

KÖPRÜ AYAKLARI VE BİNALARDAKİ YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Tuğberk Doğançay

Bitirme Tezi

İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı



T.C.
ONDOKUZ MAYIS ÜNİVERSİTESİ
MÜHENDİSLİK FAKÜLTESİ İNŞAAT
MÜHENDİSLİĞİ BÖLÜMÜ



KÖPRÜ AYAKLARI VE BİNALARDAKİ YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

Tuğberk Doğançay

Bitirme Tezi
İnşaat Mühendisliği Geoteknik Anabilim Dalı

Danışman
Doç. Dr. Mustafa Vekli

Haziran 2025

Bu Çalışma, jürimiz tarafından İnşaat Mühendisliği Bölümünde Bitirme
Ödevi olarak kabul edilmiştir.

.../.../2025

Danışman :

Üye :

Üye :

ONAY:

Yukarıdaki imzaların, adı geçen öğretim elemanlarına ait olduğunu onaylarım.

..../.../2025

İnşaat Mühendisliği Bölüm Başkanı

ÖZET

Bu çalışma, İnşaat mühendisliği alanında köprü ayakları ve binalardaki yapı-zemin etkileşimini incelemektedir. Yapı-zemin etkileşimi, zemin ve yapı arasındaki karşılıklı etkileşimleri ve bu etkileşimlerin yapıların güvenliği, dayanıklılığı ve performansı üzerindeki etkilerini ele almaktadır. Özellikle köprü ayakları ve binalar gibi taşıyıcı sistemlerin tasarımında zemin koşullarının büyük rolü bulunmaktadır.

Çalışma, yapı-zemin etkileşiminin temellerini, etkileşimi etkileyen faktörleri ve bu etkileşimin mühendislik uygulamalarındaki önemini açıklamaktadır. Köprü ayaklarının ve binaların temellerinin zemin ile olan etkileşimleri detaylandırılmış, farklı zemin türlerine göre tasarım yaklaşımları sunulmuştur. Ayrıca, sismik etkiler ve zemin sıvılaşması gibi dinamik faktörlerin bu etkileşime etkileri tartışılmıştır.

Binaların ve köprü ayaklarının temel tasarımında zemin özelliklerinin doğru analiz edilmesi, güvenli ve verimli yapıların inşa edilmesi için kritik bir öneme sahiptir. Yapı-zemin etkileşiminin modellenmesi için kullanılan sayısal yöntemler ve yazılımlar, doğru analizlerin yapılmasında mühendislik pratiği için önemli araçlar sunmaktadır.

Sonuç olarak, bu çalışma, yapı-zemin etkileşiminin mühendislik tasarımı üzerindeki etkilerini ve bu etkileşimin analiz edilmesinin gerekliliğini vurgulamaktadır. Ayrıca, gelecekteki mühendislik projelerinde yapı-zemin etkileşiminin daha etkin bir şekilde kullanılması için öneriler sunulmaktadır.

TEŞEKKÜR

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren Tez Danışmanım Sayın Doç. Dr. Mustafa Vekli'ye sonsuz şükranlarımı sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
TEŞEKKÜR.....	ii
İÇİNDEKİLER.....	iii
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	iv
TABLolar LİSTESİ.....	v
1. GİRİŞ.....	1
1.1 Yapı-zemin etkileşiminin tanımı.....	1
1.2 İnşaat mühendisliği açısından önemi.....	2
1.3 Köprü ayakları ve Binalar için etkileşimin rolü.....	3
2. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ KAVRAMI.....	4
2.1 Yapı-zemin etkileşiminin tanımı ve temel ilkeleri.....	5
2.2 Etkileşimi etkileyen faktörler.....	7
2.3 Zemin özelliklerinin yapı üzerindeki etkisi.....	9
3. KÖPRÜ AYAKLARI VE YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ.....	11
3.1 Köprü Ayaklarındaki Yapı-Zemin Etkileşimi.....	11
3.2 Etkileşimi Etkileyen faktörler.....	12
3.3 Zemin Türüne Göre Köprü Ayakları Tasarımı.....	14
4. BİNALARDA YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ.....	16
4.1 Binalarda zemin ile etkileşim.....	16
4.2 Temel türlerinin zeminle olan etkileşimi.....	18
5. ZEMİN-ŞEV VE SİSMİK ETKİLER.....	20
5.1 Şevlerde yapı-zemin etkileşimi.....	21
5.2 Zemin sıvılaşması ve deprem etkisi.....	22
5.3 Sismik analizlerin köprü ve bina tasarımındaki rolü.....	24
6. PRATİK UYGULAMALAR VE ÖRNEKLER.....	26
7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME.....	31
7.1 Yapı-zemin etkileşiminin tasarımdaki önemi.....	31
7.2 Sonuçların mühendislik pratiğine katkıları.....	32
8. KAYNAKLAR.....	33

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1	Yapı-Zemin Etkileşim.....	2
Şekil 2.1	Tek Boyutlu Saha Tepki Analizi.....	4
Şekil 2.2	Tek Boyutlu Saha Tepki Analizi.....	5
Şekil 2.2.1	Temel Türleri.....	8
Şekil 4.1	Yük Türleri ve Gösterimleri.....	16
Şekil 4.2	Temel Çeşitleri.....	16
Şekil 4.3	Sıvılaşma.....	17
Şekil 5.1	Sismik Tehlike Analizi.....	25
Şekil 6.1	Kazıklı Temellerde Kazık Düzeni.....	26
Şekil 6.2	Sismik Deprem İzolatörleri-LDRB İzolatörler.....	27
Şekil 6.3	Plaxis Programında Modellenen 2 no’lu Kayma Mekanizması.....	28
Şekil 6.4	Jet Grout Yöntemi.....	29
Şekil 6.5	İtme (Pushover) Analizi.....	30
Şekil 6.6	Temel Drenajı Sistemi Yapım Metodu.....	30

TABLolar LİSTESİ

Tablo 3.1 Zemin Özelliklerinin Yapı Üzerindeki Etkileri Tablosu.....	14
Tablo 3.2 Zemin Türü-Uygun Temel Türü Tablosu.....	15
Tablo 4.1 Temel Türleri ve Zeminle Etkileşim Özeti.....	18
Tablo 4.2 Zemin Türüne Göre Temel Davranışları.....	19
Tablo 5.1 Şev Stabİlİtesİnİ Etkİleyen Başlıca Faktörler.....	20
Tablo 5.2 Şevlerde Yapı-Zemin Etkileşimİnİ Etkİleyen Temel Faktörler.....	21
Tablo 5.3 Yapıların Şev Üzerİne Yerleşİmİ-Uygulama Örnekleri.....	22
Tablo 5.4 Sıvılaşmaya Etkİ Eden Faktörler.....	23

1. GİRİŞ

Yapı-zemin etkileşimi, inşaat mühendisliğinde oldukça önemli bir konudur ve özellikle köprüler ile binaların tasarımında kritik bir rol oynamaktadır. Zemin, yapıların dayanıklılığı ve güvenliği üzerinde doğrudan etkiye sahiptir, çünkü zemin özellikleri yapının taşıma kapasitesini, stabilitesini ve davranışını şekillendirir. Zemin ve yapının karşılıklı etkileşimi, hem yapıların kısa vadeli hem de uzun vadeli performansını etkileyen önemli bir faktördür.

Bu çalışmanın amacı, köprü ayakları ve binalarda yapı-zemin etkileşiminin tasarım ve mühendislik uygulamaları üzerindeki etkilerini incelemektir. Köprü ayakları ve binaların temelleri, zeminle olan etkileşimleri nedeniyle yapıların güvenliğini doğrudan etkiler. Zemin türü, yer altı su seviyesi, zemin sıvılaşması gibi parametreler, bu etkileşimi şekillendirerek yapının davranışını etkiler.

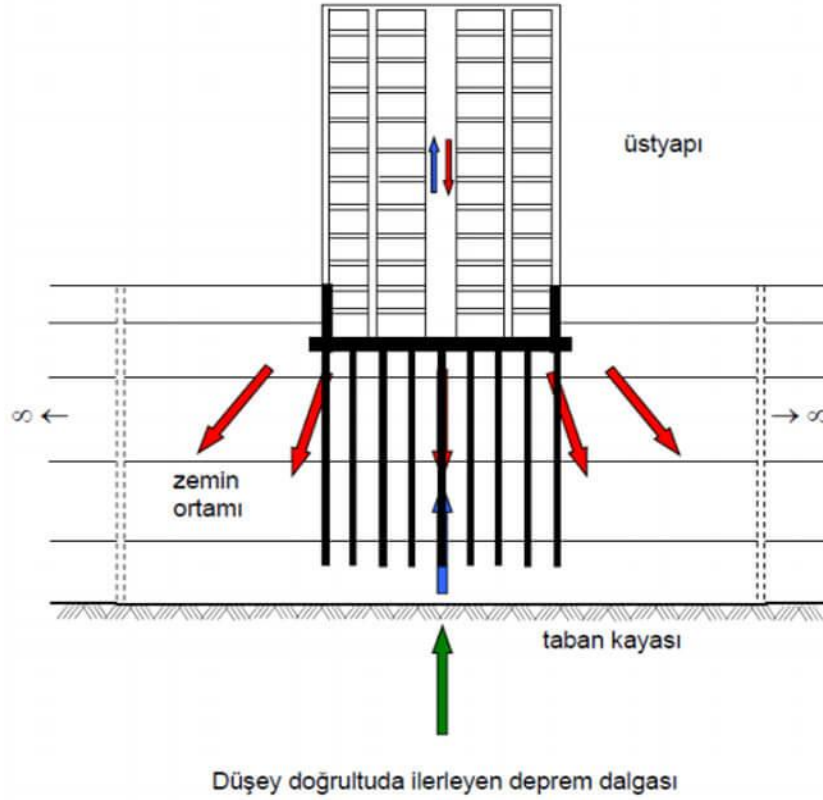
Yapı-zemin etkileşiminin doğru bir şekilde anlaşılması, yapıların güvenliğini artırırken, inşaat maliyetlerinin de optimize edilmesine olanak tanır. Bu bağlamda, yapının zeminle olan etkileşimi, yalnızca statik yükler değil, aynı zamanda dinamik yükler, sismik etkiler ve çevresel faktörler gibi dinamik durumlar için de kritik bir değerlendirme alanıdır. Çalışma, bu etkileşimin temel prensiplerine odaklanarak, köprü ayakları ve binalar arasındaki benzerlikleri ve farklılıkları incelemeyi amaçlamaktadır.

1.1 Yapı-zemin etkileşiminin tanımı

Yapı-zemin etkileşimi en genel ifade ile üstyapı-zemin ortam ve varsa kazıkların deprem etkisi altında karşılıklı olarak birbirlerini (zemin tepkisinin yapıyı, yapı tepkisinin de zemini) etkilemesi olarak tanımlanır. Şekil 1 'de görüleceği gibi taban kayasında tanımlanan deprem hareketi zemin ortam içerisinde yayılarak yapı temeline ulaşır, deprem dalgalarının bir kısmı temelden yansıyarak zemin ortam içerisine tekrar yayılır bir kısmı ise üstyapıya geçerek üstyapı ve temelde eylemsizlik kuvvetlerine yol açar.

Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği ile kapsamı genişletilen ve belirli zemin, deprem tasarım ve bina yükseklik sınıfı kriterlerine göre yapılması zorunlu tutulan yapı-zemin etkileşim analizleri genel olarak deprem davranışının önemli olduğu rijit ve büyük ölçekli : nükleer güç santralleri, yüksek binalar, barajlar , viyadükler, asma köprüler vb. yapılarda ve aynı zamanda makine temelleri, demiryolu-karayolu trafiğinin yoğun yerleşim bölgesinden geçmesi gibi durumlarda sürekli dinamik etkiye maruz kalınması ve yüksek seviyedeki titreşimlerin çevre yapılara etkilerinin değerlendirilmesi açısından gerekli olmaktadır.

Deprem etkisi altında yapılan geleneksel analiz yöntemlerinde: yapının taşındığı zemin ortamın şekil değiştirmedeği kabulü ile rijit temel varsayımı söz konusu olur. Bunun sonucu olarak yapı, temelinden zemine ankastre bağlı (fixed base) bir sistem, yer hareketi de (deprem verisi) yapının varlığından etkilenmeyen yatay bir rijit ötelenme olarak ele alınır. Yapı-zemin etkileşimi yapı elemanlarının zemin ortam içerisindeki varlığı nedeniyle temel tabanındaki deprem hareketinin serbest zemin hareketine göre değişimini içermektedir. Yapı-zemin etkileşiminin etkilerinin incelenmesi amacıyla bir yapının kaya veya zemin ortam üzerine oturtulduğu durumlarda deprem etkisine vereceği tepkiler incelenebilir.



Şekil 1.1 Yapı-Zemin Etkileşim (volkanatabey.com.tr,2013)

1.2 İnşaat mühendisliği açısından önemi

Tanım:

Yapı-zemin etkileşimi, inşaat mühendisliğinde büyük bir öneme sahiptir çünkü bir yapının güvenliği, dayanıklılığı ve performansı, doğrudan zeminin özelliklerine ve yapının bu zeminle olan etkileşimine bağlıdır. Bunlardan en önemli olanları alt başlık olarak aşağıda belirtilmiştir ve açıklanmıştır.

- ✓ **Güvenli İnşaat:** Zemin etüdü, zeminin taşıma kapasitesini ve diğer özelliklerini analiz ederek güvenli bir inşaat süreci için gerekli tedbirleri almayı sağlar.
- ✓ **Maliyet Tasarrufu:** Zemin sorunları önceden tespit edilerek, ileri aşamalarda oluşabilecek hasar ve maliyetler minimize edilir.
- ✓ **Doğru Temel Tasarımı:** Mühendislerin doğru temel tasarımı yapmalarını sağlayarak, inşaat sırasında karşılaşılabilecek sorunları minimize eder.
- ✓ **Deprem Performansı:** Deprem yükleri altında zemin-temel-yapı etkileşiminin doğru modellenmesi, yapıların deprem performansını daha gerçekçi bir şekilde değerlendirmeye olanak tanır.

- ✓ **Zemin-Şev Stabilitesinin Sağlanması:** Zemin, yapıyı taşıyan ortam olmasının yanı sıra, şevler gibi farklı topografik özellikleri de etkiler. Şev stabilitesinin sağlanması, özellikle köprü ayakları gibi yapıların yerleştirildiği alanlarda oldukça önemlidir. Zemin-şev etkileşimi, yapının temellerinin stabilitesini sağlayarak, yapının güvenliğini artırır.
- ✓ **Yeraltı Suyu ve Zemin Sıvılaşması:** Yer altı su seviyesi ve zemin sıvılaşması, özellikle deprem gibi dinamik durumlar altında, yapıların güvenliğini tehdit edebilir. Yapı-zemin etkileşiminin doğru analizi, yer altı suyu ve zemin sıvılaşmasının etkilerini öngörerek, bu tür risklere karşı önlemler alınmasına olanak tanır.

1.3 Köprü ayakları ve Binalar için etkileşimin rolü

Tanım:

Köprü ayakları ve binalar, zeminle doğrudan etkileşimde olan ve bu etkileşimden doğrudan etkilenen yapılar olup, inşaat mühendisliğinde büyük öneme sahiptir. Bu yapıların tasarımında ve güvenliğinde, zemin ve yapının karşılıklı etkileşimi kritik bir rol oynamaktadır. Zemin özellikleri, yapının stabilitesini, dayanıklılığını ve performansını doğrudan etkiler. Bu nedenle, köprü ayakları ve binalarda yapı-zemin etkileşimi, mühendislik projelerinin başarılı bir şekilde gerçekleştirilmesi için dikkatle ele alınmalıdır.

Köprü ayaklarında yapı-zemin etkileşiminin rolü şunlardır:

- ✓ **Hareketli yük dağılımı:** Yapı-zemin etkileşimi, köprü ayaklarındaki hareketli yük dağılımını büyük ölçüde etkiler.
- ✓ **Uç-ayak tabliye sürekliliği:** Bu etkileşim, özellikle kısa açıklıklı köprülerde hareketli yük dağılım katsayılarını önemli ölçüde değiştirir.

Binalarda yapı-zemin etkileşiminin rolü ise:

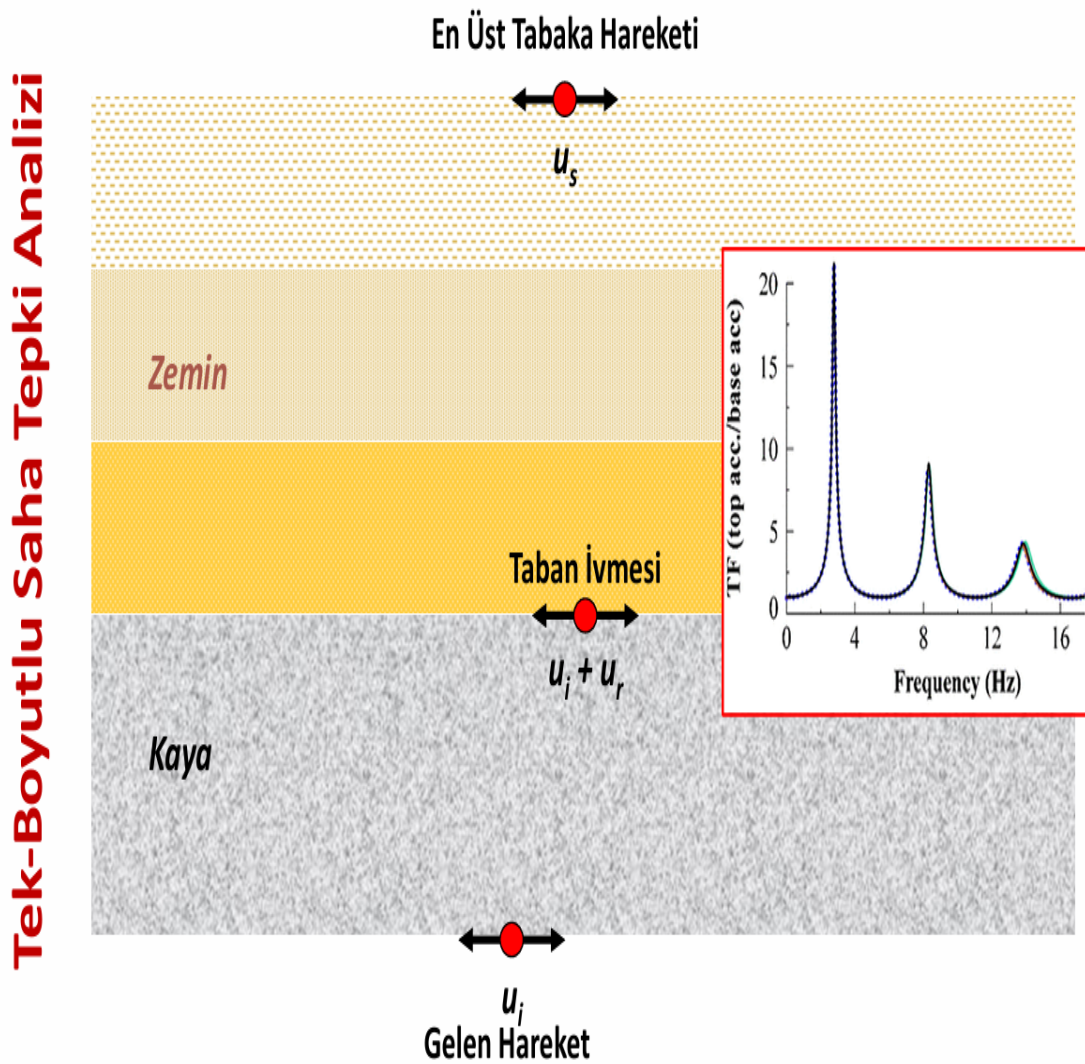
- ✓ **Temel hareketi:** Temel, zemin hareketinden farklı şekilde hareket eder ve bu, temel dönme ve ötelenme bileşenlerini içerir.
- ✓ **Sönüm ve rijitlik:** Yapı ve temelin eylemsizliği, yapıda sönüm ve rijitlik değişikliklerine yol açar.
- ✓ **Çevre yapılara etki:** Yüksek seviyedeki titreşimler, çevre yapılara zarar verebilir.

2. YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ KAVRAMI

Tanım:

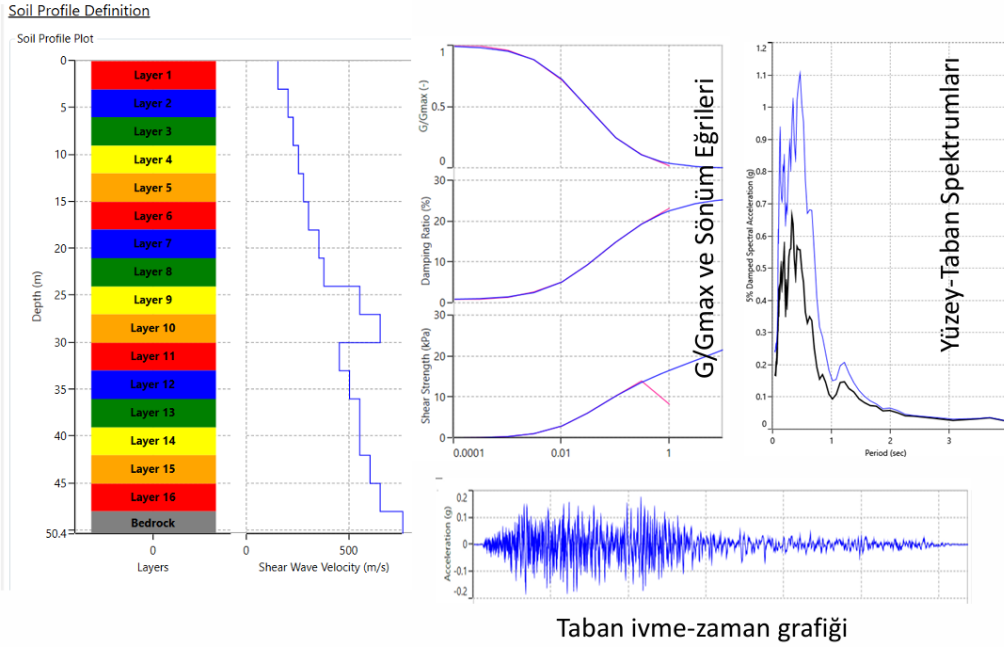
Yapı-Zemin Etkileşimi deprem sırasındaki yapı davranışında ve tasarımında büyük etkiye sahiptir. Bu alanda bir çok çalışma yapılmış/yapılıyor olmasına rağmen bunların pratik mühendislikte uygulamaları son dönemde artan yazılım teknolojileri ve mühendislik tasarım bilgisinin yaygınlaşmasıyla artmaktadır.

Yatay katmanlı zeminler üzerinde yukarıya doğru olarak yayılan S (Kayma) dalgalarının oluşturduğu deprem yer hareketinin analizi, basit bir tek boyutlu kayma dalgası yayılma problemidir ve kolaylıkla çözülebilir.



Şekil 2.1 Tek Boyutlu Saha Tepki Analizi (SHAKE –Schnabel, Lysmer, & Seed, 1972).(DEEPSOIL Youssef Hashash, 2002)

Tek-Boyutlu Saha Tepki Analizi



Şekil 2.2 Tek Boyutlu Saha Tepki Analizi (TMMOB,2023)

2.1 Yapı-Zemin Etkileşiminin Tanımı ve Temel İlkeleri

Tanım:

Yapı-zemin etkileşimi, bir yapının temeli ile altındaki veya çevresindeki zemin arasındaki karşılıklı etkileşimleri ve bu etkileşimin yapı üzerinde yarattığı etkileri ifade eder. Bu etkileşim, yapıların güvenliğini, dayanıklılığını ve performansını etkileyen çok önemli bir faktördür. Zemin, yapının üzerine uygulanan yükleri taşıyan ve ileten bir ortam olarak, yapının davranışını doğrudan etkiler. Yapının temeli, bu etkileşimin başladığı noktadır ve zeminle olan ilişki, yapıların inşa edilme sürecinden başlayıp, kullanımı ve uzun vadeli performansına kadar devam eder.

Yapı-zemin etkileşimi, özellikle büyük yapı projelerinde, köprüler, yüksek binalar, endüstriyel yapılar ve diğer taşıyıcı sistemlerin tasarımında kritik bir faktördür. Bu etkileşim doğru bir şekilde analiz edilmediğinde, yapılar stabilite sorunları, deformasyonlar, oturmalar, sıvılaşma veya daha büyük yapısal hasarlara neden olabilir.

Yapı-Zemin Etkileşiminin Temel İlkeleri:

- **Zemin ve Yapının Karşılıklı Etkileşimi**

Yapı-zemin etkileşimi, zemin ve yapı arasındaki karşılıklı bir etkileşimdir. Zemin, yapının üzerine uygulanan yükleri kabul eder ve bu yükleri zeminin taşıma kapasitesine bağlı olarak yer yüzeyine iletir. Yapı, zemin üzerine uyguladığı yükleri, zeminin deformasyon kapasitesine göre dağıtır. Bu süreç, her iki sistemin de karşılıklı olarak birbirini etkilemesine neden olur. Yapının davranışı, zemin özelliklerine ve zemin de yapının davranışına bağlı olarak değişir.

- **Zemin Özelliklerinin Yapı Üzerindeki Etkisi**

Zemin özellikleri, yapının davranışını doğrudan etkiler. Zemin türü, sertlik, kohezyon, yer altı suyu seviyesi, şev stabilitesi gibi faktörler, yapı-zemin etkileşimini şekillendirir. Bu nedenle, yapının zeminle etkileşimi doğru bir şekilde modellenmeli ve zemin özellikleri dikkate alınarak tasarım yapılmalıdır.

- **Deformasyonlar ve Oturma**

Yapı-zemin etkileşimi, zemin deformasyonları ve yapının oturması ile doğrudan ilişkilidir. Zemin, yük altında sıkışabilir ve deformasyonlar meydana gelebilir. Bu deformasyonlar, yapının temelinde oturma farklarına yol açabilir ve yapının stabilitesini etkileyebilir. Zemin oturması, yapının düzgün oturmasını engelleyebilir ve zamanla yapısal hasarlara neden olabilir. Bu nedenle, zemin etkileşimi analizleri, oturma en aza indirilmesi amacıyla önemlidir.

- **Dinamik Yükler ve Sismik Etkiler**

Yapı-zemin etkileşimi, sadece statik yükler değil, aynı zamanda dinamik yükler ve sismik etkiler altında da önemlidir. Zemin, yapı üzerinde hareket ettikçe, yapının taşıyıcı sistemine etki eder ve bu etkileşim, yapının sismik performansını belirler. Sismik etkiler farklı şekilde yayılabilir ve yapının davranışını önemli ölçüde etkileyebilir. Zemin-şev etkileşimi, özellikle deprem riski taşıyan bölgelerde daha fazla önem kazanmaktadır.

- **Zemin Sıvılaşması ve Zemin-Şev Etkileşimi**

Zemin sıvılaşması, özellikle deprem gibi dinamik yükler altında, zemin üzerinde bulunan ince taneli, su doygunluğu yüksek zeminlerin geçici olarak sıvı hale gelmesi durumudur. Bu durum, yapıların temellerinin stabilitesini ciddi şekilde tehdit eder. Zemin-şev etkileşimi ise, eğimli arazilerde, şevlerin ve zemin koşullarının birbirine etkisiyle oluşan hareketleri ifade eder. Zemin sıvılaşması veya şev kaymaları, yapıların güvenliğini riske sokabilir.

- **Zemin İyileştirme ve Temel Tasarımı**

Zemin iyileştirme yöntemleri, yapı-zemin etkileşiminin optimize edilmesinde kullanılır. Zemin iyileştirme, zemin özelliklerinin zayıf olduğu veya zemin taşıma kapasitesinin düşük olduğu durumlarda, zeminin taşıma kapasitesini artırmak için uygulanan çeşitli mühendislik yöntemleridir. Kazıklı temeller, radye temeller veya zemin stabilizasyonu gibi iyileştirme teknikleri, yapı-zemin etkileşimini güçlendirmek için kullanılır.

- **Yapı ve Zemin Modellenmesi**

Sonlu Elemanlar Yöntemi (FEM) gibi sayısal yöntemler, yapı ve zemin arasındaki etkileşimi modellemek için yaygın olarak kullanılır. Bu sayede, zemin ve yapının karşılıklı etkilerini analiz etmek ve farklı zemin koşullarındaki davranış tahmin etmek mümkün olur. Bu analizler, tasarımın daha güvenli ve verimli olmasını sağlar.

2.2 Etkileşimi Etkileyen Faktörler

- **Zemin Türü ve Özellikleri**

Zemin türü, yapı-zemin etkileşimini etkileyen en önemli faktördür. Zemin, farklı türdeki taşlar, kayalar, kumlar, çakıllar veya kil gibi malzemelerden oluşabilir ve her zemin türü, farklı davranışlar sergiler. Zemin türlerinin, taşıma kapasitesi, deformasyon davranışı ve sıvılaşma gibi özellikleri, yapı-zemin etkileşimini doğrudan etkiler.

- ✓ **Sert Zeminler:** Yüksek taşıma kapasitesine sahip, daha az deformasyon gösteren zeminlerdir. Yapılar daha stabil olur.
- ✓ **Yumuşak Zeminler:** Zemin daha fazla oturma ve deformasyon yapabilir, bu da yapı üzerinde olumsuz etkiler yaratabilir.
- ✓ **Kum ve Çakıl:** Daha gevşek ve yüksek poroziteye sahip olan bu zemin türleri sıvılaşma riski taşıyabilir.

- **Zemin Taşıma Kapasitesi**

Zemin taşıma kapasitesi, zeminin üzerine uygulanan yükleri taşıma gücünü ifade eder. Taşıma kapasitesi, yapıların stabilitesini sağlamak için kritik öneme sahiptir. Zemin taşıma kapasitesinin düşük olması, yapının oturmasına ve hatta yapısal hasara yol açabilir. Bu nedenle, zemin taşıma kapasitesinin doğru bir şekilde belirlenmesi ve buna uygun temel tasarımı yapılması gereklidir.

- **Zemin Deformasyonları ve Oturma**

Yapı üzerine uygulanan yüklerin etkisiyle zemin deformasyona uğrar. Bu deformasyonlar, yapının oturmasına, yer değiştirmesine veya eğilmesine yol açabilir. Bu deformasyonlar, yapıların stabilitesini etkileyebilir ve zamanla yapısal hasarlara neden olabilir.

- **Yer Altı Suyu Seviyesi**

Zemin özelliklerinin yanı sıra, yer altı suyu seviyesi de yapı-zemin etkileşimini etkileyen önemli bir faktördür. Yüksek yer altı suyu seviyesi, zemin sıvılaşması riski yaratabilir ve bu da yapının temellerinin stabilitesini tehdit eder. Ayrıca, suyun zemin içerisinde hareket etmesi, zemin özelliklerini değiştirebilir ve yapıların güvenliğini etkileyebilir.

- **Zemin Sıvılaşması**

Sıvılaşma, özellikle deprem gibi dinamik yükler altında, su doygunluğu yüksek ve ince taneli zeminlerin geçici olarak sıvı hale gelmesidir. Bu durumda zemin, taşıma kapasitesini kaybeder ve yapıların temelleri stabil kalamayabilir. Sıvılaşma riski, özellikle kumlu ve gevşek zeminlerde görülür ve bu durum yapıların güvenliğini ciddi şekilde tehdit edebilir.

- **Dinamik Yükler ve Sismik Etkiler**

Dinamik yükler, rüzgar, trafik, deprem gibi hareketli yüklerdir. Zemin, yapı üzerindeki bu dinamik yükleri karşılamak için farklı şekilde tepki verir. Depremler gibi sismik etkiler, yapının stabilitesini ve zeminle olan etkileşimini daha da karmaşık hale getirebilir. Zemin, bu yükler altında hareket ederek yapının temeline etki eder.

- **Zemin-Şev Etkileşimi**

Zemin-şev etkileşimi, özellikle eğimli arazilerde önemli bir faktördür. Şev hareketleri, yer değişiklikleri veya zemin kaymaları, yapıların temellerini etkileyebilir. Zemin-şev stabilitesi, köprü ayakları ve yüksek binalar gibi yapılar için kritik bir unsurdur. Şev kaymaları, temel ve yapı üzerinde büyük deformasyonlara ve yapısal hasara yol açabilir.

- **Çevresel Faktörler**

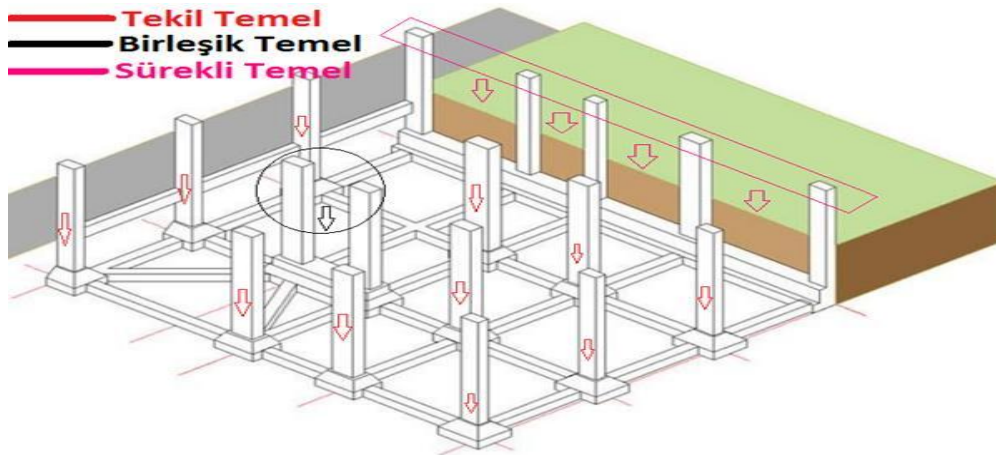
Çevresel faktörler, yapı-zemin etkileşimini etkileyebilir. Örneğin, zemin yüzeyindeki su birikintileri, erozyon veya zemin üzerinde yapılan inşaat faaliyetleri, zemin özelliklerini değiştirebilir. Ayrıca, yer değiştirme, sıcaklık değişimleri, iklim koşulları ve uzun süreli çevresel etkiler de zeminin stabilitesini etkileyebilir.

- **Zemin İyileştirme Yöntemleri**

Zemin iyileştirme, zemin koşullarının uygun olmadığı durumlarda kullanılan mühendislik yöntemleridir. Bu yöntemler, zemin özelliklerini güçlendirmeyi ve yapı-zemin etkileşimini iyileştirmeyi amaçlar. Zemin iyileştirme teknikleri arasında kazıklı temeller, radye temeller, kompresyon ve enjeksiyon gibi yöntemler yer alır. Bu iyileştirmeler, zemin deformasyonlarını kontrol altına alır ve yapıların güvenliğini artırır.

- **Bina Tasarımı ve Yapısal Elemanlar**

Yapının tasarımı da zemin etkileşimini etkiler. Bina tipi, kullanılan inşaat malzemeleri, temel derinliği, yapı yüksekliği ve taşıyıcı sistemlerin özellikleri, zeminle olan etkileşimi belirler.



Şekil 2.2.1 Temel Türleri (Humbarahane,2017)

2.3 Zemin özelliklerinin yapı üzerindeki etkisi

- **Zemin Taşıma Kapasitesi**

Zemin taşıma kapasitesi, zemin tarafından taşınabilen yük miktarını belirler. Zemin türüne göre taşıma kapasitesi değişir ve yapının temel tasarımında büyük bir rol oynar. Taşıma kapasitesinin yeterli olması, yapının stabilitesini ve güvenliğini sağlar. Yüksek taşıma kapasitesine sahip zeminler (örneğin, sert kayalar) yapıların stabil olmasını sağlar. Bu tür zeminler, temel üzerinde minimum deformasyona yol açar. Düşük taşıma kapasitesine sahip zeminler (örneğin, yumuşak topraklar veya sıvılaşabilen zeminler) daha fazla oturma ve deformasyon yapabilir. Bu durum, temelin daha büyük oturma farkları veya yapının zayıf bir temel üzerine oturmasına yol açabilir.

Zemin taşıma kapasitesinin düşük olduğu yerlerde, zeminin iyileştirilmesi (örneğin, kazıklı temel veya radye temel gibi çözümler) gerekebilir.

- **Zemin Deformasyonları ve Oturma**

Zemin, üzerine uygulanan yükler sonucu deformasyona uğrar. Bu deformasyonlar, özellikle farklı zemin türlerinin birleşim yerlerinde ve zemin üzerinde yapılacak farklı yüklemeler sonucu yapının oturmasına neden olabilir.

- **Oturma Farklılıkları:** Zemin türleri farklı deformasyon hızlarına sahip olabilir. Örneğin, yumuşak zeminler daha fazla otururken, sert zeminlerde bu oturma daha az olur. Eğer yapı temeli farklı türde zeminler üzerinde bulunuyorsa, zemindeki oturma farklılıkları yapıyı eğebilir veya çatlatabilir.

- **Zemin Değişiklikleri:** Zemin, uzun vadede yüklerin etkisiyle değişebilir ve bu değişiklikler yapı üzerinde deformasyonlara yol açabilir. Zemin, yapının temeline uygulanan yükleri zaman içinde taşımakta zorlanabilir ve bu da yapının oturmasına veya diğer yapısal problemlere neden olabilir.

- **Zemin Sıvılaşması**

Sıvılaşma, özellikle su doygunluğu yüksek, ince taneli (kumlu) zeminlerde, deprem veya dinamik yüklerin etkisiyle zemin partiküllerinin geçici olarak sıvı hale gelmesidir. Bu durumda, zemin taşıma kapasitesini kaybeder ve temel, oturabilir veya yer değiştirebilir.

- **Yer Altı Suyu Seviyesi**

Yer altı suyu seviyesi, zemin özelliklerini etkileyen bir diğer önemli faktördür. Yüksek yer altı suyu seviyesi, zemin özelliklerini ve taşıma kapasitesini değiştirebilir, yer altı suyu, yapıların temellerini olumsuz etkileyebilir.

- **Zemin Stabilitesinin Azalması:** Yüksek su seviyesi, zemin sıvılaşması riskini artırabilir ve bu durum, temelin stabilitesini tehdit edebilir. Ayrıca, suyun etkisiyle zemin erozyona uğrayabilir.

- **Zemin Tipi ve Sertlik**

Zemin tipi, yapı-zemin etkileşimini doğrudan etkileyen bir faktördür. Zemin tipi, zeminin taşıma kapasitesini ve oturmasını belirler. Zeminlerin farklı sertlikleri, yapı üzerinde farklı etkiler yaratabilir.

- ✓ **Sert Zeminler:** Sert zeminler (kaya, çakıl vb.) genellikle daha az oturur ve yapının stabilitesini daha iyi sağlar. Sert zeminler üzerinde yapılan binalar daha az deformasyon gösterir.
- ✓ **Yumuşak Zeminler:** Yumuşak zeminler (kil, organik maddeler içeren zeminler vb.) yapı üzerinde daha fazla oturma yapabilir ve bu da yapının zamanla çökmesine veya stabilitesinin bozulmasına yol açabilir.

- **Dinamik Yükler ve Sismik Etkiler**

Zemin, sadece statik yükler değil, aynı zamanda dinamik yükler (depremler, trafik yükleri, rüzgar etkileri vb.) altında da önemli bir rol oynar. Dinamik yükler, zeminin davranışını daha da karmaşık hale getirebilir ve yapı-zemin etkileşimini etkileyebilir.

- **Zemin İyileştirme Yöntemleri**

Zemin özelliklerinin kötü olduğu durumlarda, zemin iyileştirme yöntemleri kullanılarak yapı-zemin etkileşimi optimize edilebilir. Bu iyileştirmeler, zeminin taşıma kapasitesini artırmak ve yapının daha stabil olmasını sağlamak için yapılır.

- ✓ **Kazıklı Temeller:** Zemin taşıma kapasitesinin düşük olduğu yerlerde, kazıklı temeller kullanılarak yapının yükleri derin zemin katmanlarına aktarılabilir.
- ✓ **Radye Temeller:** Zemin deformasyonlarının homojen olması isteniyorsa, geniş alanlı radye temeller kullanılabilir.

- **Zemin-Şev Etkileşimi**

Eğimli arazilerde, şevlerin zemin özelliklerine bağlı olarak şekil değiştirmesi yapıyı etkileyebilir. Zemin-şev etkileşimi, özellikle yüksek yapılar için büyük önem taşır. Şev kaymaları veya zemin hareketleri, temelin oturmasını ve yapının güvenliğini tehdit edebilir.

3.KÖPRÜ AYAKLARI VE YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

3.1 Köprü Ayaklarındaki Yapı-Zemin Etkileşimi

Giriş:

Köprü ayakları (piyerler), köprü sisteminin yük taşıma sisteminin temel bileşenlerinden biridir ve üst yapıdan gelen düşey ve yatay yüklerin zemin aracılığıyla temele aktarılmasında görev alır. Bu süreçte, yapı-zemin etkileşimi, hem köprü ayaklarının hem de üzerine oturduğu zeminin birlikte çalışması anlamına gelir. Özellikle deprem, oturma ve taşıma kapasitesi gibi durumlarda bu etkileşim oldukça karmaşılaşır. Yanlış tasarlanmış ya da dikkate alınmamış bir yapı-zemin etkileşimi, köprü sisteminin bütünsel stabilitesini tehdit eder.

Köprü Ayaklarında Yapı-Zemin Etkileşimi Mekanizması

- **Yük Aktarımı**

Köprü ayakları üst yapıdan gelen hem düşey (ölü ve hareketli yükler) hem de yatay (rüzgâr, fren kuvveti, deprem, ısı genleşme) yükleri zemine iletir. Bu yük aktarımı sırasında:

- ✓ Zeminin rijitliği, yük dağılımını etkiler.
- ✓ Temel tipi (derin veya sığ temel) ve geometrisi, yükün zemine nasıl dağıldığını belirler.
- ✓ Zemin tipi (kil, kum, kaya vb.) yapısal davranışta belirleyici rol oynar.

- **Zemin Türlerine Göre Davranış**

- ✓ Kohesif Zeminlerde (örneğin kil): Yük altında daha fazla oturma görülür, drenaj koşulları kritik öneme sahiptir.
- ✓ Granüler Zeminlerde (örneğin kum): Daha az oturma, ancak sıvılaşma riski yüksek olabilir.
- ✓ Kaya Zeminlerde: Rijit davranış gösterir; yapı-zemin etkileşimi daha az olur, ancak çatlaklar nedeniyle ani göçme riski olabilir.

- **Deprem Anında Etkileşim**

Deprem sırasında köprü ayaklarında zeminle olan etkileşim daha da kritik hale gelir:

- ✓ Zemin hareketleri ayakları doğrudan etkileyerek devrilme ve yer değiştirme momentleri oluşturur.
- ✓ Yumuşak zeminlerde periyod uzaması ve amplifikasyon etkisi görülebilir.
- ✓ Yetersiz zemin-yapı uyumu nedeniyle ayaklarda eğilme, burkulma ve yatay deplasman artabilir.

Temel Sistemlerinin Etkisi

Köprü ayaklarının zeminle etkileşimi, temelin tipine doğrudan bağlıdır:

- **Sığ Temeller (Ayak altı betonları veya radye temeller)**
 - ✓ Yük zemine doğrudan aktarılır.
 - ✓ Yayılı gerilme etkisi vardır.
 - ✓ Zemin taşıma kapasitesi sınırlıysa yaygın oturmalar görülebilir.
- **Derin Temeller (Kazık temeller, kesonlar)**
 - ✓ Yük, taşıyıcı zemine daha derin seviyeden aktarılır.
 - ✓ Yan direnç ve uç taşıma kapasitesi birlikte çalışır.
 - ✓ Yanal yük taşıma kapasitesi artar.

Yapısal Davranışa Etkiler

Yapı-zemin etkileşimi göz ardı edildiğinde köprü ayaklarında:

- ✓ Gereğinden büyük ya da küçük boyutlandırmalar yapılabilir.
- ✓ Yetersiz oturma kontrolü nedeniyle köprü açıklıkları arasında düzensizlik oluşabilir.
- ✓ Yanal deplasmanlar artarak köprünün sünekliği düşebilir.
- ✓ Deprem performansı ciddi biçimde olumsuz etkilenebilir.

3.2 Etkileşimi Etkileyen faktörler

- **Zemin Türü**

Zemin, yapının temelini taşıyan ortamdır ve davranışı yapı-zemin etkileşiminde en kritik belirleyicilerden biridir.

- **Zemin Sertliği / Rijitliği**

- ✓ **Sert (rijit) zeminler** (örneğin kaya): Yapı-zemin etkileşimi ihmal edilebilir düzeyde olabilir.
- ✓ **Yumuşak (gevşek) zeminler** (örneğin kil, gevşek kum): Yapıdan gelen yükler zeminde daha büyük oturmalara ve yatay deplasmanlara neden olur.

- **Zemin Homojenliği**

Homojen zeminler daha öngörülebilir davranır. Tabakalı veya heterojen zeminler farklı oturmalara neden olarak yapı davranışını karmaşıktırır.

- **Sıkışabilirlik**

Sıkışabilir zeminlerde zamanla oturmalar meydana gelebilir (özellikle konsolidasyonla).

- **Yer altı su seviyesi**

Yüksek su seviyesi taşıma gücünü düşürür ve sıvılaşma riski oluşturabilir.

- **Zemin sönümlleme kapasitesi**

Bazı zeminler (örneğin gevşek kumlar) deprem dalgalarını daha fazla sönümleyerek enerjiyi azaltabilir.

- **Yapı Tipi**

Yapının özellikleri de zeminle nasıl etkileşeceğini belirler.

- **Kütle ve Rijitlik (Sertlik)**

Ağır yapılar zemine daha fazla yük uygular. Rijit yapılar daha az şekil değiştirir de zayıf zeminlerde oturma problemleri yaşayabilir.

- **Yapının Yüksekliği ve Kat Sayısı**

Yüksek yapılar salınım eğilimindedir, dolayısıyla esnek zeminlerde rezonans riski artar.

- **Temel Türü:**

- ✓ **Radye temel:** Yükü geniş alana yayar, oturmaya azaltabilir.
- ✓ **Kazıklı temel:** Yükü daha derindeki sağlam zemine iletir.
- ✓ **Münferit (ayak) temeller:** Ucuzdur ama eşit olmayan oturmaya daha duyarlıdır.

- **Yapı formu ve simetrisi**

Düzensiz, asimetrik yapılar zeminle etkileşimde burulma ve düzensiz deformasyonlara daha açıktır.

- **Yükleme Koşulları**

- ✓ **Statik Yükler**
Sabit yükler (ölü yük, kar yükü) genellikle yavaş ve düzenli oturmaya neden olur.
- ✓ **Dinamik Yükler (Deprem, Rüzgar, Trafik)**
Bu tür yükler ani ve titreşimli etkiler oluşturur. Zeminin sismik özellikleri (örneğin sıvılaşma potansiyeli) devreye girer. Zemin yapının doğal frekansını değiştirerek rezonans oluşumuna neden olabilir.
- ✓ **Tekrarlı (Sürekli) Yüklenme**
Zamanla zeminde yorgunluk, oturma artışı ve taşıma gücü kaybına neden olabilir (özellikle zayıf zeminlerde)

Zemin Özelliği	Yapı Üzerindeki Etkisi
Düşük taşıma gücü	Temel oturmaları, taşıma gücü yetersizliği, yapının dengesizleşmesi
Diferansiyel oturma	Yapıda çatlaklar, kiriş ve kolonlarda gerilme artışı, yapısal hasarlar
Yumuşak zemin (esnek ortam)	Doğal periyotta artış, yatay deplasmanların büyümesi, rezonans riskinin yükselmesi
Sıvılaşma potansiyeli	Deprem anında taşıma gücünün kaybı, yapının yana yatması veya batması
Yüksek yer altı su seviyesi	Temel altı kaldırma kuvveti, kazı zorlukları, temel altı su basıncı etkisi
Zemin tabakalanması	Yapının farklı bölgelerinde oturma farkı, düzensiz deformasyonlar
Düşük sönümleme kapasitesi	Deprem enerjisinin yapıya daha fazla iletilmesi, titreşim düzeylerinin artması

Tablo 3.1 Zemin Özelliklerinin Yapı Üzerindeki Etkileri Tablosu

3.3 Zemin Türüne Göre Köprü Ayakları Tasarımı

- **Kaya Zeminler (Sağlam Zeminler)**

Özellikleri: Çok yüksek taşıma gücü, düşük deformasyon, sıvılaşma riski yok.

Tasarım Yaklaşımı:

- ✓ Temeller genellikle **yüzeysel (sığ) temeller** olarak tasarlanabilir.
- ✓ Ayaklar doğrudan ana kaya üzerine oturtulabilir.
- ✓ Deprem sırasında zemin deformasyonu çok azdır.

Avantaj: Ekstra iyileştirme gerekmez, oturma ihmal edilebilir.

- **Orta Sert Zeminler (Sıkı kum, katı kil vb.)**

Özellikleri: Orta-yüksek taşıma gücü, sınırlı oturma, stabilite açısından güvenli.

Tasarım Yaklaşımı:

- ✓ Radye veya ayak temeller tercih edilebilir.
- ✓ Zemin oturması dikkate alınmalı, diferansiyel oturmalar kontrol edilmelidir.
- ✓ Eğer köprü uzun açıklıklıysa, rijitlik farkları ve oturma farklılıkları özel önem taşır.

- **Gevşek Kum / Siltli Zeminler**

Özellikleri: Düşük taşıma gücü, yüksek oturma potansiyeli, sıvılaşma riski vardır.

Tasarım Yaklaşımı:

- ✓ Kazıklı temel sistemi kullanılır. Betonarme veya çelik kazıklar ile sağlam tabakaya yük aktarılır.
- ✓ Sıvılaşma riski varsa jet grout, taş kolon, vibroflotasyon gibi zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmalıdır.
- ✓ Dinamik analizlerde zemin-yapı etkileşimi dikkate alınmalıdır.

- **Yumuşak Killi Zeminler / Organik Zeminler**

Özellikleri: Çok düşük taşıma gücü, uzun süreli konsolidasyon oturması, drenaj zayıf.

Tasarım Yaklaşımı:

- ✓ Derin temel (kazık) sistemi şarttır.
- ✓ Kazıklar sağlam zemine oturtulmalı veya sürtünme ile taşıma sağlanmalıdır (uç direnci yoksa).
- ✓ Oturma zamanla devam edebileceği için kademeli yükleme veya ön yükleme gerekebilir.
- ✓ Köprü mesnetleri hareketli olacak şekilde tasarlanabilir (örneğin pot mesnet, sarkaç mesnet vb.).

- **Su Altı Zeminleri (Nehir, göl tabanı vb.)**

Özellikleri: Yüksek yeraltı suyu, akıntı, erozyon ve taşıma gücü kaybı riski.

Tasarım Yaklaşımı:

- ✓ Keson temel, batırma kazık, çelik boru kazıklar tercih edilir.
- ✓ Ayak çevresi erozyona karşı korunmalıdır (örn. kaya kaplama, şev koruması).
- ✓ Hidrostatik basınç ve yanıl kuvvetler özel olarak analiz edilmelidir.

Zemin Türü	Özellikleri	Uygun Temel Türü
Kaya	Yüksek taşıma gücü, düşük oturma	Yüzeysel temel (doğrudan oturtma)
Orta sert zemin	Orta taşıma gücü, oturma riski orta	Radye, ayak temeli
Gevşek kum / silt	Düşük taşıma gücü, sıvılaşma riski	Kazıklı temel + zemin iyileştirme
Yumuşak kil / organik	Yüksek oturma, konsolidasyon riski	Kazıklı temel (uç/çevre sürtünmeli)
Su altı zemin	Erozyon ve taşıma kaybı, yüksek su basıncı	Keson, boru kazık, batırma temel + şev koruma

Tablo 3.2 Zemin Türü-Uygun Temel Türü Tablosu

4. BİNALARDAKİ YAPI-ZEMİN ETKİLEŞİMİ

4.1 Binalarda Zemin İle Etkileşim

Tanım:

Binalarda zemin ile etkileşim, yapının taşıdığı yükleri zemine aktarması ve zeminin bu yüklere karşı verdiği tepkilerin yapının davranışını etkilemesi sürecidir. Bu etkileşim; binanın dayanıklılığı, oturma durumu, deprem performansı ve uzun ömürlü olması açısından kritik öneme sahiptir.

Binalarda Zemin ile Etkileşimin Temel Unsurları:

- **Yük Aktarımı ve Temel Sistemleri**

Binanın kendi ağırlığı (ölü yük), hareketli yükler (canlı yükler), rüzgar, kar ve deprem gibi dış etkiler temeller aracılığıyla zemine aktarılır. Temel sistemi, zeminin özelliklerine uygun seçilmezse, yükün eşit dağılmaması sonucu oturma ve çatlama problemleri yaşanabilir.



Şekil 4.1 Yük Türleri ve Gösterimleri (insaport.com 2020)



Şekil 4.2 Temel Çeşitleri (İnşaathesabı.com 2025)

- **Zemin Sertliği ve Yapının Doğal Periyodu**

Zemin sertliği, binanın titreşim davranışını etkiler.

- ✓ **Sert zemin** → daha kısa periyot, yüksek ivme
- ✓ **Yumuşak zemin** → daha uzun periyot, rezonans riski artar, Depremde yapı ile zemin aynı periyoda sahipse rezonans oluşur, bu durum yapının hasar görme riskini ciddi şekilde artırır.

- **Oturma (Settlement) Etkileri**

Oturma, yük altında zeminin sıkışarak yapının aşağı doğru hareketidir.

- ✓ **Eşit oturma** → genellikle yapısal problem yaratmaz.
- ✓ **Diferansiyel oturma** → çatlaklara, eğilmelere, yapısal bozulmalara neden olur.

- **Depremde Yapı-Zemin Etkileşimi**

- ✓ Deprem sırasında zemin hareket eder, bu hareket temele ve oradan da yapıya iletilir.
- ✓ Zemin büyütmesi denilen etki ile deprem dalgaları yumuşak zeminlerde daha fazla genliğe ulaşır.
- ✓ Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmazsa, yapının beklenenden çok daha fazla zorlanması söz konusu olur.

- **Sıvılaşma Riski**

Suya doymuş, gevşek kumlu zeminlerde deprem sırasında zemin geçici olarak sıvı gibi davranabilir. Bu durumda temelin altında taşıma gücü kaybolur → yapı devrilebilir, çöker.



Şekil 4.3 Sıvılaşma (wikipedia.com 2024)

Temel Türü	Uygun Zemin Türleri	Zeminle Etkileşimi
Tekil Temel (Ayak)	Sert – orta sert zemin (kum, çakıl, katı kil)	Yük zemine doğrudan aktarılır. Diferansiyel oturmaya karşı hassastır.
Sürekli Temel	Sıkı kum, katı kil	Uzun duvarlar altında yer alır. Yükü daha geniş alana yayar. Oturma riski orta düzeydedir.
Radye Jeneral Temel	Yumuşak – orta sert zemin (yüksek bina, bodrumlu yapı)	Geniş alanlı yük yayımı sağlar. Diferansiyel oturmaya azaltır. Zemin taşıma gücü düşükse etkili olur.
Kazıklı Temel	Yumuşak kil, gevşek kum, sıvılaşma riski olan zeminler	Yük sağlam tabakaya aktarılır. Yükün büyük kısmı kazık çevresel sürtünmesi ile taşınır. Oturma en aza iner.
Keson Temel	Nehir, göl tabanı, su altında çalışan mühendislik yapıları	Derin ve su altı zeminlerde kullanılır. Erozyon, hidrostatik basınç ve yatay yükler özel dikkate alınır.
Plak Temel (Plak üstü kazıklı)	Zayıf ve heterojen zeminler (yüksek yapı temelleri)	Yük hem plakla yayılır hem de kazıklarla derine aktarılır. Karma etkileşim mevcuttur.

Tablo 4.1 Temel Türleri ve Zeminle Etkileşim Özeti

4.2 Temel türlerinin zeminle olan etkileşimi

Tanım:

Bir yapının temeli, taşıdığı yükleri zemine aktarır. Temel türlerinin zeminle olan etkileşimi; taşıma gücü, oturma davranışı, zemin tipi ve yeraltı suyu gibi faktörlere bağlı olarak değişkenlik gösterir.

Temel-Zemin Etkileşimini Etkileyen Faktörler:

- ✓ **Zemin taşıma gücü** → Temelin gömülme derinliği ve tipi doğrudan etkilenir.
- ✓ **Zemin oturma davranışı** → Yapının bütünlüğünü bozacak diferansiyel oturma riski varsa kazık sistemi tercih edilir.
- ✓ **Yeraltı su seviyesi** → Yüzeysel temellerde kaldırma kuvveti oluşturabilir, su yalıtımı ve drenaj gerekir.
- ✓ **Deprem etkisi** → Zemin büyütmesi ve sıvılaşma riski varsa yapı-zemin etkileşimi daha karmaşık hale gelir.

Zemin Türü	Yaygın Davranış	Temel Tasarımı Açısından Etki
Sert zemin (kaya)	Düşük deformasyon, yüksek taşıma gücü	Yüzeysel temeller tercih edilir. Oturma ihmal edilebilir.
Orta sert zemin	Orta taşıma gücü, oturma sınırlı	Sürekli veya radye temel kullanılabilir.
Yumuşak zemin	Yüksek oturma potansiyeli, sıvılaşma riski olabilir	Kazıklı temeller ve/veya zemin iyileştirme gerekir.
Gevşek kum	Sıvılaşma riski, düşük kesme direnci	Derin temel zorunlu. Jet grout, taş kolon gibi iyileştirmeler önerilir.
Killi zemin (organik)	Konsolidasyon oturması, zamanla deformasyon	Uzun süreli oturma dikkate alınmalı, kazıklı temeller kullanılmalıdır.

Tablo 4.2 Zemin Türüne Göre Temel Davranışları

5. ZEMİN-ŞEV VE SİSMİK ETKİLER

Tanım:

Zemin ve şev stabilitesi, özellikle deprem gibi dinamik etkiler altında yapı güvenliği açısından kritik öneme sahiptir. Gerek doğal topoğrafyada bulunan eğimli zeminler, gerekse mühendislik yapılarının kazı/dolgu alanlarındaki yapay şevler, sismik yüklemelere karşı dikkatle analiz edilmelidir. Depremler sırasında zeminin taşıma gücü azalabilir, şev stabilitesi bozulabilir ve büyük kütle hareketleri (örneğin heyelanlar) meydana gelebilir.

Zemin ve Şev Stabilitesi:

Şev Tanımı:

Şev, yatayla belirli bir eğim yapan doğal ya da yapay zemin yüzeyidir. Şevler, istinat yapıları, otoyol yarmaları, baraj dolgu yamaçları, hendek kenarları gibi birçok mühendislik uygulamasında karşımıza çıkar.

Faktör	Etkisi
Zemin türü	Kohezyonlu (kil) veya kohezyonsuz (kum) zeminlerde kayma davranışı farklıdır.
Zemin mukavemeti ($c-\phi$)	Kayma dayanımı arttıkça şev stabilitesi de artar.
Yer altı su seviyesi	Gözenek suyu basıncı artarsa efektif gerilme azalır, stabilite düşer.
Şev açısı ve yüksekliği	Eğimin dikliği ve boyutu arttıkça kayma riski büyür.
Yapısal yüklemeler	Şev üstüne gelen bina/yol gibi yükler, şevin dengesini etkiler.

Tablo 5.1 Şev Stabilitesini Etkileyen Başlıca Faktörler

Deprem Etkisi

Deprem etkisiyle gözenek suyu basıncı artabilir, sıvılaşma oluşabilir ve kütle kaymaları meydana gelebilir.

Sismik Etkiler Altında Şev Davranışı:

Deprem sırasında yer hareketleri, şev kütlesi üzerinde yatay (ve bazen düşey) ivmeler oluşturur. Bu durum, şevin iç dengesini bozar ve kayma potansiyelini artırır. Özellikle zayıf, doygun ve eğimli zeminler büyük risk altındadır.

5.1 Şevlerde Yapı-Zemin Etkileşimi

Giriş

Yapı-zemin etkileşimi, yapıların taşıyıcı sistemlerinin zemine olan tepkisini ve zeminin bu yüklemelere verdiği karşılığı ifade eder. Bu etkileşim düz bir zemin üzerinde farklılık gösterebileceği gibi, şev gibi eğimli yüzeylerde çok daha karmaşık hâle gelir. Şevli zeminlerde yapıdan gelen yüklerin dağılımı, şev stabilitesi ile doğrudan ilişkilidir ve yanlış yerleşim veya tasarım hataları ciddi mühendislik risklerine neden olabilir.

Faktör	Etkisi
Şev eğimi ve yüksekliği	Daha dik ve yüksek şevlerde yapı yükleri stabiliteyi olumsuz etkiler.
Zemin tipi ve mukavemeti	Zayıf (gevşek kum, siltli zemin) tabakalarda şev daha hızlı çözülür.
Yer altı su seviyesi	Gözenek suyu basıncının artması zeminin taşıma gücünü azaltır.
Yapının tipi ve temeli	Ağır yapılar ve derin temeller (kazıklı sistemler) şev dengesini zorlar.
Dinamik yükler (deprem)	Yapıdan gelen titreşimler şev stabilitesini zayıflatabilir.

Tablo 5.2 Şevlerde Yapı-Zemin Etkileşimini Etkileyen Temel Faktörler

Yapıdan Gelen Yüklerin Şev Stabilitesine Etkisi

Şev üstünde veya yamaca yakın konumlandırılan yapıların yükü, şevin stabilize analizlerinde göz önüne alınmalıdır. Bu yük, şevin potansiyel kayma yüzeylerinde kaymayı tetikleyebilir. Özellikle killi zeminlerde ve yer altı su seviyesi yüksek alanlarda bu risk daha da artar.

Önemli hususlar:

- ✓ Yüzeysel temeller, şev tepesine çok yakın yerleştirilmemelidir.
- ✓ Kazıklı temeller, eğer doğru tasarlanmamışsa, kayma yüzeyini kesebilir ve pasif direnci azaltabilir.
- ✓ Şevdeki inşaat kazıları, dengeyi geçici olarak bozabilir.

Yerleşim Konumu	Risk Durumu	Öneri
Şev tepesine yakın	En yüksek kayma riski	Geriye çekilerek yerleştirme yapılmalı
Şev ortası (yamacın yarısı)	Kayma yüzeyiyle doğrudan etkileşim riski	Hafif yapı sistemleri tercih edilmeli
Şev tabanı	Şev malzemesini pasif olarak tutar	Zemin iyileştirme ile stabilite artırılabilir

Tablo 5.3 Yapıların Şev Üzerine Yerleşimi – Uygulama Örnekleri

Yapı-Zemin Etkileşimini Azaltmak İçin Mühendislik Yaklaşımları

- ✓ Zemin iyileştirme yöntemleri (jet grout, kolon, taş kolon, zemin çivisi),
- ✓ Drenaj sistemleri ile gözenek suyu basıncının azaltılması,
- ✓ İstinat duvarları ve geosentetik donatılar ile şevin güçlendirilmesi,
- ✓ Kazıklı temellerin kayma yüzeyine dik yerleştirilmesi,
- ✓ Newmark analizleri ile sismik kayma potansiyelinin değerlendirilmesi.

5.2 Zemin Sıvılaşması ve Deprem Etkisi

Giriş

Zemin sıvılaşması, özellikle doygun ve gevşek kumlu zeminlerde deprem gibi dinamik yüklemeler sırasında meydana gelen bir jeoteknik olaydır. Deprem dalgaları, zemin taneciklerinin yeniden düzenlenmesine ve gözenek suyu basıncının artmasına yol açarak, efektif gerilmenin sıfıra yaklaşmasına neden olur. Bu durum, zeminin geçici olarak taşıma gücünü kaybetmesi ve sıvı gibi davranmasıyla sonuçlanır.

Sıvılaşma Mekanizması

Deprem sırasında uygulanan tekrarlı kayma gerilmeleri, zemin taneciklerinin daha sıkı bir düzen arayışına girmesine neden olur. Ancak drenajsız koşullarda bu yeniden düzenlenme mümkün olmaz ve gözenek suyu basıncı artar. Efektif gerilmenin azalmasıyla birlikte zemin dayanımını kaybeder ve sıvılaşma meydana gelir.

Faktör	Açıklama
Zemin türü	Gevşek, kumlu ve siltli zeminlerde risk yüksektir.
Yeraltı su seviyesi	Yüksek su seviyesi sıvılaşma potansiyelini artırır.
Zemin yoğunluğu	Yoğun zeminlerde sıvılaşma riski daha düşüktür.
Deprem süresi ve şiddeti	Uzun süreli ve yüksek şiddetli depremler sıvılaşma potansiyelini artırır.
Titreşim frekansı	Zemin ile rezonansa giren frekansta sıvılaşma daha kolay oluşur.

Tablo 5.4 Sıvılaşmaya Etki Eden Faktörler

Sıvılaşma Sonuçları

- Bina oturmaları ve devrilmeleri
- Zemin taşıma gücünün kaybı
- Yer değiştirme ve yüzey bozulmaları
- Altyapı sistemlerinde (kanalizasyon, doğalgaz hatları) hasar
- Yüzey yükselmesi ve kum konileri oluşumu

Önlemler

- Zemin iyileştirme (dinamik kompaksiyon, drenaj, jet grout vb.)
- Sıvılaşma riski taşıyan alanlarda yapı inşasının sınırlandırılması
- Kazıklı temel sistemlerinin tercih edilmesi
- Yüksek yeraltı su seviyesinin düşürülmesi

Sonuç

Zemin sıvılaşması, özellikle deprem etkisi altındaki bölgelerde büyük can ve mal kayıplarına yol açabilen önemli bir jeoteknik problemidir. Bu nedenle sıvılaşma riski taşıyan alanlarda yapılaşma öncesi detaylı jeoteknik zemin etütleri yapılmalı ve gerekirse zemin iyileştirme yöntemleri uygulanmalıdır.

5.3 Sismik Analizlerin Köprü ve Bina Tasarımındaki Rolü

Giriş

Deprem etkileri altında yapıların davranışını anlamak ve güvenliğini sağlamak amacıyla sismik analizler yapılmaktadır. Özellikle köprü ve bina gibi yapıların tasarımında, yapının depreme karşı dayanımını ve performansını değerlendirmek için sismik analizler temel bir rol oynar. Bu analizler, yapıların taşıyıcı sistemlerinin dinamik davranışını modelleyerek deprem yüklerine karşı güvenli bir tasarım yapılmasına olanak tanır.

Sismik Analiz Türleri

- ✓ **Lineer Statik Analiz (Eşdeğer Deprem Yükü Yöntemi):** Küçük ölçekli yapılar için kullanılır. Yapının elastik davranışı varsayılır.
- ✓ **Modal Analiz:** Yapının doğal frekanslarını ve mod şekillerini belirlemek için kullanılır.
- ✓ **Zaman Tanım Alanında Analiz:** Deprem hareketleri zamana bağlı olarak modele uygulanır, özellikle kritik yapılarda kullanılır.
- ✓ **İtme Analizi (Pushover):** Yapının plastik davranışını modellemek ve kapasite eğrisini belirlemek için kullanılır.

Binalarda Sismik Analiz

Binalarda sismik analizler, yatay yüklerin etkisiyle oluşan deplasman, iç kuvvet ve momentlerin belirlenmesinde kritik rol oynar. Kat sayısı, düzensizlik durumu, zemin sınıfı ve kullanım amacı, analiz türünün seçilmesinde etkilidir. Yapının deprem performansı, taşıyıcı sistem türüne (çerçeve, perdeli sistem vb.) göre değişmektedir.

Köprülerde Sismik Analiz

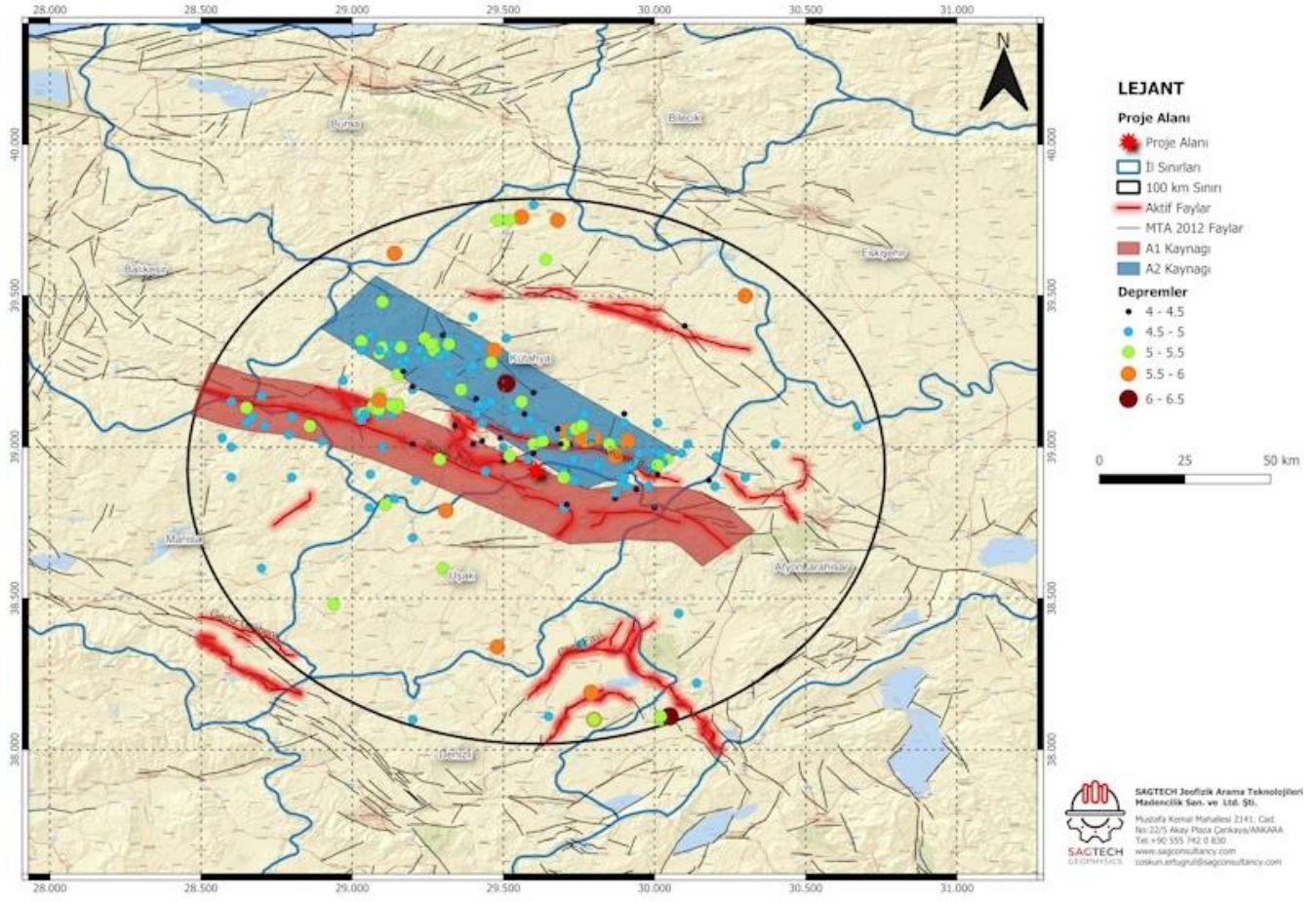
Köprüler, rijitlikleri, açıklıkları ve temel sistemleri bakımından depreme karşı daha hassas yapılardır. Köprülerde sismik analizler genellikle zaman tanım alanında analizlerle desteklenir. Hareketli mesnetler, genleşme derzleri ve kazıklı temellerin davranışı detaylı olarak modellenir. Yapının rezonansa girmemesi için doğal periyot analizleri yapılır.

Sismik Tasarım İlkeleri

- ✓ Yeterli rijitlik ve süneklik sağlanmalı
- ✓ Ağırlık merkezi ile rijitlik merkezi çakıştırılmalı
- ✓ Yapı yüksekliği ve plan düzeni optimize edilmeli
- ✓ Zemin özellikleri dikkate alınarak temel sistemi seçilmeli
- ✓ Deprem izolasyon sistemleri ve sönümleyici sistemler tasarıma entegre edilebilir

Sonuç

Köprü ve binalarda uygulanacak analiz yöntemlerinin doğru seçilmesi, yapıların performans hedeflerine ulaşması açısından büyük önem taşır. Doğru bir sismik tasarım ile can ve mal kayıplarının önüne geçmek mümkündür.



Şekil 5.1 Sismik Tehlike Analizi

(https://www.sagtechgeophysics.com/sismik_tehlike_analizi/)

6.PRATİK UYGULAMALAR VE ÖRNEKLER

• Sıvılaşma Riskine Karşı Kazıklı Temel Uygulaması

Durum:

İstanbul'da denize dolgu ile kazanılmış bir alanda, gevşek kumlu zemin ve yüksek yer altı su seviyesi nedeniyle sıvılaşma riski vardır.

Uygulama:

Yapılar, 25 m derinliğe kadar çakılan fore kazıklar üzerine oturtulmuştur. Bu kazıklar, taşıyıcı yükleri güvenli bir şekilde daha derindeki sağlam zemin katmanına iletmektedir.

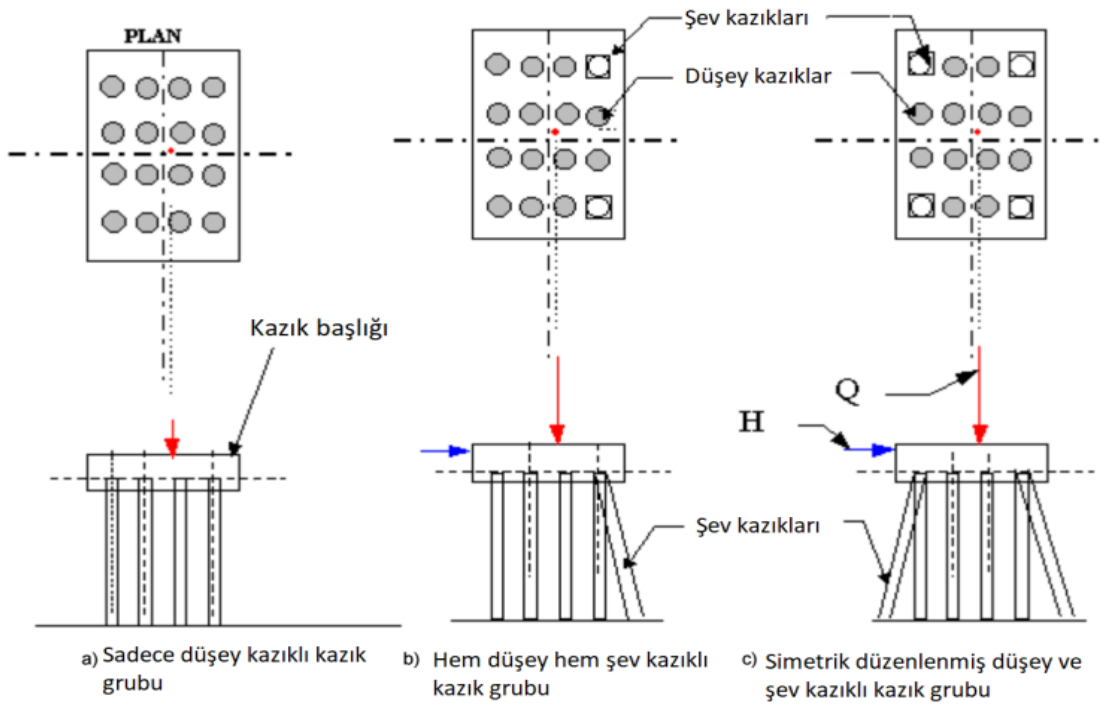
Sonuç:

Sıvılaşma halinde yüzey bozulsa bile yapı stabilitesini korur.

Basit Taşıma Gücü Hesabı:

$$Q = A \times q_a$$

$$\text{Örnek: } A = 4 \text{ m}^2, q_a = 150 \text{ kN/m}^2 \rightarrow Q = 600 \text{ kN}$$



Şekil 6.1 Kazıklı Temelerde Kazık Düzeni
(F.Turan Kazık Temeller) (2022)

- **Sismik Yalıtımlı Köprü Tasarımı**

Durum:

Kuzey Anadolu Fay Hattı yakınında bir otoyol köprüsü.

Uygulama:

Köprü ayakları ile tabliye arasında kurşun çekirdekli sismik izolatörler kullanılmıştır. Bu izolatörler, yatay hareketleri sönümleyerek deprem enerjisinin yapıya doğrudan aktarılmasını engeller.

Sonuç:

Depremde yapının yatay deplasmanı %60 oranında azaltılmıştır.



Şekil 6.2 Sismik Deprem İzolatörleri-LDRB İzolatörler
(<https://www.ozdekan.com/sismik-deprem-izolatorleri-ldrb-izolatorler-sismik-izolator-urunu-7?category=sismik-izolatorler>) (2020)

- **Şev Stabilitesine Etkili Yapı Yerleşimi**

Durum:

Eğimli bir arazide apartman inşaatı planlanmıştır.

Uygulama:

Yapı, şev tepesinden 10 metre geri çekilerek yerleştirilmiştir. Ayrıca şevin alt kısmına drenaj hendekleri inşa edilmiştir.

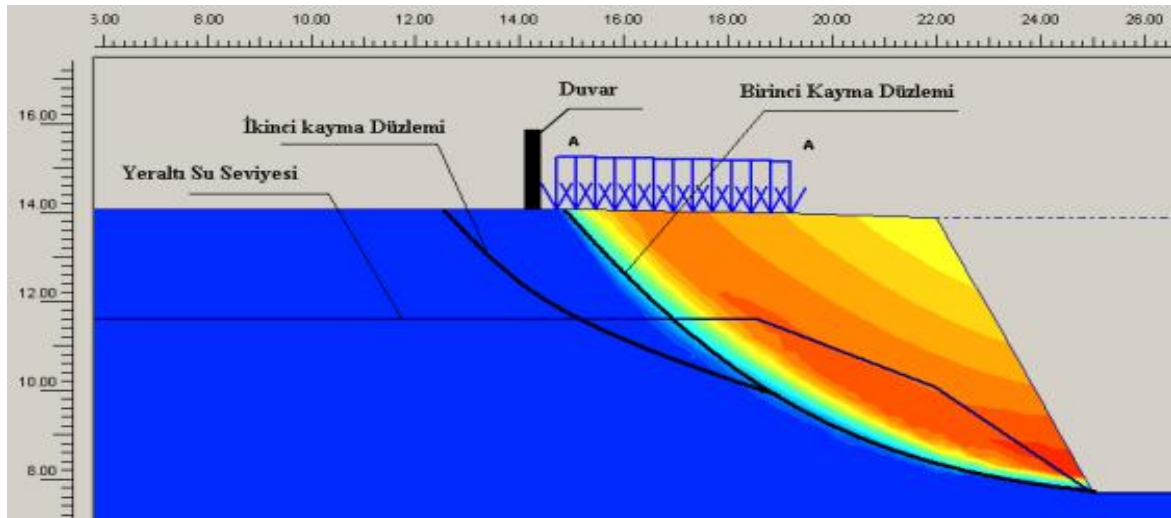
Sonuç:

Şevin stabilitesi artırılmış ve potansiyel kayma yüzeyleri azaltılmıştır.

Stabilite Kriteri:

Güvenlik Katsayısı (FS) = Toplam Dayanım / Kayma Kuvveti

İstenen değer: FS > 1.5



Şekil 6.3 Plaxis programında modellenen 2 no'lu kayma mekanizması (2B-Pq)
(A CASE STUDY BY USING BACK-CALCULATION METHOD IN SLOPE STABILITY
ANALYSIS: GOKTURK FAILURE)
(Önder AKÇAKAL/Turan DURGUNOĞLU/Aykut ŞENOL/Sadık ÖZTOPRAK) (2010)

- **Jet Grout ile Zemin İyileştirme**

Durum:

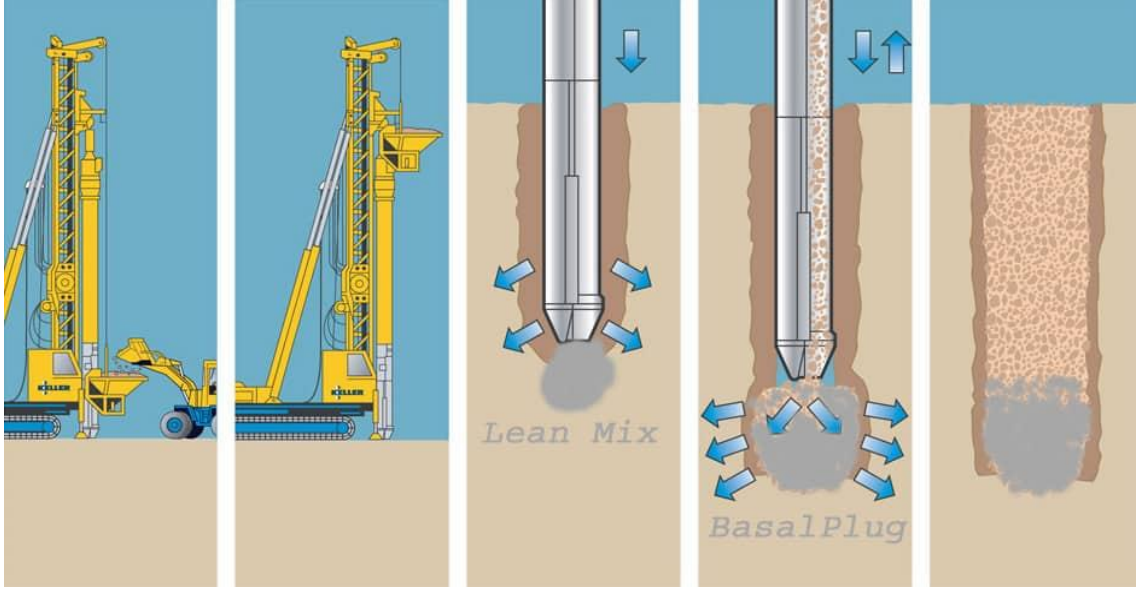
Taşıma gücü yetersiz, alüvyon bir zeminde fabrika inşaatı.

Uygulama:

Jet grout yöntemi ile zemine silindirik kolonlar enjekte edilmiş, zemin rijitliği ve dayanımı artırılmıştır. Ardından, bu kolonlar üzerine yüzeysel temel yerleştirilmiştir.

Sonuç:

Yapının oturma riski minimize edilmiş ve homojen taşıma sağlanmıştır.



Şekil 6.4 Jet Grout Yöntemi

(<https://www.sanalsantiye.com/jet-grouting-yontemi-nedir/>) (2018)

- **Pushover Analizi ile Deprem Performansı**

Durum:

6 katlı betonarme konut binasının deprem performansı değerlendirilmektedir.

Yöntem:

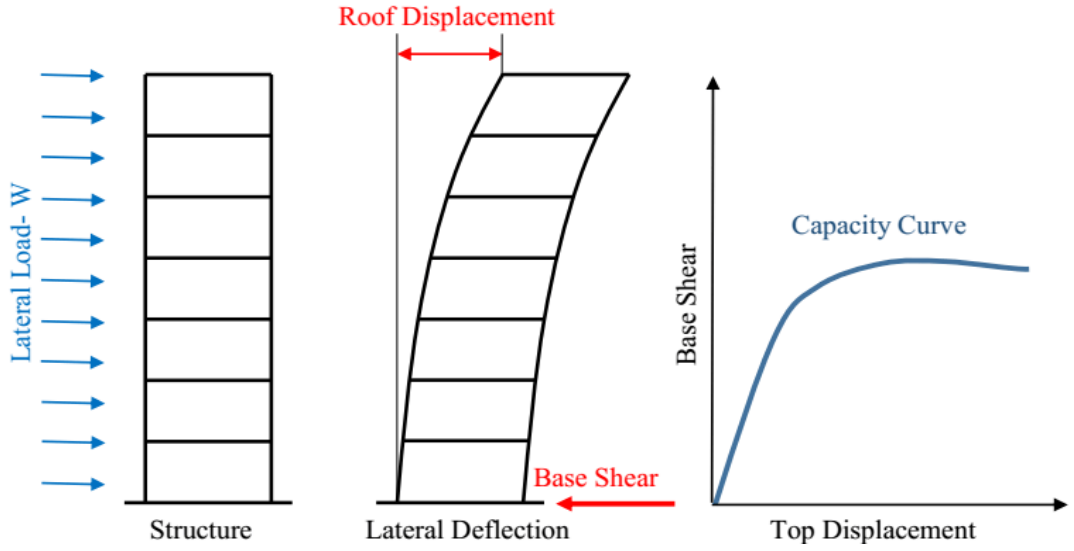
SAP2000 programı ile **pushover analizi** uygulanmıştır. Plastik mafsalların oluşum sıralaması ve kapasite-deformasyon eğrisi incelenmiştir.

Sonuç:

Bina, "kontrollü hasar" performans seviyesinde çalışmaktadır. Bazı kolon uçlarında ilave donatı önerilmiştir.

Adımlar:

1. Yük tanımlanması
2. Doğrusal elastik analiz
3. Artan yatay yükle plastikleşme izleme
4. Kapasite eğrisi çıkarımı



Şekil 6.5 İtme (Pushover) Analizi
(<https://insapedia.com/itme-pushover-analizi-nedir-nasil-yapilir/>) (2020)

- Yer Altı Suyu için Drenaj + Radye Temel

Durum:

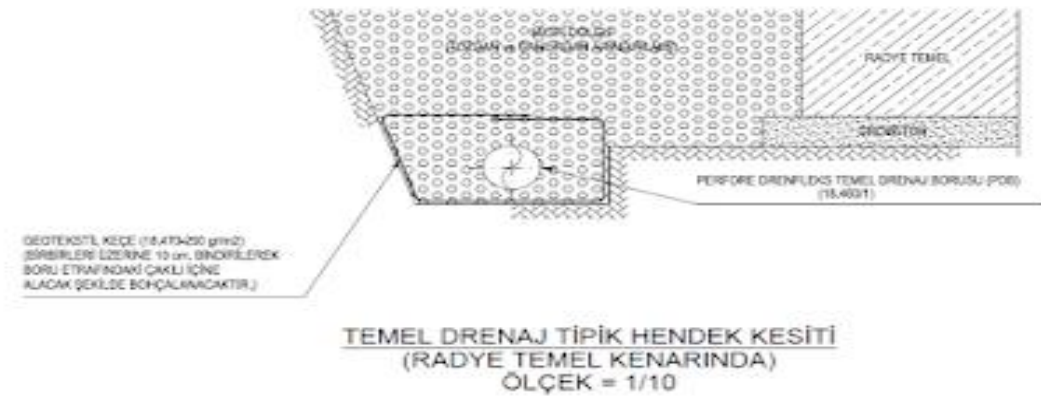
Yüksek yer altı su seviyesine sahip suya doymun alüvyon zemin.

Uygulama:

Radye temel altına perforajlı drenaj boruları, geotekstil filtre ve drenaj çukuru sistemi kurulmuştur. Böylece temel altındaki suyun yükselmesi engellenmiştir.

Sonuç:

Temel altı gözenek suyu basıncı düşürülerek kaldırma kuvveti etkisi minimize edilmiştir.



Şekil 6.6 TEMEL DRENAJİ SİSTEMİ
YAPIM METODU

(<https://faydalimuhendis.blogspot.com/2018/10/temel-drenaj-sistemi-nasil-yapilir.html>)
(2018)

7. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME

7.1 Yapı-Zemin Etkileşiminin Tasarımdaki Önemi

Yapıların güvenli, ekonomik ve uzun ömürlü olması doğrudan zeminin davranışıyla ilişkili olduğundan, yapı-zemin etkileşimi mühendislik tasarımında kritik bir rol oynar. Zemin sadece yapının yükünü taşımakla kalmaz; aynı zamanda dış etkiler (deprem, oturma, yer altı suyu değişimi vb.) karşısında yapının davranışını da önemli ölçüde etkiler.

- **Gerçekçi Davranış Analizi İçin Gerekli**

Klasik mühendislik yaklaşımlarında zemin ve yapı birbirinden bağımsız sistemler gibi değerlendirilse de, özellikle yüksek yapılar, köprüler ve zayıf zeminlerde bu varsayım geçersizdir. Gerçekçi bir davranış analizi için yapı ve zemin birlikte modellenmelidir.

Örnek: Yumuşak zemin üzerine oturan bir yapının periyodu artar; bu da deprem performansını ciddi şekilde etkiler.

- **Oturma ve Eğim Sorunlarının Önlenmesi**

Yapının oturması, temel sisteminin zeminle uyumlu çalışmasıyla ilgilidir. Yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmazsa:

- ✓ Dengesiz oturma
- ✓ Rijit yapı elemanlarında çatlaklar
- ✓ Servis ömründe kısalma gibi sorunlar yaşanabilir.

Tasarımsal Önlem: Esnek temeller, kazıklı sistemler veya iyileştirilmiş zemin kullanımı

- **Deprem Yüklerinin Gerçekçi Dağılımı**

Zemin tipi, yer altı suyu ve zemin rijitliği, yapı üzerine gelen deprem kuvvetlerinin büyüklüğünü ve dağılımını değiştirir. Yumuşak zeminlerde rezonans riski yüksektir. Bu nedenle sismik tasarımda yapı-zemin etkileşimi dikkate alınmalıdır.

TBDY 2018, özellikle yüksek binalar ve 1. derece deprem bölgeleri için yapı-zemin etkileşiminin modellenmesini zorunlu kılar.

- **Temel Tipi Seçiminde Etkili**

Radye, kazıklı, sismik izolatörlü ya da derin temel gibi seçimler, zeminin taşıma gücüne, oturma karakteristiğine ve sismik performansına göre belirlenir. Bu da doğrudan yapı-zemin etkileşimi analizleriyle mümkün olur.

7.2 Sonuçların Mühendislik Pratiğine Katkıları

Yapı-zemin etkileşimi konusundaki bu çalışmanın bulguları, hem tasarım hem de uygulama aşamasında mühendislik pratiğine çeşitli katkılar sağlamaktadır. Elde edilen sonuçlar, yapı güvenliği, ekonomik tasarım ve uzun ömürlülük açısından doğrudan uygulamaya yönelik çıkarımlar sunmaktadır.

- **Güvenli Temel Seçiminin Sağlanması**

Çalışmada farklı zemin tipleri ve yapı türleri arasında yapılan etkileşim analizleri, temel sistemlerinin seçiminde mühendislerin daha isabetli kararlar almasını sağlar. Özellikle zayıf zemin koşullarında kazıklı temel veya iyileştirme yöntemleri gerekliliği net bir şekilde ortaya konmuştur.

Katkı: Yapıların oturma risklerinin ve taşıma gücü problemlerinin önüne geçilmesi

- **Deprem Tasarımında Gerçekçi Davranış Öngörüsü**

Zemin parametrelerinin, yapının titreşim periyodu ve sismik davranışı üzerindeki etkisi, bu çalışmada açıkça değerlendirilmiştir. Bu sayede mühendisler, yapı sistemlerinin sismik performansını yalnızca üst yapı üzerinden değil, bütün sistem düzeyinde değerlendirebilir.

Katkı: Deprem mühendisliğinde yapı-zemin etkileşiminin dikkate alınmasıyla yapıların daha dayanıklı hale getirilmesi

- **Yapısal Yazılım Kullanımına Rehberlik**

Modelleme örnekleri ve hesap yöntemleriyle, mühendislerin SAP2000, Plaxis gibi yazılımlarla zemin-yapı etkileşimini doğru modellemesine katkı sunulmuştur.

Katkı: Analiz programlarının daha bilinçli ve güvenilir biçimde kullanılması

- **Maliyet-Performans Optimizasyonu**

Zemin iyileştirmesi, temel tipi veya sismik izolatör gibi unsurların hangi durumlarda uygulanmasının gerekli olduğu, mühendislik ekonomisi açısından da önem taşır. Bu çalışma, gereksiz uygulamaların önlenmesine ve kaynakların verimli kullanılmasına katkı sağlar.

Katkı: Hem güvenli hem de ekonomik tasarımların yaygınlaşması

- **Mevzuat ve Standartlara Uyumun Sağlanması**

Çalışmada TBDY 2018 ve diğer uluslararası standartlara uygun analiz ve değerlendirmeler yapılmıştır. Bu durum, mühendislik projelerinde mevzuata uygunluk açısından yol göstericidir.

- **Akademik Bilginin Uygulamaya Dönüşmesi**

Literatürde teorik olarak yer alan birçok zemin etkileşim kavramı, bu tezde uygulama örnekleri ve görsellerle desteklenmiş, mühendislik pratiğinde doğrudan kullanılabilir hale getirilmiştir.

8. KAYNAKLAR

Atabey, V. (2013). *Yapı-Zemin Etkileşimi*. 20 Mayıs 2025 tarihinde, <https://www.volkanatabey.com.tr> adresinden erişildi

Çevre, Şehircilik ve İklim Değişikliği Bakanlığı. (2018). *Türkiye Bina Deprem Yönetmeliği (TBDY 2018)*. Ankara: Resmî Gazete, 18 Mart 2018, Sayı: 30364.

Hashash, Y. M. A. & Park, D. (2002). *DEEPSOIL User Manual and Tutorial*. Urbana, IL: University of Illinois at Urbana-Champaign.

İnşaport. (2020). *Yük Türleri ve Gösterimleri*. 17 Mayıs 2025 tarihinde, <https://www.insaport.com> adresinden erişildi.

İnşaat Hesabı. (2025). *Temel Çeşitleri ve Gösterimleri*. 18 Mayıs 2025 tarihinde <https://www.insaathesabi.com> adresinden erişildi.

Akçakal, Ö., Durgunoğlu, T., Şenol, A., & Öztoprak, S. (2010). *A Case Study by Using Back-Calculation Method in Slope Stability Analysis: Göktürk Failure*. İstanbul Teknik Üniversitesi, Jeoteknik Anabilim Dalı.

Turan, F. (2022). *Kazık Temeller: Tasarım ve Uygulama İlkeleri*. İstanbul: İnşaat Mühendisliği Yayınları.

Lysmer, J., Schnabel, P. B., & Seed, H. B. (1972). *SHAKE: A Computer Program for Earthquake Response Analysis of Horizontally Layered Sites*. Report No. EERC 72-12, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

Özdekan İzolatör Sistemleri. (2020). *Sismik Deprem İzolatörleri – LDRB Ürünleri*. 29 Nisan 2025 tarihinde <https://www.ozdekan.com/sismik-deprem-izolatorleri> adresinden erişildi.

Plaxis. (2019). *2D-Pq Slope Stability Analysis Manual*. Bentley Systems.

SagTech Geophysics. (2024). *Sismik Tehlike Analizi*. 15 Nisan 2025 tarihinde <https://www.sagtechgeophysics.com/sismik-tehlike-analizi> adresinden erişildi.

Sanal Şantiye. (2018). *Jet Grouting Yöntemi Nedir?*. 22 Mayıs 2025 tarihinde <https://www.sanalsantiye.com/jet-grouting-yontemi-nedir> adresinden erişildi.

TMMOB İnşaat Mühendisleri Odası. (2023). *Zemin Mekaniği ve Temel Mühendisliği Ders Notları*. Ankara: TMMOB Yayınları.

Wikipedia. (2024). *Zemin Sıvılaşması*. 17 Nisan 2025 tarihinde https://tr.wikipedia.org/wiki/Zemin_sıvılaşması adresinden erişildi.

İnşapedia. (2020). *İtme (Pushover) Analizi Nedir, Nasıl Yapılır?* 30 Nisan 2025 tarihinde <https://insapedia.com/itme-pushover-analizi-nedir-nasil-yapilir> adresinden erişildi.

Faydalı Mühendis. (2018). *Temel Drenaj Sistemi Nasıl Yapılır?*. 14 Nisan 2025 tarihinde <https://faydalimuhendis.blogspot.com/2018/10/temel-drenaj-sistemi-nasil-yapilir.html> adresinden erişildi.