_m$ (açısal frekans), $g=10$ m/s²

3.2.2.2 Çoklu rotatif makinelerden dolayı ortaya çıkan dinamik yükler

Bir temelin birden fazla rotatif makineyi taşıması durumunda; mühendis dengelenmemiş yükü, işleyen elemanın kütesine, dengelenmeme oranına ve dönme hızına bağlı olarak hesaplamalıdır. İki dinamik kuvvetin birleştirilmesi bazı yaklaşık hesaplamaları içerir, bazen doğrudan yükler ve tepkiler toplanabilir, bazen de döngüsel olarak yükler birbirini maksimize ya da minimize edebilir.

3.2.3 Pistonlu makine yükleri

İçten yanmalı motorlar, pistonlu kompresörler ve pompalar, bazı metal şekillendirici presler, buhar motorları ve ana bir krank şaftı ile rotasyon hareketini aktaran makineler, döngüsel olarak değişen kuvvetler üretir.

3.2.3.1. Birincil ve İkincil yükler

Bir piston yatağı içinde hareket eden piston, buna bağlı bir krank'ın rotasyonu ve bağ çubuğundan oluşan sistemce oluşturulan yüklerdir.

3.2.3.2 Kompresör gaz yükleri

Kompresör bir silindirin içindeki gazın basıncını arttırarak pistonun hareketini sağlarken, bu basınç artışı silindir başlarında ve krank uçlarında tepkisel kuvvetler oluşturur. Basınç döngüsel olarak değiştikçe, diferansiyel kuvvetler oluşur.

3.2.3.3 Çok silindirli makinelerde eylemsizlik yükleri

Makineler pratikte birden fazla silindirden oluştuğu için ortaya çıkan dengesizlikler krank çubuklarına yerleştirilen karşı yükler vb. gibi şekilde dengelenmeye çalışılır. Ortaya çıkan yükler üretici tarafından hesaplanarak tasarımcıya verilir.

3.2.3.4 Çok silindirli makinelerde eylemsizlik yüklerinin elle hesaplanması

Çoklu silindirli makinelerde oluşan yüklerin üretici tarafından verilmemesi durumunda, tasarımcı yükleri hesaplamalıdır.

3.2.4 Darbeli makine yükleri

Darbe kaynaklı yükler, çekiç başının çekiç yuvasına yaptığı etki ile ortaya çıkar. Metal şekillendiren preslerde, presin parçalarının mekanik hareketinden ve metal şekillendirme prosesinden dolayı da dinamik kuvvetler oluşur. Presler genelde hem rotatif hem de darbesel yükler üretir ve bu yükler sadece makinenin tümünü bilen üretici tarafından hesaplanabilir.

3.2.5 Yük koşulları

Hizmet süreleri boyunca, makinelerin maruz kalacağı yükler aşağıdaki gibi özetlenebilir.

- Montaj durumu; yapıya ya da temele inşaat esnasında etki eden yükler
- Test durumu; ekipmanın hidrotest gibi testler durumundaki yükler
- Boş (işletme dışı), ekipmanın içindeki akışkanların, bazı parçaların bakım nedeniyle çıkartıldığı en düşük yük koşulları
- Normal işletme altında ortaya çıkan yükler
- Anormal şartlar altında, beklenmedik ve aşırı işletme koşullarında ortaya çıkan yükler

3.2.6 Yük kombinasyonları

ACI 318'e göre limit tasarımda dikkate alınan yük tipleri aşağıdaki gibidir.

Tasarım Yükleri	Yük tipi
Yapının, ekipmanın, iç parçaların, izolasyonun ve platformların ağırlıkları Montaj sırasındaki geçici yükler Test ve işletme sırasındaki akışkanların yükleri Isısal yükler Ankraj ve şablon yükleri	Ölü yük
Platform ve yürüyüş yolu yükleri Bakım esnasında geçici olarak depolanan malzemeler İşletme esnasında depolanan aletler ve bakım ekipmanları Titreşim yaratan ekipman kuvvetleri Etkisel yükler; yukarı çekme ve ekipman kontrol altyapısıyla ortaya çıkan	Hareketli yük
Deprem yükleri Taşıma yükleri Kar, buz ve yağmur yükleri Rüzgar yükleri	Çevresel

Tablo 3.1 Dinamik ve statik tasarım yük tablosu

Ayrıca; zemin gerilmeleri irdelenirken, herhangi bir yük faktörü etki ettirmeden, geoteknik mühendislerin belirlediği emniyet faktörleri ile çalışmak yerinde olacaktır. (ACI 351.3R-04)

Yukarıda tanımlanan yüklerle dair yük kombinasyonları aşağıdaki gibidir.

1. Montaj

- Ölü yük + montaj yükleri
- Ölü yük + montaj yükleri+azaltılmış rüzgar+kar, buz veya yağmur
- Ölü yük + montaj yükleri+deprem yükleri +kar, buz veya yağmur

2. Test

- a. Ölü yük + test yükleri
- b. Ölü yük + test yükleri+hareketli yük+kar, buz veya yağmur
- c. Ölü yük + test yükleri+ azaltılmış rüzgar +kar, buz veya yağmur

3. Boş(İşletme Dışı)

- a. Ölü yük + bakım yükleri+hareketli yük+kar, buz veya yağmur

4. Normal işletme

- a. Ölü yük
- b. Ölü yük + ısısal yükler + makine yükleri + hareketli yük+ rüzgar + kar, buz veya yağmur
- c. Ölü yük + ısısal yükler + makine yükleri + hareketli yük+ deprem yükleri + kar, buz veya yağmur

5. Anormal İşletme

- a. Ölü yük + anormal makine yükleri + hareketli yük + azaltılmış rüzgar

3.2.7 Temel Elastisitelerinin Rotordinamik Hesaplara Dahil Edilmesi

Enerji üretiminde kullanılan rotatif makinelerin temelleri, işletme hızı sınırları içinde genelde belli bir dereceye kadar esnektir. Bu nedenle, temelin dinamik davranışı ve rotatif makinenin dinamikliğine etki edebilir. Daha kesin rotordinamik analiz yapmak için temelin elastisitesini de dikkate almak gerekir. (Ehehalt U., Lüneburg B., Staubach R., Daniel C., Strackeljan J., Woschke E.,2009)

Temelin ve taşıyıcı kaidenin elastisitesi basit yaklaşık hesaplarla hesaplanarak rotor hesabına katılabilir. Bu analiz, temel ve rotorun eşlenmediği durumlarda maliyet açısından doğru ve mantıklı sonuçlar verse de daha kesin analizler yapmak gereklidir. Üç boyutlu hacimsel elemanlar yerine kiriş elemanları kullanılarak,

serbestlik derecelerini makul seviyelere indirmek için modal azaltma metodu kullanarak, eigen frekansları ve stabilite limitleri hesaplanabilir. Bu şekilde; maliyet optimizasyonu ile daha az rijit temeller elde edilir. Bu temellerde dahi, daha düşük titreşimlere ulaşılır. Temelin ya da sönümleme titreşim modları üstündeki etkisi dikkate alınarak; dengelenmemiş durumun belirlenmesinin yanında, mevcut ya da yeterince rijit dizayn edilmemiş temellerin güçlendirilmesi için gereken tedbirler tasarlanabilir. (Ehehalt U., Lüneburg B., Staubach R., Daniel C., Strackeljan J., Woschke E.,2009)

3.3 Zemin mekaniği özellikleri

Zemin mekaniği; zeminlerin dinamik stres altındaki mühendislik özellikleri ve davranışı ile ilgilenir. Bu bölümde temel zemin mekaniğine kısa bir bakış hedeflenmiştir. Zemin mekaniği problemleri; dinamik ya da statik yüklere bağlı aşırı oturmalar, sıvılaşma, kohezif zeminin yapısal stabilitesi, donma çözülme vb. gibi problemler olarak sıralanabilir. Poisson Oranı ve dinamik kesme modulus'u gibi temel zemin mekaniği özellikleri yer altı su seviyesinin değişimlerinden etkilenir.

Zeminin dinamik özellikleri bağlı problemler ise; bir deprem ya da patlatma ile ortaya çıkar, büyük yüklere maruz kalan temeller büyük deformasyonlara uğrar ve zeminde büyük birim deformasyonlara yol açar. Makine temellerinde dinamik yüklerin büyüklükleri ve dolayısıyla zemindeki birim deformasyonlar genelde düşüktür ($<10^{-3} \%$).

3.3.1 Poisson Oranı, ν

Poisson oranı, kohezyonsuz zeminler için 0.25'den 0.35'e, kohezyonlu zeminler için 0.35'den 0.45'e değişir. Eğer herhangi bir spesifik bilgi yoksa, kohezyonsuz zeminler için 0.33, kohezyonlu zeminler için 0.40 olarak alınabilir. (Bowles, Design of Foundations for Vibration Controls)

3.3.2 Dinamik kesme modulusu, G

Dinamik kesme modulusu, zemin temel sisteminin dinamik davranışını etkileyen en önemli zemin parametresidir. Poisson oranı ile birlikte zemin empedansının hesaplanmasında kullanılır. G ; dinamik kesme modulusu'nun belirlenmesi için 3 metodun kısa özeti aşağıda verilmiştir.

3.3.2.1 Saha etütleri ile G belirlenmesi

Temele en yakın yerde zemin özellikleri, stres dalgalarının hızları ölçülerek belirlenir. Zeminde ya da diğer tip elastik ortamda iletilen üç değişik çeşit gerilim dalgası vardır.

1. Basınç (birincil P) dalgaları: Basınç dalgaları, zemine etki eden basınç ve çekme kuvvetlerinin yarattığı hacimsel değişiklik ile iletilir. Basınç dalgaları üç tip içinde en hızlı olanıdır.
2. Kesme (İkincil S) dalgaları : Kesme kuvveti uygulandığında herhangi bir hacimsel değişiklik olmaz.
3. Rayleigh (yüzeysel) dalgaları: Bu tip dalgalar, zemin yüzeyinde oluşan, yüzeye hem dik hem de paralel dalgalardır. Kesme dalgalarından biraz daha yavaşlardır.

Zeminde oluşan dalgaların hızlarını ölçmek için bir çok yöntem vardır. Cross Hole Metodu, Down Hole Metodu, Up Hole Metodu, Sismik yansıtma (refraksiyon) metodu bunlardan bazılarıdır. Hız ölçüldükten sonra G, aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$G = \rho \times (V_s)^2$$

G : zeminin dinamik kesme modülü, Pa
 V_s : zemindeki kesme kuvveti dalga hızı, m/s
 ρ : zemin kütle dansitesi, kg/m³

3.3.2.2 Örnekler üzerinde laboratuvar testleri yapılarak, G belirlenmesi

En sık kullanılan laboratuvar metodu, Rezonant Kolon metodudur. Örneklerin örselenmesi nedeniyle, saha etütlerine göre daha az kesin değerler verir. Bu metotta silindirik örnek üzerinde kuvvet dalgaları üretilir. ASTM D 4015'e göre G hesaplanır.

3.3.2.3 Zeminin diğer özellikleri ile korelasyon kurularak G belirlenmesi

Genelde fazla kritik olmayan düşük dinamik kuvvetlerin olduğu durumlarda ön tasarım aşamasında korelasyon metodu uygulanabilir. E_v : boşluk oranı, ve σ_o : olası sıkışma basıncının, G'yi en fazla etkileyen faktörler olduğu belirlenmiştir.

Çeşitli zemin tipleri için aşağıdaki değerler literatürde yer almaktadır. (Bowles, Design of Foundations for Vibration Controls)

Zemin Malzemesi	G' (Mpa)
Temiz ve sıkı kuartz kumu	12-20
Micaceous ince kum	16
Berlin kumu (e=0.53)	17-24
Verimli Kum	10
Sıkışmış kum ve çakıl	70+
Islak, yumuşak siltli kil	9-15
Kuru, yumuşak siltli kil	17-21
Kuru siltli kil	25-35
Orta kil	12-30
Kumlu kil	12-30

Tablo 3.2 Çeşitli zemin tipleri için karakteristik G değerleri

3.3.2.4 Çok Tabakalı Zeminlerde Eşdeğer Lineer Metot ile Zemin Tepkilerinin Belirlenmesi

Zeminler bazen çok tabakalı zeminlerin üst üste gelmesi ile oluşur. Depremde bu tip zeminlerde tepkilerinin ne olacağının belirlenmesi gerekmektedir. Deprem süresince, gerilme-kesme modülüsü oranı ve sönümlenme oranı sabit kalacaktır. Kalıcı gerilmeler ve hücrel su basınçları hesaplanamaz. Bu durumda dahi lineer metotla yapılan hesaplar, pratikte kullanılabilecek gerçekçi değerler vermektedir. Maksimum kesme modülüsü aşağıdaki formülle hesaplanır.

$$v_s = \sqrt{G/\rho} = \sqrt{\frac{G \cdot g}{\gamma}}$$

Burada, G max; maksimum kesme modülüsü, ρ ; zeminin özkütlesi, γ ; birim ağırlık, g; yer ivmesidir. (Aslan H., Siyahi B., Ertas O., 2005)

3.3.3 Zemin Sönümlleme Özellikleri

Bir sistemin, serbest titreşimlerden dolayı ortaya çıkan enerjiyi emme özelliklerini anlatan kavramdır. Zeminin sönümlmesi, geometrik ve malzeme sönümlleme özelliklerinden oluşur. Geometrik sönümlleme, enerjinin elastik dalgalarla temelden uzaklaşması ve zeminin inelastik davranışı sonucu ortaya çıkar. Malzeme sönümlmesi, enerjinin malzemenin tamamen elastik olmaması nedeniyle, döngüsel bir yük altında sürekli bir döngü üretmesiyle ortaya çıkar.

Malzeme sönümlmesi:

$$B_{\mu} = \frac{1}{\Pi} \frac{\Delta A}{W} \text{ formülü ile hesaplanır.}$$

Burada; ΔA ; döngüsel olarak çevrelenen alan, W ; birim deformasyondan ortaya çıkan enerjidir.

Deneyisel belirlemelerin yerine, bir çok tasarımcı sönümlleme değerini %5 olarak alır. Çeşitli zemin tipleri için karakteristik sönümlleme değerleri literatürde yer almaktadır. (Bowles, Design of Foundations for Vibration Controls)

Zemin Tipi	Sönümlleme Dz, %
Kıl	1.7 ~7
Silt	2.5
Alüvyon	3.5~12
Kum	1.7~6

Tablo 3.3 Çeşitli zemin tipleri için karakteristik sönümlleme değerleri, Dz

3.4 Titreşim Performans Kriterleri

Temel sisteminin esas amacı, ekipmanın içindeki titreşimleri, iç kuvvetleri ve gerilmeleri sınırlamaktır. Bunlara dair şiddetler, deplasman, hız ve ivme birimleri ile tanımlanır.

Deplasman kriterleri; pik şiddetlerdeki değerlere bağlıdır ve mikron (10-6 m) bazında ölçülür. Bu kriter her zaman frekansa bağlıdır, ve daha yavaş hızlarda daha büyük hareketler tolere edilebilir.

Hız kriterleri; pik hızlara yada rms (root mean square) hızlara bağlıdır. Bunlar, frekansa da bağlı olabilir, ancak genelde bağımsızdır.

İvme kriterleri; frekansla beraber sabit ya da bağımsız olabilirler. Bazı makineler, sabit hızla, bazıları değişken hızla çalışır. Temel tasarımcısı bu özelliği dikkate almalıdır.

3.4.1 Makine Limitleri

Titreşim limitleri, makineye zarar vermeyecek ya da ekipmanın doğru performans göstermesini sağlayacak değerler olarak üretici tarafından belirlenir.

Rotatif ekipmanlar için, şafttaki titreşim kaynaklı deplasmanlar veya hızlar sınırlandırılır. Pistonlu ekipmanlar için, genelde mesnet noktalarındaki hareketler ölçülür. Bunun yanında makine şasisindeki değerler de makine ile temel sisteminin durumunu ve bütünlüğünü belirlemek için ölçülür. İtkisel makinelerde; ilk etki ile temel sistemine etki eden değerlerin analizi önemlidir. Araştırmacılar, makinelerin titreşim limitleri ile ilgili çalışmalar yapmıştır. ISO 10816-1'deki değerler genel kabul görmüştür. (ACI 351.3R-04)

3.4.2 Psikolojik Limitler

İnsanların titreşime karşı algıları ve hassaslıkları bir çok araştırmaya konu olmuştur. ISO2631 ve DIN1450 uluslararası kullanılan standartlardır. (ACI 351.3R-04)

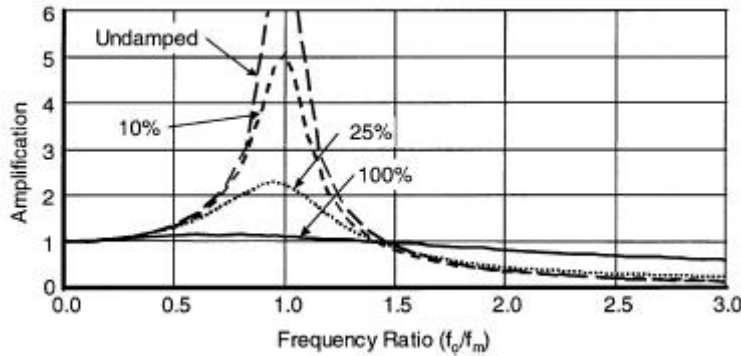
3.4.3 Frekans Oranları (f_o/f_n)

Temelin doğal frekansı ile ekipmanın çalışma hızını ilişkisi frekans oranı olarak açıklanır.

Mühendisler ve üreticiler, rezonansı engellemek için, temelin frekansının ekipmanın işletme hızından belli düzeyde farklılık göstermesini ister. Bu nedenle; ekipman-temel sisteminin doğal frekansını hesaplayıp, dinamik yükler altındaki frekansla karşılaştırılır. Bir çok mühendislik firması %10'dan %50'ye değişen oranlarda farklılık arar. Eğer bir rezonans potansiyeli varsa, ya temelin boyutları değiştirilir ya da daha detaylı hesaplar yapılır. Sadece bu kriteri dikkate ele alarak tasarım yeterli olmayacaktır. Rezonans potansiyeli olmasa da, titreşim problemleri ortaya çıkabilir. (ACI 351.3R-04)

3.4.4 Geçişgenlik

Bu oran serbestlik derecesi bir olan (SDOF) sabit hızlı bir f_0 kuvvete maruz kalması durumunda ortaya çıkan orandır. Bu oran tasarım aşamasında kullanılır.



Çizelge 3.1 Geçişgenlik oranı (ACI 351.3R-04)

Bu oran, dinamik ekipman tarafından üretilen yükün, yay-damper sistemine aktarılma oranını gösterir. Bu oran olabildiğince küçük olmalı ve dinamik ekipman tarafından üretilen yükün sadece %20'sini aktarmalıdır. Ancak zemine ya da kazığa oturan temeller için bu oranın kullanımı anlamlı olmayabilir.

3.5 Beton performans kriterleri

Temelin tasarımı hem statik hem dinamik yüklere dayanacak şekilde yapılmalıdır. Temel, ekipman ve destekleyen zemin ya da yapı bütünlük içinde hareket etmelidir. Bu şekilde; makine üreticisinin ya da sahibinin belirttiği deplasman limitleri içinde kalmalıdır. Beton temelin ekonomik ömrü en az üzerine monte edilecek ekipmanın hizmet süresi kadar olmalıdır. Betonarme demirini korumak için çatlaklar minimize edilmelidir.

3.6 Makine temel sistemleri için performans kriterleri

Genel olarak ankraj tipi ya da izolatör tipi olarak tanımlanan makine destek sistemleri, makineyi temellerine bağlar. Ankraj tipi destek sistemleri, makine ile temeli entegre eder. İzolatör tipi destek sistemleri, makine ile temeli birbirinden ayırır. Ancak yine de; bu iki sistem birbiriyle dinamik olarak etkileşmeye devam eder.

Dinamik makineler, çalışıp ısındıkça, yatay düzlemde kendisini taşıyan temelden daha fazla genişebilir ve çok büyük kuvvetler üretir. Bu nedenle, ısısal genişmeyi de dikkate alacak şekilde, tasarım yapılır.

Makine temel sistemleri için 10 adet ana performans kriteri şu şekilde sıralanabilir; (ACI 351.3R-04)

1. Isısal genişmeyi tolere etmesi
2. Ortaya çıkan dinamik kuvvetleri emmesi ya da iletmesi
3. Dinamik kuvvetleri, mikro seviyede elastik deformasyon ve ihmal edilebilir seviyede kayma olacak şekilde iletmesi.
4. Ekipmanın ekonomik ömründen uzun hizmet süresine sahip olması.
5. Kabul edilebilir bir bakım periyoduna sahip olması (örn. 1 yıl veya daha uzun)
6. Civataların, kuvvet iletme ve eğilme gereklerine karşılık verilebilmesi.

7. Civatalar ve bunları çevreleyen elemanların (ankraj plakaları, Mesnet Harcı malzemeleri, vb.) mukavemeti, etki eden çekme ve basma gerilimlerine dayanmalıdır.
8. Civatanın çevresindeki polimerik malzemeler (Mesnet Harcı ya da takoz) baskı altında, civatanın kapasitesini etkilemeyecek kadar sünmeye uğraması.
9. Makinenin doğru şekilde yerleştirilmesinde, durağan bir platform oluşturması.
10. Temelin tasarımında dikkate alınan tolere edilebilir mukavemet değerlerini (çekme, kesme, ısısal genleşme, sürtünme, sünme, kopma vb. gerilimleri) karşılaması.

4 TASARIM METOTLARI

4.1 Tasarım metotlarına genel bakış

4.1.1 Genel Değerlendirme

Yapılar için jeolojik etüt sonucunda sahada uygulanacak temel tipi seçilir. Fonksiyonellik, güvenilirlik, maliyet açısından fizibl olması dikkate alınarak tip seçimi yapılır. Temel boyutlarının optimum boyutlandırılması, yapının toplam maliyetine, araziye verimli olarak kullanmaya ve inşaat sırasında ortaya çıkacak iş sürelerinin kısaltılarak, yapım süresinin optimize edilmesi sağlanır. Enerji santralleri yatırım maliyetleri çok yüksek olan ve bir an önce işletmeye alınmasını istenen tesislerdir. Özellikle sismik açıdan aktif bölgelerde zemin ile yapının arasındaki dinamik etkileşim dikkate alınmalıdır.

Ayrıca tasarımda; bina temeliyle makine temelini izole etmek ya da ayırmak istenebilir. Ancak; sadece düşey doğrultuda izolasyon yapılabilir. Genelde, dinamik yükler taşıyan temeller, kendilerini çevreleyen binaların temellerin üstüne ya da bina temellerini etkileyebilecek lokasyonlara yerleştirilmez.

Dinamik makineler için temel tasarımı aşağıdaki aşamaları içerir.

1. Temelin ön boyutlandırması
2. Ön boyutları belirlenmiş temelin, titreşim parametrelerinin hesaplanması, doğal frekans, genlik, hızlar ve ivmeler.
3. Madde 2’de hesaplanan parametrelerin tavsiye edilen limitleri veya titreşim performans kriterlerini aşmadığının ispat edilmesi
4. Gerektiğinde; temel tasarımında gerekli değişiklikler yaparak, titreşim response’larının azaltılarak, gereken titreşim ve maliyet kriterlerine ulaşma
5. Betonarme temel ve makine destek sisteminin yapısal bütünlüğünün kontrolü

Tasarım aşamasında titreşimi azaltacak önlemlerin alınması, ekipmanın işletilmeye başlamasından sonra yapılacak düzeltmelerden daha az pahalıya malolacaktır. Titreşimi azaltma önlemleri olarak aşağıdakiler sıralanabilir. (ACI 351.3R-04)

1. Makine için en uygun lokasyonun seçilmesi
2. Makinenin işletme hızına göre ayarlanması veya hareketli parçaların balansının yapılması
3. Temelin kütleye ya da temel tipine (zemin oturması daha kritik olduğu durumlarda, diğer kriterler sağlanmasına rağmen kazık temel seçilebilir) göre ayarlanması
4. Makinenin yaylar ya da esnek mesnetler kullanılarak temelden izole edilmesi
5. Temelerde bariyer tipi izolasyon uygulanması

4.1.2 Dinamik yüklerle tasarım metotlarının özeti

Tasarım metotları kısaca; Pratik Yöntem, Eşdeğer statik yük, Dinamik analiz olarak sıralanabilir. Uygun metodun seçimi, makinenin özelliklerine, dengelenmemiş kuvvetlere, işletme hızına, ağırlığa, ağırlık merkezinin lokasyonuna, alt karkasına, makinenin önemine, temelin tipi ve büyüklüğüne, beklenen performans kriterlerine bağlıdır. Bu nedenle mühendis, aşağıdaki üç kategorideki verileri değerlendirerek ön boyut çalışması yapmalıdır. (ACI 351.3R-04)

1. Makinenin karakteristikleri ve makine-temel performans gerekleri
 - Makinenin fonksiyonları
 - Makinenin ve hareketli parçalarının ağırlıkları
 - Ağırlık merkezinin düşeyde ve yataydaki konumu
 - Makinenin hız spektrumu
 - Dengelenmemiş kuvvetlerin ve momentlerin yönleri ve şiddetleri
 - Temelin deplasman limitleri
2. Jeoteknik Bilgiler
 - Zemin taşıma gücü
 - Titreşimin zemin üzerine etkisi; örneğin oturma ya da sıvılaşma
 - Zemin sınıfı
 - Alt temel reaksiyonu modülü
 - Dinamik zemin kesme modülü, G
 - Dinamik zemin-kazık etkileşim parametreleri (kazık tipi temeller)

3. Çevresel Koşullar

- Çevredeki titreşim yaratan diğer titreşim yaratan kaynaklar, araç trafiği, inşaat aktiviteleri
- Titreşime insanların tahammülü veya titreşime duyarlı ekipman
- Siller yada zemin altı su seviyesinin yüksekliği
- Sismik risk

Genelde; temel boyutları pratik yöntem metodu ile belirlenir, daha sonra eşdeğer statik yük ya da dinamik analiz ile incelenir. Eğer bu metotlar temelin yetersiz olduğunu gösterirse, mühendis temel boyutlarını revize eder ve analizleri tekrar eder. (ACI 351.3R-04)

4.1.2.1 Pratik Metot

En basit tasarım yöntemi olan bu metotta; amaç, temel bloğunda yeterli kütlenin yaratılarak, titreşim dalgalarının sönümlenmesi ve temel – zemin sistemi tarafından absorbe edilmesidir. Makinenin 22 kN'dan hafif olduğu ve dengelenmemiş kuvvetlerin küçük sayılabileceği, makinelerin temelleri bu metotla tasarlanabilir. Ancak pistonlu makineler ve hassas makinelerde bu metodun prosedürleri yeterli değildir.

Bu metotla temeller boyutlandırılırken; aşağıdaki şartların sağlanması istenir.

Normal temellerde:

Rotatif makineler için : Temel bloğunun ağırlığı $\cong 3 \times$ Makinenin ağırlığı

Pistonlu makineler için : Temel bloğunun ağırlığı $\cong 5 \times$ Makinenin ağırlığı

Kazık temellerde:

Rotatif makineler için : Temel bloğunun ağırlığı $\cong 2 \frac{1}{2} \times$ Makinenin ağırlığı

Pistonlu makineler için : Temel bloğunun ağırlığı $\cong 4 \times$ Makinenin ağırlığı

Yukarıdaki makine ağırlıkları; makinenin tüm hareketli ve sabit parçalarını içerecek şekilde alınmalıdır. Ayrıca; bir çok tasarımcı, yatay ve düşey kuvvetlerin bileşkesinin, temel ağırlığının orta üçte birine düşmesini önermektedir. Bu şekilde; yatay ve düşey yüklerin ya da düşey yüklerin yarattığı ek dış merkezliğinin herhangi bir yukarı itki oluşturmamasının önüne geçilir.

Tasarım yapılırken; yatay ve düşey yüklerin alttaki zemin ya da kazıklar üzerine düzgün şekilde dağılmasını sağlayacak şekilde, temelin şeklini ve kalınlığını belirlemelidir. Ekipmanın boyutları ve bakım sırasında gerekecek alan da düşünülmelidir.

Minimum genişlik, makinenin merkez aksından temel en alt noktasına olan uzaklığın 1,5 katı olacak şekilde belirlenmelidir.

Formülize edilirse; min.Genişlik = $1,5 \times h$ net

Temel kalınlığı belirlenirken aşağıdaki kriterler dikkate alınır.

$1/5 \times$ Makine eni veya $1/10 \times$ Makine boyu veya 0.60 m kontrolünde, daha büyük çıkan boyut ile belirlenir.

Temelin boyutlandırılırken; ekipmanın ağırlık merkezi ile temelin ağırlık merkezinin planda kesişmesini sağlamak, ek dış merkezliliğin azaltılmasını sağlar.

Temel boyutları belirlenirken; her koşulda temelin zemine iletmediği yükün, zeminin taşıma kapasitesini geçmemesine dikkat edilmelidir. Temelin oturduğu zemin üstünde rijit davranabilmesi için kalınlık kriterlerine dikkat edilir. Yumuşak zeminlerde daha ince temeller yeterli olurken, daha sert zeminlerde rijitliğe ulaşabilmek için daha kalın temellere ihtiyaç vardır.

4.1.2.2 Eşdeğer statik yük metodu

Eşdeğer statik yük metodu, temelin stabilitesini ve mukavemetini kontrol etmek için; pseudodinamik kuvvetlerin makine temel sistemleri etkisini uygulanmasının basitleştirilmiş ve yaklaşık bir metottur. Genelde 45 kN'dan daha hafif makineler için kullanılır.

Basit geometrideki temellerde; dinamik analiz yerine, eşdeğer statik yük yeterli olacaktır.

$$F = v. F(t) = \frac{1}{1-\eta^2}. \quad F(t) \text{ ve } F_{\max} = 15 F(t) \text{ olarak hesaplanır.}$$

Burada $\eta = f_m / f_n$ f_m : çalışma frekansı, f_n : temel doğal frekansı'dır.

V: amplifikasyon faktörü, dengelenmemiş yüke maruz sönümlemesiz sistemin, dengesiz bir yüke maruz kaldığı haldeki Rezonans eğrisi ile belirlenir. DIN 4024'te, V maksimum 15 alınmaktadır.

Balans kalite seviyesi, $G = e$ (maks.ek dış merkezlik, mm) x w (maks.açısal hız, rad/s), ISO 1940'da tanımlanır. Türbinler ve jeneratörler için $G=2,5$ mm/s olarak alınır. (ACI 351.3R-04)

$F(t) = m \times e \times w^2$ - Dengelenmemiş kuvvet varsa ya $G= 6,3$ mm/s olarak alınır ya da iki katı olarak alınır. Acil durumda; bunun 6 katı kadar yük olacağı düşünülerek, $G=6 \times 6,3 = 38$ mm/s ($G38$) alınır.

Pistonlu makinelerin statik metotla tasarlanması için; üretici,

- makinenin ağırlığını,
- makinenin işletilmesi sırasında ortaya çıkan dengelenmemiş kuvvetleri ve momentleri,
- akışkanlık ve eylemsizlik kuvvetlerini etkileyen tekil silindir kuvvetlerini vermelidir.

Rotatif makinelerin statik metotla tasarlanması için, üretici aşağıdaki bilgileri vermelidir.

- Makinenin ağırlığı
- Düşey pseudodinamik tasarım kuvvetler; mesnetler ve rotatif kütlenin orta noktasına şafta dik olarak uygulanır. Bu kuvvetin üretici tarafından verilmemesi durumunda, güvenli tarafta kalmak için mühendis makinenin ağırlığının yarısını alabilir.

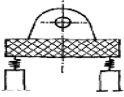
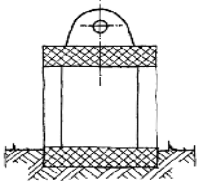
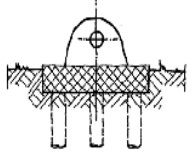
- Yatay pseudodinamik tasarım kuvvetleri; yatay mekanik kuvvet olarak, mesnetler ve dönen kütlelerin orta noktasına şafta dik olarak uygulanır. Boyuna kuvvet şaft aksı boyunca uygulanır. Mühendis, yatay ve boyuna kuvveti makinenin ölü yükünün %25'i olarak alabilir. Rotatif makinelerde düşey, yatay ve boyuna kuvvetlerin hepsinin aynı anda etki etmediği düşünülür.

Basitleştirilmiş tasarım prensiplerini aşağıdaki şekilde özetlenmiştir. (Fleischer & Trombik 2008)

Basitleştirilmiş tasarım prensiplerinin, eşdeğer statik yük metodunda uygulanması için; öncelikle Tablo 4.1'deki şartlar sağlanmalıdır.

Maks. Yer ivmesi, a_{max}	<0.4g	<0.4g	<0.5g
Kütle oranı "temel:makine"	2:1	2:1	2:1
Altyapı	Sert	Yumuşak	Yumuşak
Temel genişliği/boyu	<1:2	<1:2	<1:2

Tablo4.1 Basitleştirilmiş tasarım için ön şartlar

Tip	Yay Üstü Temel	Tabla Üstü Temel	Radye Temel
Şema			
Sistem ayarı	Düşük ayarlı	Düşük ya da yüksek ayarlı	
Etkin eigen mod'ları	Rijit kütle hareketleri ve rotasyonlar	Rijit kütle hareketleri ve rotasyonlar, kolon eğilmeleri	Rijit kütle hareketleri ve rotasyonlar

Mod Super-pozisyonu	Yok	Var (gerektiğinde kontrol edilmelidir)	Yok
Ters yönde yük dağılımı	$a_{\text{makine}} = 1.2 a_{\text{max}}$ $a_{\text{temel}} = 0.9 a_{\text{max}}$	$a_{\text{makine}} = 1.2 a_{\text{max}}$ $a_{\text{tabla}} = 1.1 a_{\text{max}}$ $a_{\text{kolonlar}} = 1.0 a_{\text{max}}$ $a_{\text{temel tablası}} = 0.8 a_{\text{max}}$	$a_{\text{makine}} = 1.4 a_{\text{max}}$ $a_{\text{temel}} = 0.8 a_{\text{max}}$
Boyuna yük dağılımı	$a_{\text{makine}} = 1.0 a_{\text{max}}$ $a_{\text{temel}} = 1.0 a_{\text{max}}$	$a_{\text{makine}} = 1.2 a_{\text{max}}$ $a_{\text{tabla}} = 1.0 a_{\text{max}}$ $a_{\text{kolonlar}} = 1.0 a_{\text{max}}$ $a_{\text{temel tablası}} = 0.9 a_{\text{max}}$	$a_{\text{makine}} = 1.2 a_{\text{max}}$ $a_{\text{temel}} = 0.9 a_{\text{max}}$
Sistem sönümleme oranı (zemin-temel-makine)	2 %	3 %	5%
Global Duktilite	1.0	1.5	2.0
Yatay deplasmanlar	Gerektiğinde, sınırlandırılmalıdır	Gerektiğinde, sınırlandırılmalıdır	-
Yatay zemin basıncı	Mevcut değildir	İhmal edilebilir	Bazı durumlarda hesaba katılmalıdır

Tablo 4.2 Basitleştirilmiş tasarım prensipleri

4.1.2.3 Dinamik analiz

Dinamik analiz, titreşim parametrelerinin daha ileri ve daha kesin metotlarla belirlenmesini sağlar. Bu nedenle, genelde kritik makine temellerinin tasarımının son aşamasında kullanılır. Dinamik analiz için üretici; 1. Makinenin tüm işletme hızlarına denk gelen, birincil dengelenmemiş kuvvetleri ve momentleri 2.- Makinenin tüm işletme hızlarına denk gelen, ikincil dengelenmemiş kuvvetleri ve momentleri 3.Akışkanlık ve eylemsizlik kuvvetlerini etkileyen tekil silindir kuvvetleri vermelidir. (ACI 351.3R-04)

Sistemin dinamik analizi iki aşamada yapılır.

1. Temel-makine sisteminin doğal frekanslarının ve mod şekillerinin belirlenmesi
2. Dinamik kuvvetler nedeniyle temel-makine sisteminde yarattığı tepkinin hesaplanması

Doğal frekanslarının ve mod şekillerinin belirlenmesi, sistemin dinamik karakteristikleri hakkında bilgi verir. Bunun yanında, genelde doğal frekansların en düşüğü olan ana frekans da belirlenir.

Doğal frekanslar, şu nedenlerle önemlidir; Makine-temel-zemin sisteminin bağıl rijitliğini gösterir. Ayrıca, etki eden frekans ile karşılaştırılarak, rezonansın engellenmesi sağlanır. Bölüm 3.4.3’de verilen oranlar dikkate alındığında rezonans engellenir. Genelde, temel-makine sisteminin altı rijit kütle hareketi incelenerek altı frekans hesaplanır ve bu altı durum için de rezonans kontrolü yapılır.

Mod şekilleri, şu nedenlerle önemlidir; etki eden dinamik kuvvetin sonlanmasından sonra titreşime bırakılan makine temel sisteminin, deformasyon şeklini gösterirler. Bunun yanında makine-temel sistemin çeşitli noktalarındaki bağıl rijitliği açıklarlar. Farklı şiddetler ve mod şekillerinin ilişkisini açıklar. Bir temelin esneme özellikleri modellendiğinde, belli bir frekansta temelin belli bir kısmının daha esnek olduğunu gösterir.

Temelin kritik noktalarındaki titreşim şiddeti düşürülmek istendiğinde, mod şekilleri hangi noktaların değişen rijitlik, kütle ve sönümlleme direnci içerdiğinin belirlenmesi için gereklidir.

Dinamik kuvvetler tarafından makine temel sisteminde oluşturulan tepkinin hesaplanması ile; titreşim parametreleri, deplasman, hız, kütle ivmesi, belirlenir. Bu parametreler performans kriterleri veya belli durumlar için tavsiye edilen değerlerle karşılaştırılır. İçsel kuvvetler de temelin bileşenlerinin mukavemetini kontrol etmek için kullanılır.

4.2 Destekleyen ortamca yaratılan atalet (Empedans)

Temellerin dinamik tepkileri, makine-temel-zemin sisteminin rijitlik ve sönümlenme özelliklerine bağlıdır. Bu bölümde, zemine ya da kazıklara oturan rijitlik ve sönümlenme değerlerinin belirlenmesinde kullanılan formüller ve yaklaşımlar irdelenecektir.

Tek serbestlik derecesindeki sistemlerde; düşey empedans (k_v^*) hesaplanır. İki serbestlik derecesindeki sistemlerde; yatay empedans (k_u^*) ve rocking empedans (k_ψ^*) hesaplanır. Yanal dinamik kuvvetlerin var olduğu durumlarda, makine-temel sistemi düşey ekseninde dönebilir. Bu durumda tork empedans (k_η^*) belirlenir. Bu durumda tek serbestlik derecesi olduğu düşünülür.

Makine-temel sisteminin rijit ve temel üzerinde olduğu düşünüldüğünde; k_{u1}^* , k_{u2}^* , k_v^* , k_u^* , k_ψ^* , k_η^* , altı ayrı elastik yay olarak düşünülür. Bunların temelin ağırlık merkezinde alttaki zemine etki ettiği düşünülür. Eğer destek, kazıklar ya da izolatörler tarafından sağlanıyorsa, eşdeğer yaylar ve damperler bu elemanların rijitlik merkezine uygulanıyor gibi düşünülür. Temel gömülü ise, temelin kenarlarına ek yaylar ve damperlerin olduğu düşünülür.

Bir sonraki karmaşıklık seviyesi, esnek temellerdir. Bu temellerin yapısal analizi, sonlu elemanlar metodu ile yapılır. Temellerin esnekliği, kiriş tipi elemanlar, iki boyutlu düzlem stres elemanları, tabaka bükülme elemanları, üç boyutlu elemanlar ya da bunların kombinasyonları olarak modellenebilir.

4.3 Titreşim analizi

4.3.1. Formüller ve amprik yaklaşımlarla analiz

Literatürde, çeşitli bilim adamlarınca geliştirilmiş formüllerle ve elle hesap yöntemleri mevcuttur. Bunlar; Temel sertliği metodu, Tek Serbestlik Dereceli Sistemler için formüller, İki Serbestlik Dereceli Sistemler için formüller, Üç ya da Daha Fazla Serbestlik Dereceli Sistemler için formüller olarak özetlenebilir. Bu

yöntemler özellikle bilgisayarların ve CAD (Computer Aided Design) programlarının gelişmediği yıllarda kullanılmıştır. Bu metotlar bilgisayar ortamındaki çözümlere yön vermiştir.

4.3.2 Bilgisayar ortamında dinamik analiz

Bu tez kapsamında makine-temel-zemin sistemi titreşim değerleri SAP2000’de modelle bulunacaktır. Bölüm 7’de geniş şekilde verilmiştir.

4.4 Yapısal temel tasarımı ve beton özellikleri

Temel tasarımıda eksensel, moment ve kesme donatıları kullanılarak, dinamik hareketle ortaya çıkabilecek tüm durumlara ait yükler karşılanır. Bu normal tipte binalardan farklıdır. Betonun mukavemet performansı yerine, kalitesi ve uzun süre bu kaliteyi sürdürmesi daha önemli hale gelir. Bunu sağlamak için, ankrajların çevresine kılcal donatılar koyarak, uzun dönemli performansı garanti altına alır.

4.4.1.1 Mukavemet kaybı

4.4.1.2 Elastisitenin dinamik modülü

4.4.1.3 Şahmerdan tip makine temelleri

4.4.1.4 Isısal Etkiler

4.4.1.5 Kompresör bloklarında ard germe uygulanması

Betonarme temel tasarımında yukarıda bahsi geçen maksimum kuvvetler dikkate alınarak, temel monolitik bir blok olarak tasarlanmalıdır. Herhangi genişleme ya da izolasyon derzi konulmamalıdır.

4.5 Sismik izolasyon sistemleri kullanılması ve avantajları

İzolatör kullanımında temel amaç; titreşimin çevreleyen ortama iletilmemesidir. Zeminin davranışının çoğu zaman sadece belli tahminlere dayandırıldığı durumlarda, istenmeyen sistem rezonanslarının izolatörlerle toptan ortadan kaldırılması önemli bir avantaj yaratır. Ayrıca titreşimler nedeniyle oturmalar oluşabilir, bazen de düzensiz oturmalar ortaya çıkabilir. İzolatör kullanmanın en önemli avantajı; dinamik sisteminin özelliklerinin sabit ve belirlenebilir kalmasını sağlamasıdır. (9. Fabreeka Int. Inc. Co. Tech.Booklet)

İzolatörler kullanılarak ; temellerin daha derine inen büyük betonarme kütlelerin yaratması ya da zaman ve maliyet açısından daha kûlfetli olan kazık temeller kullanılması engellenir. İzolatör kullanmanın sağladığı yapısal avantajlar aşağıda sıralanmıştır;

- Büyük kütleler yerine, daha ince betonarme ile temeller çözülür. Ayrıca sistemin dinamik davranışı kesin olarak hesaplanabilir.
- Ekipmanın titreşim frekansları 2~4 Hz arasında tutularak, çalışma hızından bağımsız olarak, çalışma düzeninin korunmasını sağlar.
- Eğer sadece titreşimler söz konusu ise, ekipman zeminden %90'a varan oranlarda izole edilebilir. Bu sayede çevreleyen tüm çevreden (diğer ekipman, temel vb.) titreşimi uzak tutmuş olur.
- İzolatörün altındaki temel tasarlanırken, sadece makinenin ve betonarme tabliyesinin ölü yükü düşünülür. Bu sayede temel, zeminde oturma olmadan, ya da kazık sayısı daha az tutularak tasarlanabilir.
- Ekipmanın kendi içindeki gerilimlerin azaltılması sağlanır. Bu sayede daha uzun dayanan, daha az bakım ihtiyacı olan ve daha uzun süre hizmet verebilen makineler yaratılmış olur.

İzolatörlerin; hem titreşimlere, hem depremlere, hem de oturmalarla yönelik tasarım avantajları, sistemin kabulünün yapılmasından sonra yukarıda sıralananlar nedeniyle ortaya çıkabilecek kusurları engeller. Oturmaların düzensizliğinin engellenmesinin yanında, eğer beklenenin üstünde oturmalar ortaya çıkarsa, takozlama yoluyla ekipman kolayca istenen tesviye seviyesine getirilir.

İzolasyon sistemleri, ekipman ve atalet blokları beraber sisteme rijitlik ve sönümleme katar. Yine de bu miktar zemin ve kazıklar tarafından sağlanan miktarların altında kalır. Titreşimlerin iletilmesini azaltır. Depremesel izolasyon sistemleri de, makine temellerin titreşimlerini azaltan izolasyon sistemlerine dayanmaktadır. Dinamik makinelerde kullanılan üç tip izolasyon konsepti vardır.

4.5.1 Doğrudan destek sistemleri

Bu sistemde ekipman ve temel komple bir dinamik sistemi oluşturur. İzolatörlerin dinamik yük bileşenlerini oldukça azaltması ile, izolatörlerin altındaki temel sadece statik kuvvete maruz kalır. Tasarımcı, ekipmanı stabilize edecek, rijitliği ve sönümlemeyi dağıtacak şekilde, izolatörleri ekipmanın altında düzgün şekilde yerleştirmelidir. Bunun yanında temel tasarımcısına tüm yükleri vermelidir. Eğer yeterli bilgi verilirse; (kütle dağılımı, dinamik yükler, performans gerekleri) izolatör üreticisi, ekipmanın belirlenen limitler içinde kalıp kalmadığını değerlendirebilir.

4.5.1.1 Lastik dolgu tipi sönümleyiciler

En rijit olan tiptir, ve lineer olmayan yük-esneme ilişkisine sahiptir.



Şekil 4.1 Dinamik Ekipman Temeli altına uygulanmış elastomerik izolatörler

4.5.1.2 Viskoz-sönümleyicilerle birleşik yay sistemleri

Yaylar elastomerik lastik dolgu tipi izolatörlere göre daha yumuşaktır, ve daha iyi izolasyon sağlarlar. Yayların tek başına sönümleme derecesi yeterli değilse de, viskoz sönümleyici birlikte bu sistem, %5~40 sönümleme sağlayacak şekilde tasarlanabilir.



Şekil 4.2 Entegre Vikso Üniteli Yaylı izolatör

4.5.1.3 Hava destekleri

En yumuşak izolatör tipidirler. Hava basınç ünitesi ile birlikte kullanılırlar.



Şekil 4.3 Havalı tip izolatör

4.5.2 Atalet Blok Sistemleri

Sistemin titreşimlere karşı tepkisini belli limitlerde tutmakta ekipmanın kütlesi yetersizse, ek kütle yaratmak için, atalet blok sistemleri kullanılır.



Şekil 4.4 Bina tepesine yerleştirilmiş tipik atalet bloğu

4.5.3 Yarı Aktif Ayarlanabilir Sönümleme Sistemleri

Yapılarda aktif ve pasif sönümlemelerin yanında, yarı aktif ayarlanabilir sönümleme sistemleri kullanılabilir. Bu sistemler, deprem yüküne maruz kaldıktan sonra kullanıcılar tarafından forse edilerek eski hallerine getirebilir. Bu sistemler aktif ve pasif sönümleyicilere göre daha yüksek sismik yükler taşımaktadırlar.

5 SÖNÜMLEME CİHAZLARI ÖZELLİKLERİ ÜSTÜNE TEORİK ÖZET

5.1 Modal Sönümlenme Oranı ζ_i ve Efektif Sönümlenme Katsayısı β_{eff}

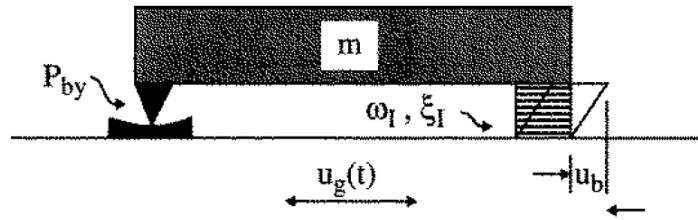
Modal Sönümlenme Oranı ζ_i ve Efektif Sönümlenme Katsayısı β , sismik izolasyona tabi tutulmuş yapılarıdaki iki önemli faktördür.

Tek Serbestlik dereceli sistemde; Rijitlik $K = m \omega_0^2$, Viskoz Sönümlenme; C olarak tanımlandığında, $\zeta_i = C / (2m \omega_0)$ olarak tanımlanır.

Tek Serbestlik derecesinde sadece 1 mod olduğu için; $\zeta_1 = \zeta$ olacaktır.

Sismik koruma sistemleri ve enerji sönümlenme cihazlarının geliştirilmesiyle, izolatörlerin enerji sönümlenme kapasitelerini belirlemek gerekir. En sık kullanılan metot; cihaza döngüsel bir deplasman $u(t) = u_0 \sin \Omega t$ vermek, ve sonuç kuvveti belirlemektir. Kuvvet-deplasman grafiğinin altındaki alan kaybedilen enerjiyi verecektir. (Makris N., Po Chang S.,1998)

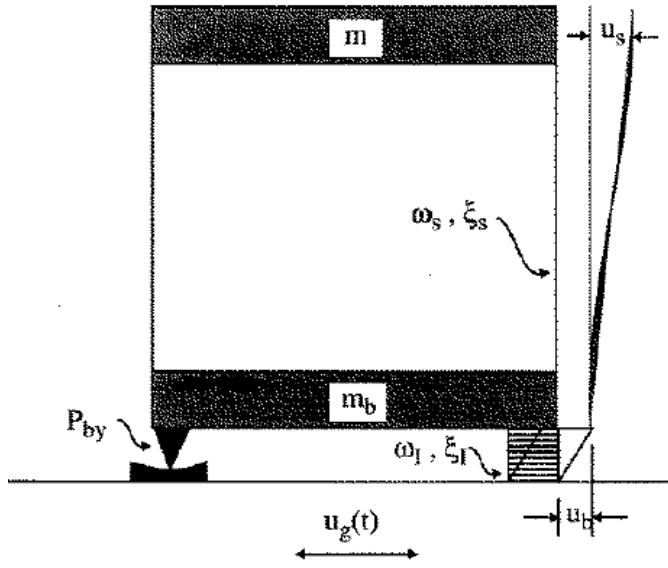
Efektif Sönümlenme Katsayısı $\beta_{eff} = 1/2\pi \times W_D / K_I U_0^2$; Burada; K_I ; izolatörün efektif rijitliğidir.



Şekil 5.1 Tek Serbestlik Dereceli Sistemde İzolatör Uygulanması

Yukarıda tek serbestlik dereceli sistemin; rijitliği $K_I = m \omega_0^2$ olan bir izolatörün üstünde durduğu düşünülürse, $\zeta = \omega / \Omega \times \beta_{eff}$ olarak bulunacaktır. Burada; $\omega = \sqrt{K_I / m}$ ve Ω = osilasyon frekansıdır.

Aşağıdaki iki serbestlik dereceli sistemde;



Şekil 5.2 İki serbestlik dereceli sistemde izolatör uygulanması

$$\omega = \sqrt{K_I / (m_b + m)}$$

Bu sistemde 2 mod olacaktır. Modal frekanslar ve modal sönümleme oranları, Kelly (1997) tarafından aşağıdaki şekilde verilmiştir.

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \omega_I \sqrt{1 - \gamma \frac{\omega_I^2}{\omega_s^2}}, & \zeta_1 &= \zeta_I \left(1 - \frac{3}{2} \gamma \frac{\omega_I^2}{\omega_s^2} \right) \\ \omega_2 &= \frac{\omega_s}{\sqrt{1 - \gamma}} \sqrt{1 + \gamma \frac{\omega_I^2}{\omega_s^2}}, & \zeta_2 &= \frac{1}{\sqrt{1 - \gamma}} \left(\zeta_s + \zeta_I \gamma \frac{\omega_I}{\omega_s} \right) \left(1 - \frac{1}{2} \gamma \frac{\omega_I^2}{\omega_s^2} \right) \end{aligned}$$

Yapıda, izolatör sistemi olduğu için, 1.mod daha belirgin olacak ve sistem 1. Modda osilasyon yapacaktır.

$$\zeta_1 = \frac{1}{4\pi} \frac{\omega_D(\omega_1)}{E_S} \beta_{\text{eff}}(\omega_1) \cong \zeta_I$$

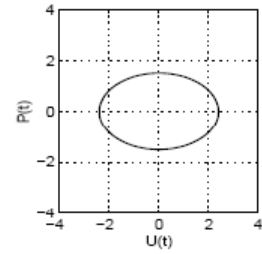
Bir çok sismik izolatörlü sisteminde, etkin sönümlenme katsayısının frekanstan bağımsız olduğu düşünülürse; 1. Moddaki modal sönümlenme katsayısı ile etkin sönümlenme katsayısının eşit olduğu kabul edilebilir. $\zeta_1 = \beta_{eff}$

5.2 Pratik İzolasyon Sistemlerinin Davranış Grafikleri

Sönümlenme sistemlerinin yükler altındaki davranışını aşağıdaki grafiklerde özetlenmiştir. Bu grafiklerde $P(t)$, sönümlenme kuvvetidir. $U(t)$ yer değiştirme vektörüdür.

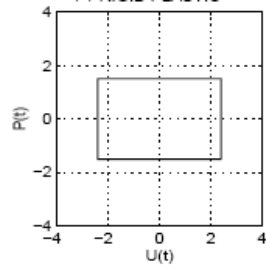
a. Viskus İzolasyon Modeli;

Yüksek sönümlenme değerine sahip lastik mesnetler için kullanılır.



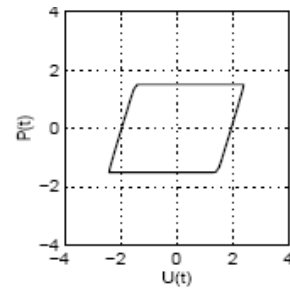
b. Rijit Plastik İzolasyon Modeli;

Kayar mesnetlerin davranışını verir.



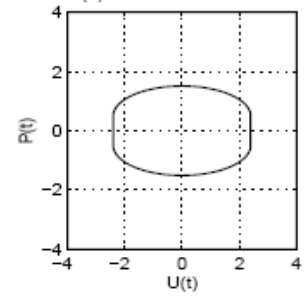
c. Elastoplastik Model;

Kurşun-lastik'ten oluşan mesnetlerdir.



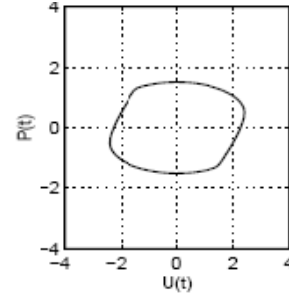
d. Viskoplastik Model;

Kayar mesnetler, viskoz akar sönümleyiciler, elastromerik mesnetler ve sürtünme sönümleyiciler, elastromerik mesnetler ve kontrol edilebilir akışkan sönümleyiciler, kayar mesnetler ve kontrol edilebilir akışkan sönümleyiciler bu gruptadır.



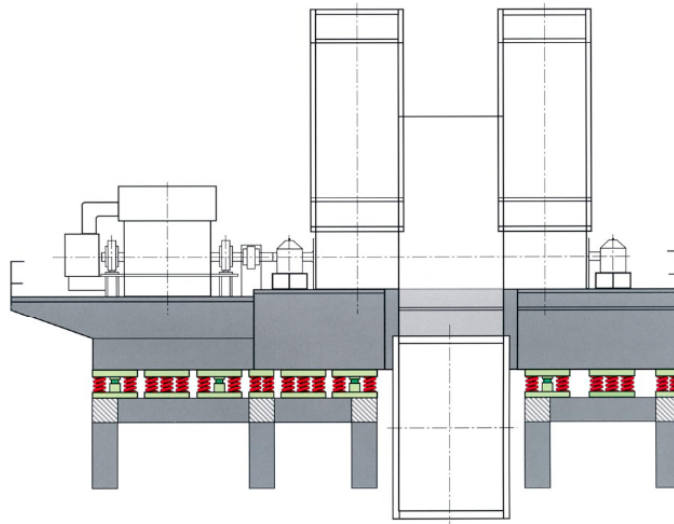
a. Elastoviskoplastik Model ;

Akışkan sönümleyici ya da dampersız, kurşunsuz lastik mesnetler bu gruptadır.

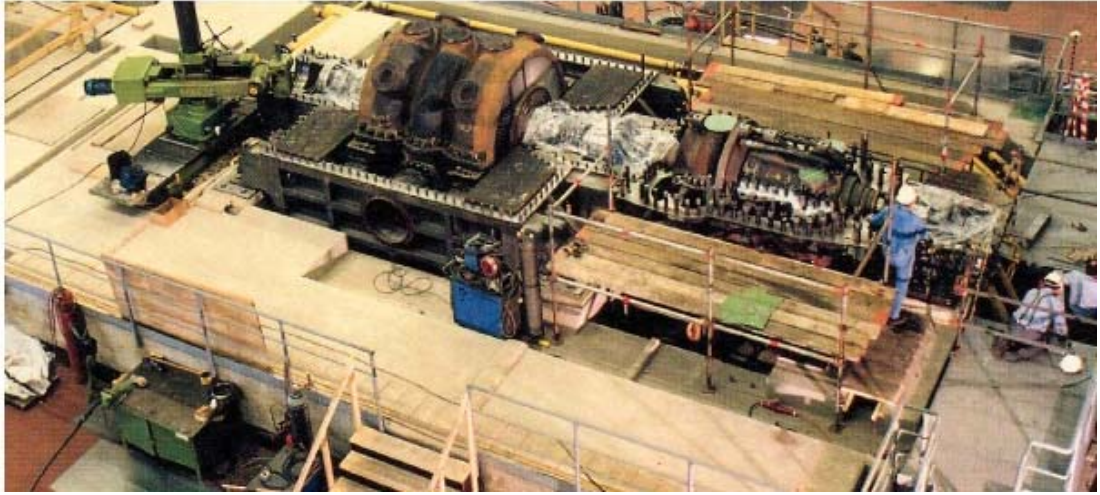


Şekil 5.3 Değişik İzolatör Tipleri için $P(t)$ - $U(t)$ grafikleri

5.3 Sönümleme Cihazlarının Uygulama Örnekleri



Şekil 5.4 İzolatör uygulanmış tabla tipi türbin temeli tipik kesit



Şekil 5.5 İzolatör uygulanmış temele 2000 tonluk gaz türbinin yerleştirilmesi



Şekil 5.6 Türbin temelinin altına yerleştirilen entegre viskoz sönümleyicili yay sistemi

6. DİNAMİK TEMEL TASARIMDA UYGULANAN SERVİS LİMİT DURUMLARI KONTROLLERİ

Önceki bölümlerde özetlenen konular ve parametrelerin tamamı, dinamik temellerin tasarımında yapılması gereken kontrollere dair temel teorik konularının özetlenmesi ve güncel olarak uygulanan mühendislik yaklaşımlarının tanıtılması amaçlanmıştır. Bu bölümde ise; standartlara göre tasarım aşamalarında yapılması gereken kontroller verilmektedir. Kontrol kapsamında; öncelikle Eigen mod'larının ve Eigen frekanslarının hesaplanır. Bunun ardından; titreşim değerleri veya hızları hesaplanarak değerlendirilir. En son olarak da dinamik ve statik temel rijitliğinin için gerekli kontroller yapılır. Aşağıda bu kontroller daha geniş şekilde açıklanmıştır.

6.1 Dinamik Parametrelerin Kontrolü

Makine temelinin dinamik davranışının değerlendirilmesi; f_n (eigen frekansı) ile f_m (işletme frekansı) karşılaştırılması ile olur.

DIN 4024'e göre;

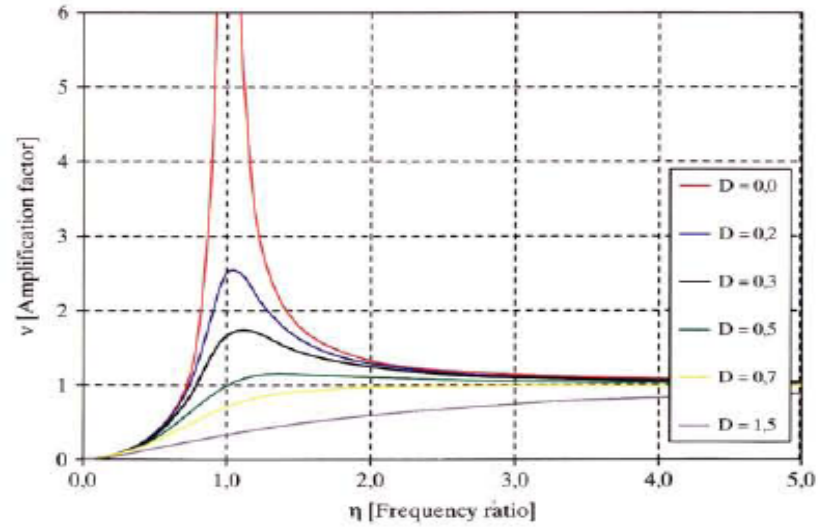
1.derece frekans'ın çalışma frekansından %25 çok ya da % 20 az olması gerekir.
 $f_1 \leq 0.8 f_m$ ya da $f_1 \geq 1.25 f_m$

Rezonansı engellemek için;

Daha yüksek dereceli doğal frekanslar, çalışma frekansında $\pm\%10$ farklı olmalıdır.

$f_1 \leq 0.9 f_m$ ya da $f_1 \geq 1.1 f_m$

Genelde; türbinlerin işletme frekansları 60 ya da 30 Hz dir. Jeneratörlerin işletme frekansları 50 ya da 25 Hz'dir. Pratikte bu frekansların %20 fazlası ya da azı incelenir. Her bir frekans için Eigen şekli irdelenir. Temelin Eigen frekanslarının bu aralıkta kalması durumunda, temelin dinamik karakteristiklerinin açık şekilde irdelenmesi gerekir. Eğer yapıya sönümleme uygulandıysa, Çizelge 6.1'de gösterilen farklı sönümleme değerleri için ($D=0-1,5$) verilen rezonans eğrisi ve büyütme faktörleri kullanılarak kontrol yapılmalıdır.(Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T., 2008)



Çizelge 6.1 Sönümleme D-Amplifikasyon Faktörü İlişkisi

6.2 İşletme Sırasındaki Titreşim Deplasmanlarının Belirlenmesi

Titreşim deplasmanı; s , aşağıdaki formülle hesaplanır. mikrometre cinsinden (0'dan pik değere) (Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T., 2008)

$$s = 1000 \cdot \frac{\sqrt{2} v_{eff}}{2\pi f} = \frac{450 v_{eff}}{2 \cdot f};$$

Burada v ; titreşim hızı, mm/s cinsinden $v = \sqrt{2} v_{eff}$ olarak hesaplanır.

6.3 İşletme Sırasındaki Titreşim Deplasmanlarının Değerlendirilmesi

Müsaade edilen deplasmanlar, harekete geçiren frekansa bağlıdır. Daha düşük rotor hızları, daha büyük temel kuvvetlerine müsaade eder.

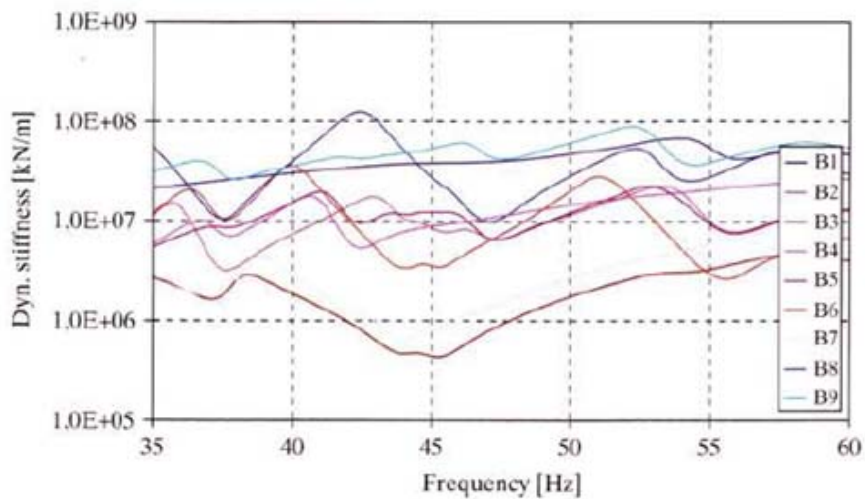
Eğer makine üreticisinden herhangi bir bilgi gelmediyse; deplasmanlar ISO 10816'ya göre değerlendirilir. ISO 10816 Bölüm 2'ye göre; Buhar türbinlerinde ; normal işletme koşullarında, deplasmanlar 12,1 mikrometre'den (r.m.s.) az olmalıdır.

$G=2,5$ balans kalite değerine göre ise, pik değerler 17,1 mikrometre'den az olmalıdır. Bu derece küçük deplasmanlar eğer makinenin balansı iyi değilse mümkün değildir. Çünkü giderek, aşınma ile dengesizlik artacaktır. (Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T., 2008)

Deplasmanlar her zaman tek bir mesnete uygulanan hareket ile hesaplanır. Daha sonra kareköklerin toplamı alınarak süperpoze edilir. Bu metot, tek bir maksimum deplasmanın bağımsız olduğunu kabul eder ki; bu istatistiksel olarak doğru bir kabuldür. (Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T., 2008)

6.4 Temelin Dinamik Rijitliği Kontrolü

Mesnet noktalarındaki dinamik rijitliği hesaplamak gereklidir. Makine yükünün hangi noktalardan, destekleyen temel sistemine aktarılacağı ile ilgili makine üreticisi kabuller yapar, bunlar da temelin şartlarını belirler. Örneğin makine üreticisi buhar türbininin 50 Hz'lik bir frekansta çalışırken, mesnet noktasında 4 kN/m lik bir dinamik rijitliği olmasını isteyebilir. Genelde; elastik destekli temellerin dinamik rijitliklerinin düşük olduğu düşünülse de, aslında konvansiyonel temellerden pek de farklı değillerdir. Çünkü rijitlik esas olarak ataletle bağlıdır. (Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T., 2008)



Çizelge 6.2 Dinamik rijitlik – frekans ilişkisi (Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T., 2008)

6.5 Temelin Statik Rijitliği

Statik rijitliğin sağlanması demek; temelde gerçekteşen toplam deplasmanın yanında, temeldeki değişik mesnet noktalarındaki relatif deplasmanların limitler içinde kaldığının belirlenmesi demektir. Bu amaçla veriler kendi içinde değerlendirilerek, malzeme mukavemetlerinin aşılmadığı kontrol edilir. (Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T., 2008).

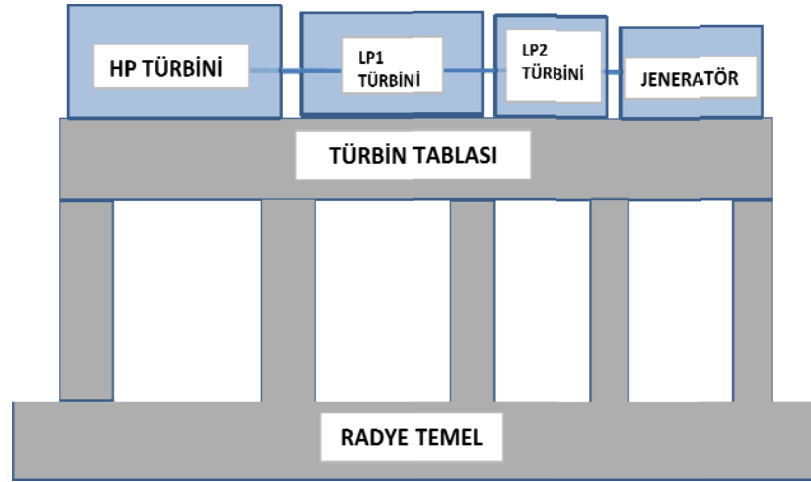
7 SAP 2000 PROGRAMI İLE TABLA TİPİ MAKİNE TEMELİNİN MODELLENMESİ VE DİNAMİK ANALİZİNİN YAPILMASI

Bu tez kapsamında; SAP2000’de modellenen tabla tipi makine temelinin geometrik ve kütle özellikleri literatürdeki benzerleri üzerinden belirlenmiş, sismik izolatör uygulamasından önce ve sonraki dinamik değerler gösterilmiştir. Ayrıca, değişik tipte sismik izolatörlerle yapılan tasarım sonucu ortaya çıkan sonuçlar incelenmiştir.

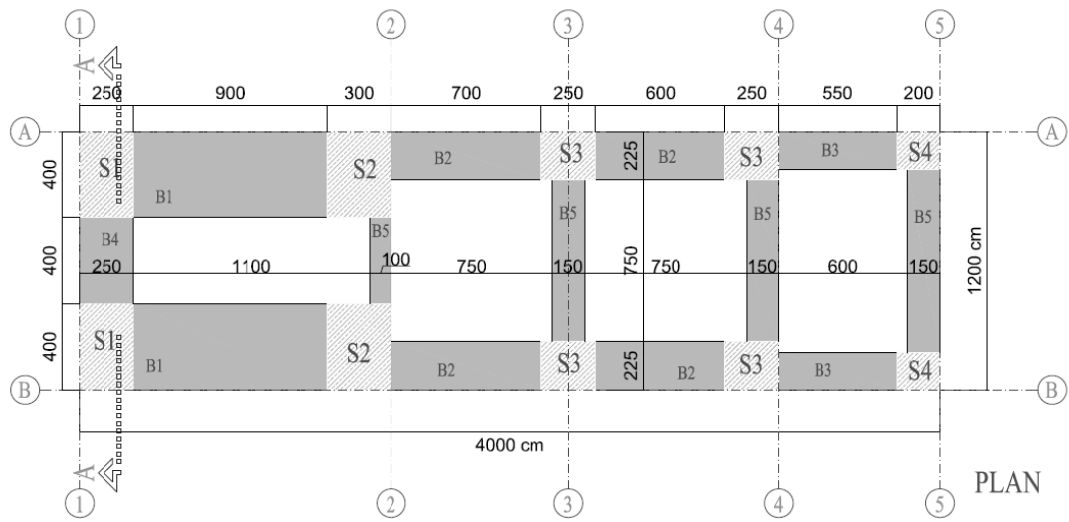
7.1 Tabla Tipi Temel Sisteminin Geometrisi

Modelde incelenen Turbo Jeneratör, bir rotor dizisinden oluşmaktadır. Bu rotor dizisi; 1 Adet Yüksek Basınç Türbini, 2 adet Düşük Basınç Türbini ve 1 adet Jeneratör’den oluşur. Şekil 7.1.’de gösterilen bu dizi, tabla tipi bir temel üzerine yerleştirilmiştir. Kolonların üstünde yer alan tablada boşluklar yer almaktadır. Bu boşluklar, makine boruları ve bakım amaçlıdır. Tablanın yükü ve makinelerin yükü kolonlar aracılığıyla en alttaki radye temel sistemine aktarılır.

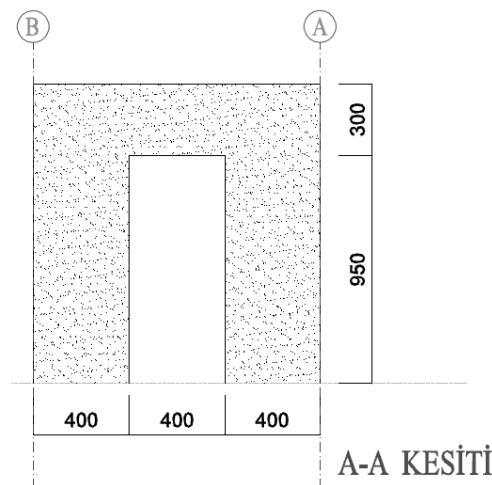
Tabla tipi türbin temeli bütün bir yapı olarak düşünülerek modellenir. Tabla altında titreşim izolasyon sistemi yerleştirildiğinde ise bu entegrasyon bozulacaktır. Buna uygun model ve analiz yapılır. Üst tabla ve altındaki temel yapısı ayrı ayrı modellenerek, türbinin analizi yapılır.



Şekil 7.1 Tipik Türbin Tabla Temeli Kesiti



Şekil 7.2 Modellenen tabla tipi türbin temeli planı



Şekil 7.3 Modellenen tabla tipi türbin temeli A-A kesiti

7.2 Temel Sisteminin SAP Modeli

Tez kapsamında teorik boyutlarda bir tabla modellenmiş, makine yükleri, yine çeşitli kaynaklardan derlenerek tablaya etki ettirilmiştir.

7.2.1. Malzeme Özellikleri

SAP2000’de beton özellikleri; $f_{ck} = 28 \text{ MPa}$, $E = 24 \cdot 10^6$, Poisson Oranı=0,2 olarak girilmiştir.

7.2.2. Temelin Geometrisi

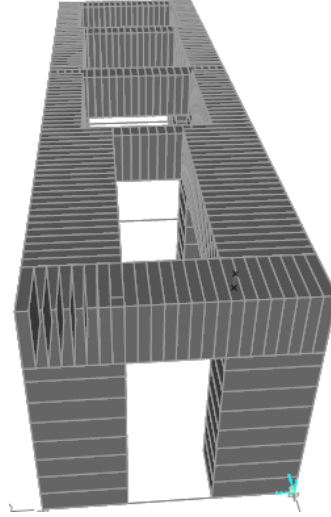
Temel 10 adet kolon üzerine yerleştirilmiştir. Kolon yükseklikleri 9,5 m’dir. Tabla ise 3 m kalınlığındadır. Sonlu elemanlar analizi yapılabilmesi için kirişler 0,5 m’de bir bölünmüştür. Aynı şekilde her bir kolon 0,5 m’de bir bölünmüştür.

Eleman Adı	En(m)	Boy(m)
B1	3	4
B2	3	2,25
B3	3	1,75
B4	3	2,5
B5	3	1
B6	3	1,5
S1	2,5	4
S2	3	4
S3	2,5	2,75
S4	2	1,25

Tablo 7.1 Çerçevenin geometrik özellikleri

7.2.3 Temele Etki Eden Kuvvetler

Tabla tipi temele 4 ana yük'ün etki ettiği düşünülmüştür. Bu yüklerin nasıl hesaplandığı ve etki ettirildiği aşağıda açıklanmaktadır.



Şekil 7.4 Tabla temel modeli 3D görünümü

7.2.3.1 Betonarme çerçevenin kendi ağırlığı

Eleman Adı	Eleman Adedi	Toplam Ağırlık (kN)
B1	2	8.200
B2	4	5.726
B3	3	1.856
B4	1	2.121
B5	1	848
B6	3	3.817
S1	2	5.891
S2	2	7.069
S3	4	6.627
S4	2	2.062
TOTAL		44.217

Tablo 7.2 Çerçevenin ağırlık özellikleri

SAP2000 programınca hesaplanıp, analize dahil edilmektedir.

7.2.3.2 Üretici tarafından verilen makine yükleri

Rotor dizisi için üretici tarafından verilen ağırlıklar HP Türbini: 2650 kN, LP1 Türbini: 2720 kN, LP2 Türbini: 3310 kN, Jeneratör: 3006 kN'dır. Bu yükler makineyi taşıyan ilgili kirişlere lineer olarak dağıtılmıştır.

Ekipman Adı	Ekipman Ağırlığı (kN)	Ekipman Oturduğu Kiriş Uzunluğu	Ekipman Oturduğu Kiriş Adedi	Ekipmanın her bir kirişe etki eden yükü (kN/m)
HP	2650	14,5	2	95
LP1	2720	8,25	2	165
LP2	3310	9,75	2	170
Jeneratör	3006	7,5	2	200

Tablo 7.3 Çerçeveye etki eden makinelerin yayılı yükleri

7.2.3.3 Makine hareketinin meydana getirdiği dengelenmemiş yükler

DIN ISO 1940 Tablo 1'de Türbin ve jeneratörler için Balans Kalite Seviyesi $G=2,5$ -- $e_{per}=2,5$ mm/s olarak verilmektedir. Ancak modelde; yüksek depremsellik düşünülerek, Balans Kalite Seviyesini $G=5,0$ -- $e_{per}=5,0$ mm/s olarak belirlenmiştir. Yine DIN ISO 1940'a göre dengelenmemiş kuvvetler aşağıdaki şekilde hesaplanır.

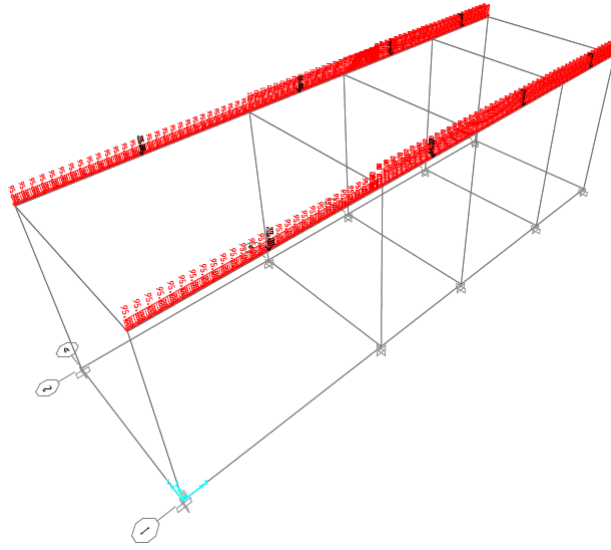
$$U_{per}(f_m) = e_{per} * \omega^2 * L / g \quad (\text{Formül 7.1})$$

Burada L ; rotatif ağırlık, f_m rotasyon hızı, $\omega = \omega_m = 2 \pi f_m$ (açısal frekans), $g=10 \text{ m/s}^2$ dir. Türbin dizisi için yukarıdaki formülle hesaplanan dengelenmemiş yükler, tablo 7.4'de gösterildiği üzere hesaplanmıştır.

Makine	$e_{per} * \omega^2$ (mm/s)	f_m (Hz)	L (kN)	U (dengelenmemiş kuvvet) (kN)	Etki Aralığı
HP Türbin	5.0	50	142	23	A/1-2, B/1-2
LP1 Türbin	5.0	50	282	44	A/2-3, B/2-3
LP2 Türbin	5.0	50	282	44	A/3-4, B/3-4
Jeneratör	5.0	50	233	37	A/4-5, B/4-5

Tablo 7.4 Dengelenmemiş makine yükleri

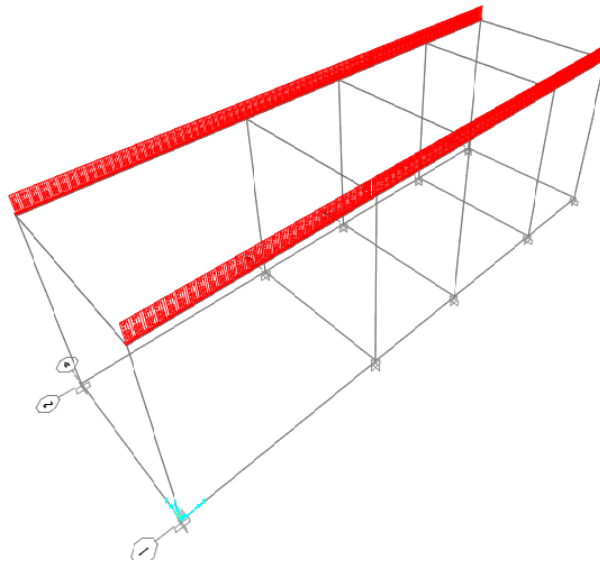
Tablo 7.4’de verilen dengelenmemiş yükler, tablada kendilerini taşıyan kiriş ortalarına tekil yük olarak etki ettirilmiştir.



Şekil 7.5 Makine Kuvvetlerinin ve Dengelenmemiş Kuvvetlerin Etki Ettirilmesi

7.2.3.4 Hareketli Yükler

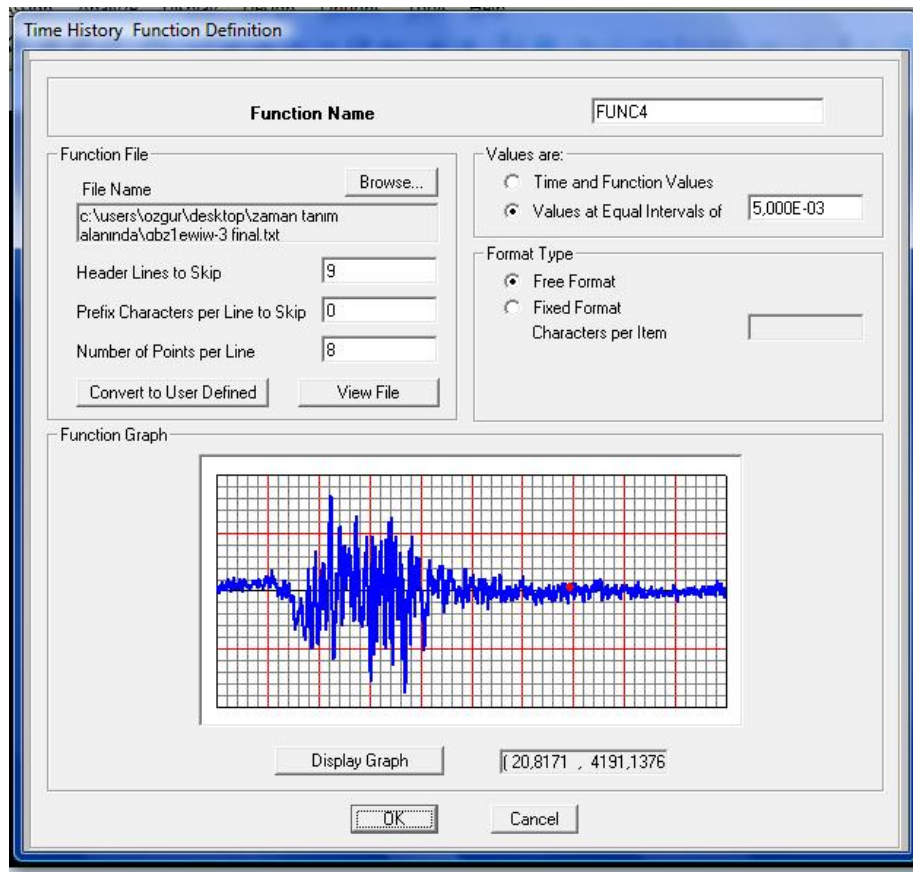
Tabla tipi temele, bu tip makinelerin işletme ve bakımı sırasında ortaya çıkabilecek hareketli yükler tanımlayan, DIN 4024’e göre alınan; 5 kN/m^2 hareketli yük etki ettirilmiştir.



Şekil 7.6 Hareketli Yükün Etki Ettirilmesi

7.2.4 Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi ile Deprem Analizi

Deprem Bölgelerinde Yapılacak Binalar Hakkında Yönetmelik (2007) Madde 2.9’da tanımlanan “Zaman Tanım Alanında Hesap Yöntemi” kullanılarak yapının deprem yükleri karşısında yapısal analizi yapılmıştır. Yukarıda açıklanan; tabla tipi türbin temelinin SAP2000 modeline; 1999 İzmit Depremi’nde Gebze istasyonunda kaydedilen Doğu – Batı Yönündeki deprem ivme değerleri etki ettirilmiştir. ODTÜ Deprem Araştırma Laboratuvarı web sitesinden alınan ivme değerleri, 0,05 saniye aralıkla kaydedilmiştir.



Şekil 7.7 1999 İzmit Depremi Gebze İstasyonu Doğu – Batı Yer İvmesi Grafiği

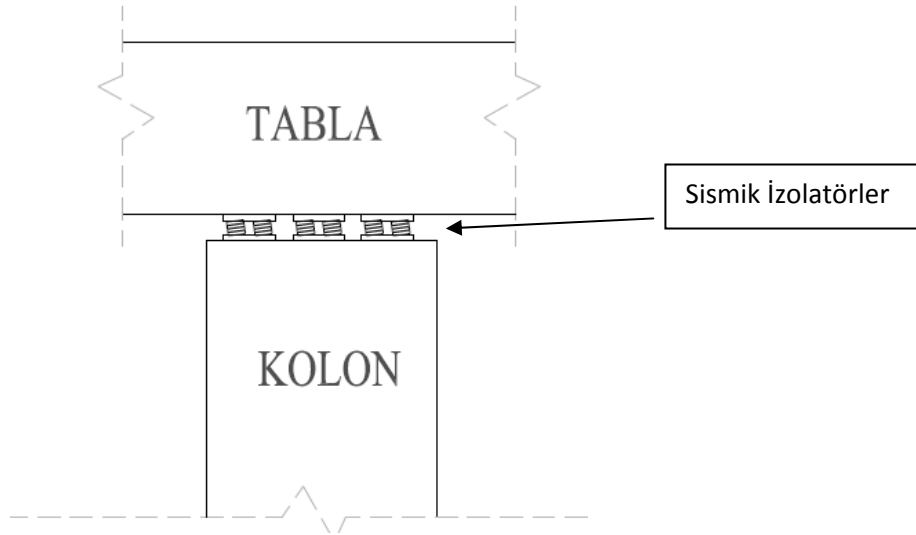
7.2.5 Kolon Başlıklarında Kullanılan İzolatörlerin Özellikleri

SAP2000 modelinde kolonlarla tablanın birleştiği düğüm noktalarına; Tablo 7.5’de verilen yay sabitli izolatörler uygulanmıştır.

İzolatör Tipi	U1 yönünde etki ettirilen yay sabiti	U2 yönünde etki ettirilen yay sabiti	U3 yönünde etki ettirilen yay sabiti
Tip 1	200 kN/cm	50 kN/cm	50 kN/cm
Tip 2	400 kN/cm	100 kN/cm	100 kN/cm
Tip 3	600 kN/cm	150 kN/cm	150 kN/cm

Tablo 7.5 Sismik İzolatörlere ait yay sabitleri

Bu değerlerin seçilmesinin nedeni benzer büyüklüklerdeki gerçek yapılarda; uygulanan benzer büyüklükte izolatörler literatürde yer almaktadır. (Sarrazin, et.all, 2000)



Şekil 7.8 Kolon – İzolatör – Tabla Modeli

7.3 Zaman Tanım Alanında Yapılan Analizle Bulunan Değerlerin Genel Yorumu ve Sonuç

7.3.1 Sistemin Frekans ve Deplasman Değerlerinin Yorumlanması

Aşağıdaki tablolarda SAP2000’de yapılan tabla tipi temel sisteminin zaman tanım alanında analizi sonucu ortaya çıkan maksimum deplasmanlar ve frekans değerleri verilmiştir.

	Maks. U1 (cm)	Maks. U2 (cm)	Maks. U3 (cm)	Maks. R1 (Radians)	Maks. R2 (Radians)	Maks. R3 (Radians)
Sismik İzolatörsüz	-8,30E-03	-7,50E-03	-5,21E-02	-5,00E-05	-4,00E-05	-1,30E-07
	6,90E-03	7,50E-03	-5,21E-02	5,00E-05	6,10E-05	1,30E-07
Sismik İzolatörlü; Tip 1	-5,54E-01	-2,30E-02	-1,28E+01	-4,70E-05	-1,03E-03	-9,98E-08
	0,00E+00	2,30E-02	9,87E-02	4,70E-05	0,00E+00	9,98E-08
Sismik İzolatörlü; Tip 2	-4,20E-01	-2,20E-02	-6,81E+00	-4,60E-05	-7,84E-04	-1,57E-07
	0,00E+00	2,20E-02	7,10E-02	4,60E-05	0,00E+00	1,57E-07
Sismik İzolatörlü; Tip 3	-3,37E-01	-2,12E-02	-4,70E+00	-4,60E-05	-6,36E-04	-1,96E-07
	0,00E+00	2,12E-02	5,40E-02	4,60E-05	0,00E+00	1,96E-07

Tablo 7.6 Lineer ve Açısal deplasmanlar

Tablo 7.6’deki değerler incelendiğinde sismik izolatör uygulamasıyla lineer deplasmanlarda küçük bir artış gözlemlenmektedir. Modelde mesnet noktalarında yay serbestliği verilmesi nedeniyle bu artış normaldir. Tip 1 sismik izolatör uygulandığında ortaya çıkan deplasmanların daha büyük olduğu, ardından modelde daha rijit olan Tip 2 ve Tip 3 sismik izolatörler kullanıldığında deplasman değerlerinin küçüldüğü gözlenmiştir.

Türbin Tabla Temel SAP2000 Modeli	Mode	Period	Frekans	Dairesel Frekans	Eigenvalue	Modal Participating Mass Ratios		
		Sec	Cyc/sec	rad/sec	rad2/sec2	UX	UY	UZ
Sismik İzolatörsüz	1	0,315776	3,1668	19,898	395,91	1,086E-18	0,32567	1,196E-19
	2	0,269303	3,7133	23,331	544,35	0,78802	0	0,00038
	3	0,188183	5,314	33,389	1114,8	4,104E-18	0,4299	8,749E-17
	4	0,147563	6,7768	42,58	1813	4,375E-19	0,01065	3,25E-17
	5	0,130478	7,6641	48,155	2318,9	6,628E-17	0,01796	2,553E-15
	6	0,081357	12,291	77,229	5964,4	1,263E-15	0,00053	1,701E-15
	7	0,073813	13,548	85,123	7245,9	1,537E-05	9,174E-15	0,19067
	8	0,064357	15,538	97,63	9531,6	7,866E-13	0,00015	2,231E-13
	9	0,05764	17,349	109,01	11883	0,00035	3,94E-15	0,00063
	10	0,057241	17,47	109,77	12049	4,277E-15	0,00021	2,745E-15
	11	0,053443	18,712	117,57	13822	0,00106	3,244E-13	0,00644
	12	0,049652	20,14	126,55	16014	0,00189	1,28E-13	0,00076
Sismik İzolatörlü; Tip1	1	1,380235	0,72451	4,5523	20,723	0	0,558	0
	2	1,37001	0,72992	4,5862	21,034	0,559	0	0,0001167
	3	0,688019	1,4534	9,1323	83,399	3,119E-05	7,484E-18	0,542
	4	0,478512	2,0898	13,131	172,41	1,236E-19	0,001776	7,372E-19
	5	0,351329	2,8463	17,884	319,84	0,00316	1,983E-16	0,009536
	6	0,193316	5,1729	32,502	1056,4	2,206E-16	0,018	1,865E-17
	7	0,170532	5,864	36,845	1357,5	0,0005087	5,202E-17	0,0005979
	8	0,159704	6,2616	39,343	1547,9	1,815E-16	0,002201	1,256E-15
	9	0,142014	7,0415	44,243	1957,5	1,259E-15	0,001105	1,485E-14
	10	0,138309	7,2302	45,428	2063,7	3,524E-16	3,036E-05	6,024E-16
	11	0,106007	9,4333	59,271	3513,1	3,702E-17	0,002689	1,844E-16
	12	0,098002	10,204	64,113	4110,4	0,012	1,443E-17	0,0007954
Sismik İzolatörlü; Tip2	1	0,995362	1,0047	6,3125	39,847	2,135E-20	0,562	0
	2	0,980383	1,02	6,4089	41,074	0,564	0	0,0002711
	3	0,494547	2,0221	12,705	161,42	0,0001106	9,08E-20	0,526
	4	0,450912	2,2177	13,934	194,17	4,557E-19	0,004247	2,371E-18
	5	0,301339	3,3185	20,851	434,76	0,001801	1,033E-17	0,026
	6	0,183488	5,4499	34,243	1172,6	5,279E-15	0,014	2,621E-17
	7	0,164699	6,0717	38,15	1455,4	0,0006054	6,704E-19	0,000883
	8	0,15842	6,3123	39,662	1573	3,377E-16	0,002358	1,058E-14
	9	0,140312	7,127	44,78	2005,3	8,853E-17	0,0009959	7,761E-16
	10	0,135962	7,355	46,213	2135,6	1,516E-16	7,341E-06	1,541E-15
	11	0,104325	9,5854	60,227	3627,3	6,009E-18	0,00259	9,191E-16
	12	0,096591	10,353	65,049	4231,4	0,016	1,683E-15	0,0006986
Sismik İzolatörlü; Tip3	1	0,826478	1,21	7,6024	57,796	2,794E-19	0,566	0
	2	0,808373	1,2371	7,7726	60,414	0,568	2,309E-19	0,0003903
	3	0,428773	2,3322	14,654	214,74	1,206E-18	0,006919	5,652E-18
	4	0,40909	2,4445	15,359	235,9	0,000212	3,077E-18	0,51
	5	0,267661	3,7361	23,474	551,05	0,0012	1,657E-16	0,043
	6	0,175673	5,6924	35,766	1279,2	1,632E-14	0,011	2,572E-16
	7	0,159423	6,2726	39,412	1553,3	0,0006987	5,751E-18	0,001261
	8	0,157026	6,3684	40,014	1601,1	3,762E-16	0,002738	1,21E-14
	9	0,13932	7,1777	45,099	2033,9	4,29E-17	0,0008779	1,147E-15
	10	0,133078	7,5144	47,214	2229,2	5,533E-16	2,626E-05	1,343E-15
	11	0,102712	9,736	61,173	3742,1	1,274E-17	0,002498	1,72E-15
	12	0,095287	10,495	65,94	4348,1	0,02	3,889E-15	0,0006193

Tablo 7.7 Frekans ve Periyot değerleri

Tablo 7.7’ deki değerler, izolatör uygulanmış sistemin deprem yükü uygulandığında frekanslarının azaldığı, periyotlarının arttığı göstermektedir. Bu literatürdeki izolatör uygulanmış sistemlerin davranışı ile uyumludur. Değişim

birinci mod'da %430'ler, ikinci mod'da %500'ler seviyesindedir. Yapıda kullanılan yay sisteminin rijitliği arttıkça yapının sismik izolasyon uygulanmayan değerlere yaklaştığı görölmektedir. Bu bilgi optimum rijitlikte izolatör seçilmesinin, sismik izolasyon uygulamasından beklenen faydanın sağlanması açısından önemli olduğunu göstermektedir. Uygun tipte sismik izolatör uygulaması ile; yapının daha uzun periyotlara sahip olması, yapısal stabilite ve deprem esnasında tabla tipi temelden üstündeki ekipmana aktarılacak yüklerin azalması açısından yapısal iyileştirmedir. Ayrıca sismik izolatör uygulaması; temelin doğal frekansı ile üstündeki ekipmanın işletme frekansının birbiriyle olan farklılığının artması sağlanmaktadır. Bu da deprem dışı durumlarda da; temelin doğal frekansı ile makinenin frekansının çakışarak rezonansın engellenmesi açısından önemli bir yapısal iyileştirmedir. Bu sayede daha az kütleli yapıların tasarımı ve uygulaması söz konusudur olacaktır. Sonuç olarak; hem deprem esnasındaki hem de normal işletme koşulları altındaki faydalarından dolayı dinamik ekipman temelinde sismik izolatör uygulaması gerekli bir mühendislik çözümüdür.

7.3.2. SONUÇ ve ÖNERİLER

Dinamik ekipmanlar için temel tasarımı; yapıya aktarılan dinamik kuvvetlerin yapıda yarattığı etki, deprem yükü altında ekipmanların servis sağlayabilirliğinin korunması, depremden dolayı yüksek maliyetli ekipmanların hasar görmemesi, bütün bunların yanında hayat hatlarının sürekliliğin sağlanması konuları açısından çok önemli bir mühendislik problemidir. Bu tez kapsamında; sismik izolatörlerin kullanılmasının binanın deprem yükleri karşısında performansını arttırdığı izlenmiştir. Modal sönümleme oranı ve efektif sönümleme katsayısı belirlenmiş sismik izolatörlerin yapılarda kullanılması sayesinde, dinamik yüklerin ve deprem yüklerinin yapılarda yaratacağı dinamik etki azaltılmaktadır. Sismik olarak izole edilmiş binaların periyodu, izole edilmemiş binaya göre önemli ölçüde artmakta, bu sayede yapının deprem karşısındaki tepkisinde iyileşme görülmektedir. Ayrıca; sismik izolatörler dinamik yük üreten ekipmanlarla temelin doğal frekansı arasındaki farkı arttırarak rezonansı engellemektedir. Bütün bu katkılar düşünüldüğünde; dinamik yük üreten makinelerin temel sistemlerinde, yapıların ve içindeki ekipmanların beraberce deprem güvenliğinin arttırılması için sismik izolatörlerin avantajlarından faydalanılması önerilir.

8 KAYNAKLAR

1. ACI 351.3R-04: Foundations for Dynamic Equipment, Reported by ACI Committee 351
2. Bowles, J., "Foundation Analysis and Design", Fifth Edition
3. Arslan A., Siyahi B., Ertas O., "Investigations of Site Response of Soil Column by True Nonlinear and Linear Method of Analysis"
4. P.St. Fleischer & P.G.Trombik, "Turbo Generator Machine Foundations Subjected to Earthquake Loadings", 14th World Conference on Earthquake Engineering, 2008Beijing, China
5. Nawrotzki, P., Hüffmann G., Uzunoglu T. "Static and Dynamic Analysis of Turbine Foundations", Structural Engineering International, 3/2008
6. Sarrazin M., Moroni O., Boroschek R., Loyola F., Retamales R., "Seismic Behavior of Industrial Facilities With Energy Dissipators", 12th World Conference on Earthquake Engineering, 2000
7. Eehalt U., Lüneburg B., Staubach R., Daniel C., Strackeljan J., Woschke E., "Methods to Incorporate Foundation Elasticities in Rotordynamic Calculations", SIRM 2009, 8th International Conference on Vibrations in Rotating Machines, Vienna, Austria, 2009
8. Foundation Isolation Solutions for Equipment and Machines, Fabreeka International Inc. Company Booklet
9. Park R., "Improving the Resistance of Structures to Earhquakes" Hopkins Lecture, University of Canterbury, New Zealand, 2000
10. Rourke D., Holzer T., Rojahn C., Tierney K., "Contributions of Earthquake Engineering " Earthquake Eng. and Research Institute Report, 2008, USA
11. Deprem Bölgelerinde Yapılacak Yapılar İçin Yönetmelik, 2007
12. EN1998-1, Eurocode 8, Design of Structures for Earthquake Resistance
13. Building Seismic Safety Council "NEHRP Recommended provisions for seismic regulations for new buildings and other structures - Chapter 13 Seismically Isolated Structures Design Requirements" 1997 Edition
14. Makris N., Po Chang S., "Effect of Damping Mechanisms on the Response of Seismically Isolated Structures" PEER Report 1998/06, Pacific Earthquake Eng. Research Center, College of Eng., University of California, Berkeley

9 ÖZGEÇMİŞ

2000 Yılında Orta Doğu Teknik Üniversitesi İnşaat Mühendisliği Bölümü'nden mezuniyetinin ardından, sanayi yapılarının tasarımı üstüne uzmanlaşmış olan Prokon Müh. Müş. A.Ş.'de (Ankara) çalışmaya başlamıştır. 2000-2005 yılları arasında; "İstanbul Boğazı Tüp Geçişi ve Yüzeysel Metro Hattı Mühendislik Hizmetleri", "8 Yıllık Kesintisiz Eğitim İlköğretim Okulları Mühendislik Müşavirlik Hizmetleri", "İzmit 200 Yataklı Kadın Doğum ve Çocuk Hastalıkları Hastanesi Mühendislik ve Müşavirlik Hizmetleri", projelerinde görev almıştır. 2002'de Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü'nde Yüksek Lisans'a başlamış, dersleri tamamlanmasının ardından 2005 yılında Enka A.Ş.'nin Moskova Sheremetyevo Uluslararası Havalimanı Terminali'nde göreve başlamıştır. 2009 Bahar yarı yılı itibariyle Yüksek Lisans Tezi'ni tamamlamak üzere Türkiye'ye dönmüştür. Halen EnerjiSA Bandırma Kombine Çevrim Santrali (919 MW) projesi müteahhitlik hizmetlerini yürüten Kalemci Yapı A.Ş.'de (Ankara) çalışmaktadır.

