

**T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**DEMİRYOLU KÖPRÜLERİNDE
ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Koray ŞEN

Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Hakan GÜLER

Şubat 2019

T.C.
SAKARYA ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**DEMİRYOLU KÖPRÜLERİNDE
ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ**

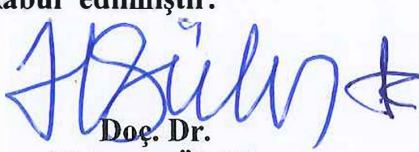
YÜKSEK LİSANS TEZİ

Koray ŞEN

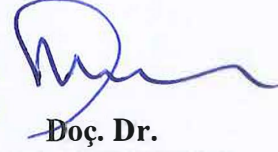
Enstitü Anabilim Dalı : İNŞAAT MÜHENDİSLİĞİ

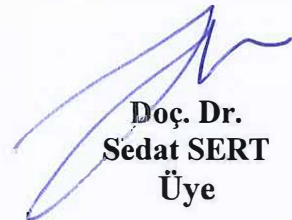
Enstitü Bilim Dalı : GEOTEKNİK

Bu tez 01/02/2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından oybirliğiyle kabul edilmiştir.



Doç. Dr.
Hakan GÜLER
Jüri Başkanı


Doç. Dr.
Rifat AKBIYIKLI
Üye


Doç. Dr.
Sedat SERT
Üye

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka üniversitelerde herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim.

Koray ŞEN

01.02.2019

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans eğitimim öğretimim süresince değerli bilgi deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi desteklerini aldığım, araştırmalarımın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarda yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden ve aynı titizlikle beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Hakan Güler'e teşekkürlerimi sunarım.

Bu tez çalışmamın yapılması aşamalarında yardımlarını esirgemeyen hocam Doç. Dr. Sedat Sert'e teşekkür ederim.

Ayrıca desteklerinden ve sabrından dolayı sevgili eşim İnş. Müh. Fethiye Şen'e, biricik kızım Ceyda Şen'e ve benim eğitim yaşamımda yol gösteren değerli annem Cavide Şen'e sonsuz teşekkürler ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR.....	i
İÇİNDEKİLER	ii
SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ	iv
ŞEKİLLER LİSTESİ	v
TABLolar LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
SUMMARY	ix
BÖLÜM 1.	
GİRİŞ	1
BÖLÜM 2.	
DEMİRYOL KÖPRÜLERİNDE ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ KAVRAMI	5
2.1. Zemin-Temel-Yapı Etkileşimi Nedir ?	5
2.2. Zemin-Yapı Etkileşiminde Alt sistem Yaklaşımı	7
2.3. Zemin-Yapı Etkileşiminde Doğrudan Yaklaşım.....	7
BÖLÜM 3.	
SONLU ELEMAN YÖNTEMİ	10
3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Plaxis Yazılımı.....	10
3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi.....	10
3.1.2. Plaxis yazılımı	13
3.2. Plaxiste Zemin Davranış Modelleri.....	15
3.2.1. Mohr-Coulomb zemin modeli.....	15
3.2.2. Pekleşen zemin modeli.....	16
3.2.3. Plaxis’te yeraltı su seviyesi tanımı	17

3.3. Plaxis’te Zemin Katmanlarının Girilmesi ve Diğer Özellikler	17
--	----

BÖLÜM 4.

DEMİRYOLU KÖPRÜLERİ: WEIHERFELD KÖPRÜSÜ ÖRNEĞİ.....	19
4.1. Köprünün Özelliklerinin Tanıtımı.....	19
4.2. Köprü Malzeme Özellikleri.....	20
4.3. Köprü Fiziksel Özellikleri	20
4.3.1. Öz (sabit) yükler (G+S).....	22
4.3.2. Hareketli yükler (Q : Tren hareketli yükü).....	22

BÖLÜM 5.

WEIHERFELD DEMİRYOLU KÖPRÜSÜ ANALİZ VE SONUÇLAR.....	26
5.1. Zemin-Yapı Etkileşimli Analiz ve Hesaplara Giriş	26
5.1.1. Kumlu zeminlerin özellikleri	26
5.1.2. Kumlu zemin ortamında köprü modelinin kurulması	27
5.1.3. Hesapların yapılması ve sonuçlar.....	33
5.2. Killi Zeminlerde Yapı Zemin Etkileşiminin İncelenmesi	41
5.2.1. Killi zeminlerin mekanik özellikleri	41
5.2.2. Killi zemin ortamında köprü modelinin kurulması	43
5.2.3. Hesapların yapılması ve sonuçlar.....	46
5.3. İyileştirilmiş Killi Zeminde Yapı Zemin Etkileşiminin İncelenmesi....	49
5.3.1. Hesapların yapılması ve sonuçlar.....	51

BÖLÜM 6.

SONUÇ VE ÖNERİLER	58
KAYNAKLAR	60
EKLER.....	63
ÖZGEÇMİŞ	71

SİMGELER VE KISALTMALAR LİSTESİ

G	: Öz yük
S	: Kar yükü
U	: Yer değiştirme
c	: Kohezyon
K	: Rijitlik
F	: Kuvvet büyüklüğü
E	: Malzeme Elastisite modülü
I	: Eylemsizlik momenti
L	: Boy
ϕ	: Kayma direnci açısı
σ_1, σ_3	: Düşey ve yatay gerilme (asal gerilme)
EA	: Eksenel rijitlik
EI	: Eğilme rijitliği
ν	: Poisson oranı
E_{ur}	: Tekrarlı yükleme deformasyon modülü
E_{50}	: Hücre kesme deneyi deformasyon modülü
E_{oed}	: Ödometre deneyi deformasyon modülü
δ	: Zemin deplasmanı
Ψ	: Dilatans açısı
UU	: Konsolidasyonsuz drenajsız deney
τ	: Kayma direnci

ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 1.1. Demiryolu köprülerinde titreşim kaynakları.....	2
Şekil 2.1. Titreşim kaynağının zemine ve yapıya etkisi.....	6
Şekil 2.2. Altsistem yaklaşımında ögeler.....	8
Şekil 2.3. Kaya ve yumuşak zeminde hareket.....	9
Şekil 3.1. Bir çubuk sistemde bilinmeyenler	10
Şekil 3.2. Bir ve iki boyutlu sonlu eleman örnekleri.....	11
Şekil 3.3. Üç Boyutlu bir sonlu eleman	12
Şekil 3.4. 2D probleme bir örnek (düzlem zorlanma).....	12
Şekil 3.5. Plaxis zemin ortamında sonlu eleman ağı ve hassaslık	14
Şekil 3.6. Plaxis bilgi giriş ekranı	14
Şekil 3.7. Zeminde Mohr-Coulomb akma tarifi. (teğet)	15
Şekil 3.8. Pekleşen zemin modelinde davranışın şekli	16
Şekil 3.9. Zeminde deformasyon modülleri (E) nin değişik tanımları.....	17
Şekil 4.1. Weiherfeld Köprüsünün bir görünümü [3] [28]	19
Şekil 4.2. Köprü birleşim tipi örneği. [3] [28]	20
Şekil 4.3. Köprünün çelik programında tasarlanan modeli.....	21
Şekil 4.4. Köprünün çelik programında modellenen perspektif görüntüsü	22
Şekil 4.5. Yük Modeli 71 ve düşey yükler [4-5-6-7-8-9-10-11].....	23
Şekil 4.6. Yük Modeli SW/0 ve SW/2 [4-5-6-7-8-9-10-11]	23
Şekil 4.7. Yük Modeli HSLM-A [4-5-6-7-8-9-10-11].....	24
Şekil 4.8. Yük Modeli HSLM / B [4-5-6-7-8-9-10-11]	24
Şekil 5.1. Sonlu eleman ağına sıklık farklılığının belirtilmesi.....	29
Şekil 5.2. Dinamik yükün değişimi.....	30
Şekil 5.3. Köprüye etkiyen yükler.....	30
Şekil 5.4. Hesap Aşamalarının tanımlandığı girdi ekranı	32
Şekil 5.5. Eğri çizilecek noktalar	32

Şekil 5.6. Köprü, geri dolgu ve köprü üst yüklemelerinin sonucu oluşan deforme olmuş hal	34
Şekil 5.7. 1. Dinamik zaman anındaki köprü deforme olmuş hal (deplasmanlar 50 kat büyütülmüştür).....	35
Şekil 5.8. DYN1 fazı efektif gerilme diyagramı	35
Şekil 5.9. DYN1 fazı toplam gerilme diyagramı	35
Şekil 5.10. 2. Dinamik zaman anındaki köprü deforme olmuş hal (deplasmanlar 100 kat büyütülmüştür).....	36
Şekil 5.11. DYN2 fazı efektif gerilme diyagramı	37
Şekil 5.12. DYN2 fazı toplam gerilme diyagramı	37
Şekil 5.13. 3. Dinamik zaman anındaki köprü deforme olmuş hali	38
Şekil 5.14. DYN3 fazı toplam efektif gerilme diyagramı	38
Şekil 5.15. DYN3 fazı toplam gerilme diyagramı	39
Şekil 5.16. 4. Dinamik zaman anındaki köprü deforme olmuş hali	40
Şekil 5.17. DYN4 fazı toplam efektif gerilme diyagramı	40
Şekil 5.18. DYN4 fazı toplam toplam gerilme diyagramı	40
Şekil 5.19. Yumuşak kilde kırılma zarfı ve kayma direnci.....	43
Şekil 5.20. Kil zemine oturan yapı modeli.....	45
Şekil 5.21. Hesap aşamalarının tanımlandığı bilgi girişi ekranı	46
Şekil 5.22. DYN1 yüklemesi deforme olmuş hal. (Şekil 100 kat büyütülmüştür.) .	48
Şekil 5.23. İyileştirilen zemin ve iyileştirilen temel modeli	49
Şekil 5.24. Problemdeki yükleme fazlarının ekran görüntüsü	51
Şekil 5.25. Killi zemin DYN1 yüklemesi deforme olmuş hal (ölçek 50 kat büyütülmüş).....	53
Şekil 5.26. Killi zemin DYN1 yüklemesi toplam gerilme diyagramı.....	53
Şekil 5.27. Killi zemin DYN1 yüklemesi efektif gerilme diyagramı	53
Şekil 5.28. Killi zemin DYN2 yüklemesi deforme olmuş hal (şekil ölçeği 50 kat büyütülmüştür)	54
Şekil 5.29. Killi zemin DYN3 yüklemesi deforme olmuş hal (şekil ölçeği 50 kat büyütülmüştür)	55
Şekil 5.30. Killi zemin DYN4 yüklemesi deforme olmuş hal (şekil ölçeği 50 kat büyütülmüştür)	55

TABLolar LİSTESİ

Tablo 4.1. Y¼k analizi tablosu	22
Tablo 4.2. Y¼k Modeli SW/0 ve SW/2 değerleri.....	24
Tablo 4.3. Y¼k modeli SW/0 ve SW/2 de y¼kleme değerleri [4-5-6-7-8-9-10-11]	25
Tablo 5.1. Modeldeki zemin ve yapı özellikleri tablosu.....	28
Tablo 5.2. Modelde kullanılan yapı ve zemin parametreleri.	44
Tablo 5.3. Modelde kullanılan yapı ve zemin parametreleri	50
Tablo 5.4. Tüm analizlerin yer değiştirme ve gerilme sonuçları Yerdeğiştirmeler mm gerilmeler kN/m ²	56

ÖZET

Anahtar kelimeler: Köprüler, Zemin-yapı etkileşimi, Sonlu elemanlar yöntemi, Plaxis yazılımı.

Bu tez çalışmasında ulaştırma yapılarının, statik ve dinamik yükler (tren geçişleri) altında zemin-yapı etkileşimi ele alınmış, bu etkileşimde değişik özellik ve şartlardaki zemin tiplerinin davranışları incelenmiştir. Köprüler genel başlığı altında, Almanya'nın Karlsruhe kentindeki Weiherfeld demiryolu köprüsünün fiziksel özellikleri baz alınarak sistem modeli oluşturulmuştur. Çalışmada sonlu elemanlar yöntemini referans alan Plaxis 2D yazılımına başvurularak hesaplar yapılmıştır. Kumlu ve killi zeminlerin bu statik ve dinamik tren etkiler altında nasıl bir kullanılabilirlik, dayanım, performans sergileyebileceği hesap ve analiz yöntemleriyle irdelenmiştir. Sonuçta, dayanım yetersizliği gösteren noktalarda da iyileştirme yöntemlerine değinilmiştir.

SOIL-STRUCTURE INTERACTION IN RAILWAY BRIDGES

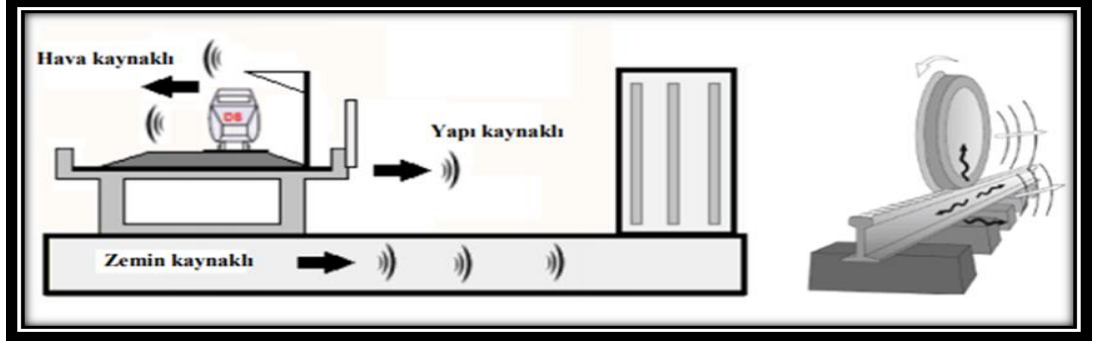
SUMMARY

Keywords: Bridges, Soil-structure interaction, Finite element method, Plaxis software

In this thesis study, a soil-structure interaction of transportation structures under static and dynamic loads (train passages) is studied. Under the bridges main title in thesis, a system-model was created based on the physical characteristics of the Weiherfeld railway bridge in Karlsruhe, Germany. In the study, the analyses were performed by using Plaxis 2D software which is a finite element method program. The sandy and clayey soils are analysed to find their availability and performance under the static and dynamic train loads. As a result, some improvement methods are also suggested for the sections having insufficient strength.

BÖLÜM 1. GİRİŞ

1820 yıllarında ilk modern demiryolu köprüsünün yapımından sonra demiryolu köprü mühendisleri demiryolu köprüleri konusunda çok önemli ilerlemeler kaydetmişlerdir. Buharlı lokomotifler yerlerini elektrikli ve dizel lokomotiflere bırakmış ve yük vagonlarının tonajı ve donanımları değişmiştir. Demiryolu altyapısının taşıma gücü sınırları, bakım ve yenileme gibi ekonomik sebeplerden dolayı demiryolu araçlarının yükleme kapasitelerinin sınırlandırılmasına rağmen dingil yükleri zaman içinde artmaktadır. Çalışan ilk buharlı lokomotif John Fitch tarafından Amerika'da 1794 yılında tasarlanmış ve yapılmıştır. Devamında İngiltere'de 1804 yılında buharlı bir lokomotif daha yapılmıştır. İngiltere'de Stocton ve Darlington arasında ilk demiryolu hattı işletmeciliği 1825 ve 1863 yılları arasında gerçekleştirilmiştir. Başlangıçta demiryolu mühendisleri demiryolu trafiğini demiryolu köprülerine aktarmakta zorluklar yaşamışlardır. Başlangıçta demiryolu köprüleri çoğunlukla demirden imal edilmiş ve bağlantılarda perçin kullanılmıştır. Demiryolu köprüleri demiryolu altyapısının önemli bileşenleridir. Demiryolu köprüleri yapım ve bakım aşamalarında çok büyük yatırımlar gerektirirler ve demiryolu ulaşım sisteminin en kritik kesimleri yani şişe boynu olarak dikkate alınırlar. Köprülerde ciddi hasarların meydana gelmesi durumunda tüm demiryolu trafiği işletmeye kapatılır. Demiryolu köprüleri üzerindeki hareketli yükler zaman içinde demiryolu üstyapısında ve köprülerin yapısal formunda bozulmalara sebep olur. Yapısal bozukluğu olan demiryolu köprülerinde aşırı derece gürültü ve titreşim meydana gelir. Demiryolu köprülerinde gürültü ve titreşim hava kaynaklı, yapı kaynaklı ve zemin kaynaklı olmak üzere üç ana başlık altında incelenir. Aşağıda Şekil 1.1.'de gürültü ve titreşim kaynakları gösterilmiştir [3-28].



Şekil 1.1. Demiryolu köprülerinde titreşim kaynakları

Demiryolu köprülerinin yapısal özelliğinin belirlenmesindeki iki ana faktör köprü açıklığı ve geçilen engelin tipidir (Örneğin nehir, demiryolu, karayolu vb.). Aynı uzunluğa sahip açıklıklarda farklı alternatifler tercih edilebilir. Köprünün fonksiyonu, yapımı ve ekonomik sebepler nihai kararın verilmesinde etkili parametrelerdir. Köprülerin ana yapısal biçimleri aşağıdaki gibi sınıflandırılır [3]:

- Plak kirişli veya kutu profil kirişli köprüler (0-250 m)
- Makas kirişli köprüler (400 m'ye kadar)
- Konsol köprüler (600 m'ye kadar)
- Halatlı köprüler (1200 m'ye kadar)
- Asma köprüler (1900 m'ye kadar).

Demiryolu köprülerinin yapımında kullanılan malzeme özellikleri Eurocode gibi özel ulusal kodlarla belirlenir. Bunun dışında Uluslararası Demiryolu Birliği (UIC) gibi kuruluşların ya da diğer bilimsel çalışmaların sonuçları da kullanılabilir. Yapım, kontrol, değiştirme gibi kolaylıklardan ve hafif olmalarından dolayı çelik ve kompozit malzemeler köprü yapımında tercih edilirler. Genellikle yüksek mukavemetli malzemeler tercih edilirler ancak ekonomi de köprü yapımında dikkate alınır. Avrupa'da genel olarak S355 karbon derecesine sahip bulonlu veya kaynaklı çelik köprüler tercih edilir. Bazı özel durumlarda daha yüksek dereceli çelik malzemeler kullanılabilir. Metal yapıların genel özellikleri EN 1993-1-1'de [7] tanımlanmıştır. Betonarme köprülerde ise EN 1992-1-1 [6] standardı dikkate alınır. ABD ise köprülerde kullanılan malzemeler Amerikan Test ve Malzeme Kurumu'nun (ASTM) standartlarına uygun olmalıdır [3].

Demiryolu köprüleri ve bu köprülerin static ve dinamik yükler altında davranışıyla ilgili literatürde önemli çalışmalar yapılmıştır. Kang ve diğ. (2018), Almanya’da bulunan demiryolu köprüleri incelemişlerdir. Bu köprülerin mevcut durumları analiz edilmiş ve gelecekte köprülerin yapısal olarak iyileştirilmesine yönelik öneriler sunulmuştur [14]. Schneider ve Marx (2018), demiryolu köprüleri üzerinde hareket eden yüksek hızlı trenlerin köprü üzerinden geçişlerinde köprü yapısına etki edeceği dinamik yüklerin incelemesini yapmışlardır. Dinamik yükler dikkate alınarak köprü tasarımının yapılmasını önermiş ve çeşitli uygulamalar yapmışlardır [13]. Marquez ve diğ. (2018) perçinli demiryolu köprülerinde çapraz ve kiriş bağlantılarının yorulma bağlamında kritik kesitler olduğunu belirtmiş, eski köprüler söz konusu olduğunda bu kesitlerde yorulmaya dayalı hasarların belirgin olduğunu vurgulamışlardır. [15]. Holowaty J. (2017), 1875 ile 1930 yıllarında yapılan eski köprülerden gelen çelik örneklerini laboratuvarında incelemiş, bu köprülerde kimyasal ve gerilme özelliklerini rapor olarak sunmuştur. Özellikle eksi sıcaklıklarda tokluk değerlerinin eski köprülerde karakteristik tokluk değerlerini verdiğini incelemiştir. [33] A.Domenech ve diğ. (2016), demiryolu trafiği altındaki kirişli köprülerin enine yöndeki tepkisini incelemiştir. Özellikle zemin-yapı etkileşiminin kritik ve rezonans hızlarını nasıl etkileyebileceğini araştırmıştır. [16] M.D. Martínez-Rodrigo ve diğ. (2018), kısa ve orta açıklıklı demiryolu köprülerinde titreşimlere değinmekte, bu tür köprülerin platformlarında yüksek seviyelerde ivmelenme olabileceğini söylemiş, bununla balast tabakalarında erken bozulmalara neden olduğunu açıklamıştır. [17] A.Romero ve diğ. (2013) yüksek hızlı demiryolu hatlarında zemin-yapı etkileşimini hakkında araştırma yapmıştır. Analizde köprüden geçen yüksek hızlı trenlerin neden olduğu titreşimlerin zaman alanında formüle edilmiş ve tamamen üç boyutlu sonlu elemanlarla modelleyerek analiz etmiştir. [18] Kodai Matsuoka diğ. (2017), yüksek hızlı demiryolundaki rezonansların köprünün stabilitesine ve köprü yapısal güvenliğine etkisinin kritik bir durum oluşturduğu hakkında araştırmalar yapmıştır. Oluşturduğu modelde yapı elemanlarını gerçeğe yakın olarak modellemenin önemine vurgu yapmıştır. [19] Anubhav Shiva ve diğ. (2017) Demiryolu hatlarında gürültü kaynakları hakkında araştırmalar yapmışlardır. Trenlerin köprü üzerinden geçerken en önemli gürültü kaynağının tekerlek ile ray arasındaki sert temas alanından meydana geldiğini belirtmiştir [20]. Tomáš Plachý diğ. (2017) Çek Cumhuriyeti’nde yüz

yıldan daha eski bir köprünün deneysel analizini yapmışlar ve köprünün yapısal kusurlarını incelemişlerdir. Köprünün yapısal problemlerini ölçmek için en önemli testin köprü üzerinde boş tren yüklemesi halinde ani frenlerin etkilerini analiz etmişler, ayrıca yanıl stabilite yetersizliğinin rüzgar etkisinden meydana gelmesini de araştırmıştır [21].



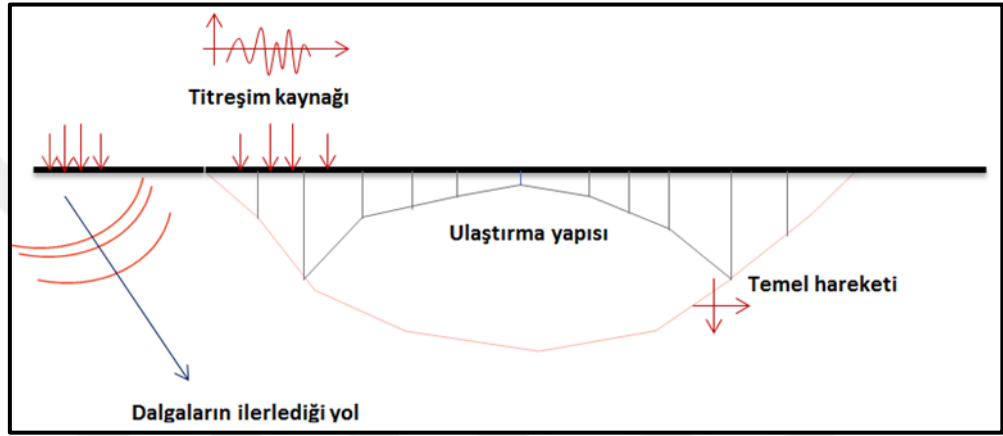
BÖLÜM 2. DEMİRYOL KÖPRÜLERİNDE ZEMİN-YAPI ETKİLEŞİMİ KAVRAMI

2.1. Zemin-Temel-Yapı Etkileşimi Nedir?

Şehirleşmenin, dolayısıyla nüfusun artmasıyla birlikte, yapıların yükseklikleri ve buna paralel olarak gömme derinliklerinin artması günümüzün kaçınılmaz bir gerçeği olarak toplum yaşamını etkilemektedir. Modern çağda insan ihtiyaçlarının artması ve çeşitlenmesi, zamanın çok değerli olması, endüstrileşmiş toplumlarda doğal olarak yeraltı ve yerüstü yapılarını etkilemiştir. Yapılaşma eskiden olduğu gibi az katlı ve seyrek yerleşim olarak değil sık ve yüksek olma zorunlulukları ortaya çıkmıştır. Bunun sonucu olarak şehirlerde azalan boş arsa oranları yapıları yakın ve yüksek olmaya iterek daha değişik zemin problemlerinin çözülmesini gerektirmektedir. Bunun en başta gelen örneklerinden biri Zemin-yapı etkileşimi konusudur. Yoğun kentleşme ile birlikte ovalara ve alüviyal karakterli kıyısız bölgelere kayan şehir yoğunluğu zemin problemlerinin çözümünü zorunlu kılar hale gelmiştir. Örneğin yüksek bir yapının derin bodrum kazısında, komşu binaların bundan nasıl etkilenecek ne kadar deformasyona uğrayacağı veya bir tünel inşasında yerüstü yapılarının ne kadar oturacağı, ya da bir şehir merkezinde bir kazık çakılırken diğer tüm yapıların dinamik olarak ne kadar etkileneceği önceden bilinmelidir. Olaya bir de kentlerin alüviyal zemin bölgelerine inşası girince, depremin ve diğer titreşim kaynaklarının bu zemin kesitlerini etkileme biçiminin problemin daha ayrıntılı analiz yöntemlerine dayandırılması gerektirdiği ortadadır.

Zemin-yapı etkileşimi temel tanım olarak zeminin yapıyı, yapının da zemini karşılıklı olarak etkilemesidir. Buna göre dinamik zemin hareketlerinde (Örn. deprem, kazık çakma, araç geçişleri) zeminin içerisindeki yapı (temeller) bu titreşimlerden sistemin bir parçası olarak etkilenir. Yani zemindeki dalga yayılımı yüzeye ulaştığında yapı temeline çarpar. Bu dalganın çarpmasından dolayı, rijitliğine

bağlı olarak temel kendi doğal frekansına göre titreşir. Bu titreşim sırasında dalgaların bir kısmı zemine geri döner, geri kalan kısmı ise temel vasıtasıyla üstyapıya geçer. Üstyapı aldığı bu girdi etkiyi, kendi frekans, periyot, rijitlik özelliklerinin fonksiyonu olarak titreşimlerle sönümler. Diğer taraftan yapıya gelen bu titreşim tamamen sönümlenemez. Sönümlenmeyen (ısıya dönüşmeyen) kısmı da geri yansıtılarak zemin ortamına döner. Buna kısaca Zemin-yapı etkileşimi diyoruz (Şekil 2.1.).



Şekil 2.1. Titreşim kaynağının zemine ve yapıya etkisi

Bazen de yapı kaynaklı titreşimler önce yapıyı etkileyerek, dalga yayılma özelliği nedeniyle temele ve sonrasında da zemin ortamına gönderilir. Deprem tersi olarak nitelenen bu durum, genel problemin aynı karakteristik özelliklerini taşır. Örneğin, bina içerisindeki ağır pres makinaları, titreşimli makinaların etkileri önce üst yapı sistemine sonra da temel ve zemin ortamına geçer. Her iki durumda da (yapı kaynaklı-zemin kaynaklı) titreşim transferlerinin ve bunların yapı ve zeminde oluşturduğu deformasyonların ve gerilmelerin bilinmesi için bir analiz modeline ihtiyaç duyulur.

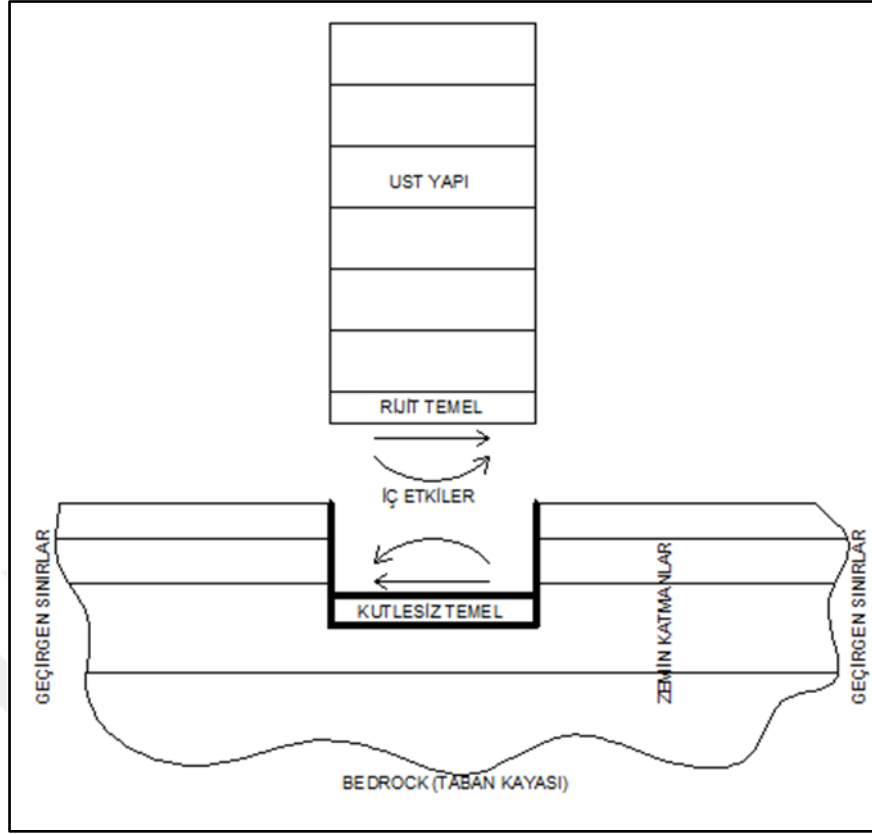
Bu analiz yöntemlerinin iki yaklaşım halinde modellenmesi önerilmektedir. Bunlardan ilki “altsistem yaklaşımı”, ikincisi ise “doğrudan yöntem” yaklaşımıdır. Bu yaklaşımlardan hangisinin kullanılacağına, zeminin rijitlik özellikleri ile birlikte yapının da rijitlik ve dinamik özelliklerine (frekans öz değerleri, davranış modları) bağlı olduğu söylenebilir.

2.2. Zemin-Yapı Etkileşiminde Alt sistem Yaklaşımı

Bu yöntemde yapı ayrı bir sistem, zemin ve temel ayrı bir sistem olarak modellenir. Model tasarımı sonlu eleman şeklindedir. Her bir sistem sonlu sayıda bileşenlere ayrılarak kendi modelini oluşturur. Daha sonra kendi dış kuvvetleri ve rijitlik özellikleri ile kurulan alt sistemler ortak noktalarında birleştirilerek etkileri birbirlerine aktarılır. Bu superpoze üst sistemin çözümünde iç kuvvetler, yer değiştirmeler bulunur. Bu etkileşimin esasları kinematik etkileşime dayanır. Yani her sistem önce kendi dış ve iç kuvvetleri ile birbirinden bağımsız olarak analiz edilir, sonra da ortak noktalardaki bağ kuvvetleri birleştirilerek global rijitlikleri içeren matris çözümlenir (Şekil 2.2.) [1].

2.3. Zemin-Yapı Etkileşiminde Doğrudan Yaklaşım

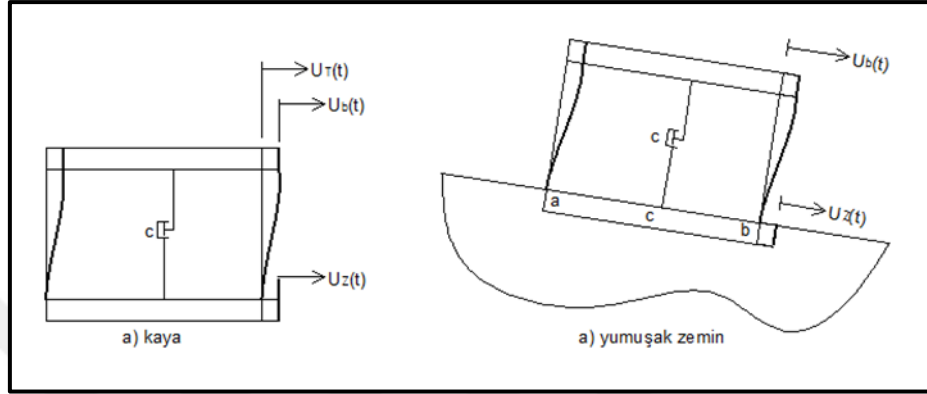
Doğrudan yöntemde üstyapı ve zemin-temel sistemi tek bir sistem olarak idealleştirilerek modellenir. Bu sistemde üst yapıdan kaynaklanan eylemsizlik etkileşimi de hesaba katılmış olur. Dolayısıyla kinematik ve eylemsizlik etkileşimi bir arada dikkate alınır. Görece yüksek yapıların yumuşak zeminlere oturtulması halinde problem daha karmaşık olduğundan “doğrudan yöntemin” kullanılması daha uygun olacaktır (Şekil 2.3.) [1].



Şekil 2.2. Altsistem yaklaşımında ögeler

En genel ifadesi ile, titreşim kaynağı olarak deprem ya da tren geçişi sırasında zemin tepkisinin yapı hareketini, yapı tepkisinin de zemin hareketini etkilediği bu duruma literatürde Zemin-Yapı Etkileşimi denir. Bu etkileşimi daha iyi anlayabilmek için kaya zemine oturan bir yapı ile görece yumuşak/gevşek zemine oturtulmuş aynı yapıyı kıyaslamak gerekir. Kaya üzerinde inşa edilen yapılarda, tren geçişi ya da depremden kaynaklı yatay veya düşey hareketten oluşan taban kesme kuvveti yapı tabanına doğrudan etki ettirilir. Bu durumda, yapıda oluşan eylemsizlik kuvvetleri tabandaki eylemsizlik kuvvetine (taban kesme kuvveti) eşit olur. Bina temelinde taban kesme kuvvetinin yanında ayrıca bir devrilme momenti de oluşur. Eğer temel altındaki kaya veya zemin yeterince rijit ise temelde dinamik harekete bağlı fark deformasyon oluşmayacaktır. Temeldeki yatay ve düşey deplasman, zemin hareketinin yatay deplasmanına eşit olursa, temel tabanında herhangi bir sallanma (rocking) oluşmaz (Şekil 2.3.a). Yapı davranışını, yapının karakteristik özellikleri (kütle, rijitlik, sönüm oranı, dayanım ve süneklik vb.) belirlemektedir. Görece yumuşak/gevşek zeminlere oturan yapılarda zemin-yapı etkileşimi nedeniyle yapısal

girdi hareketi ile yapı tabanındaki hareket birbirinden farklılık gösterecektir (Şekil 2.3.b). Zemin görece yumuşak/gevşek ise şekilde görüldüğü gibi temel hareketi değişecektir. Düşey doğrultuda yayılan dalga yayılım özellikleri değişirken c noktası temel tabanı üzerinde ve yanındaki a ve b noktaları hareketleri de değişir (Şekil 2.3.) [1].



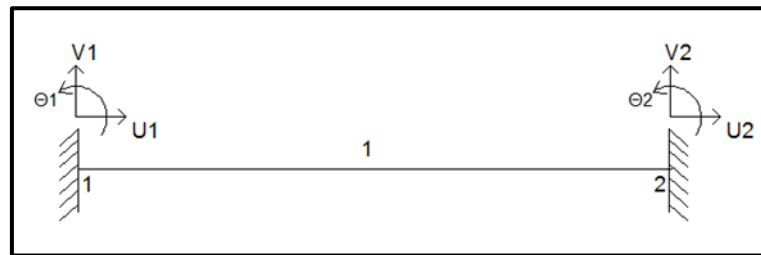
Şekil 2.3. Kaya ve yumuşak zeminde hareket

BÖLÜM 3. SONLU ELEMAN YÖNTEMİ

3.1. Sonlu Elemanlar Yöntemi ve Plaxis Yazılımı

3.1.1. Sonlu elemanlar yöntemi

Bir yapı elemanının, çubuk sistem gibi bir veya iki elemandan oluşan bir sistem olması halinde ise sistemi üç adet denge denklemi ile kolayca çözülebilir. Ancak sistemde fazla bağıllık (hiperstatiklik) söz konusu ise denge denklemleri sistemin çözümünde yeterli olmayacaktır. Bilinen üç denge şartı yanında şekil değiştirmeyi de içeren ek denklemleri çözüme katılmalıdır. Örneğin iki tarafı sabit mesnetli tek açıklıklı kirişte bilindiği gibi dört tanesi yatay ve düşey, iki tanesi de dönmeye bağlı altı bilinmeyen bulunmaktadır. Denge denklemi burada üç tane olduğundan altı bilinmeyen burada çözülmesi imkansız hale gelir. O halde geri kalan (6-3=3) üç adet bilinmeyen için şekil değiştirme ifadeleri kullanılır. Bu kirişin düğüm noktalarında tanımlanacak şekil değiştirme denklemleri sistemin bütününde kullanılır. Örneğini Şekil 3.1.'de gördüğümüz ankastre kirişte genel denge denklemi,



Şekil 3.1. Bir çubuk sistemde bilinmeyenler

$$[K]. [u] = [F] \quad (3.1)$$

ile ifade edilebilir. Burada K sistemin rijitliği, u yer değiştirmeler ve F ise kuvvetleri

belirtir. Bu genel denklem Eşitlik 2’de matris formunda yazılırsa,

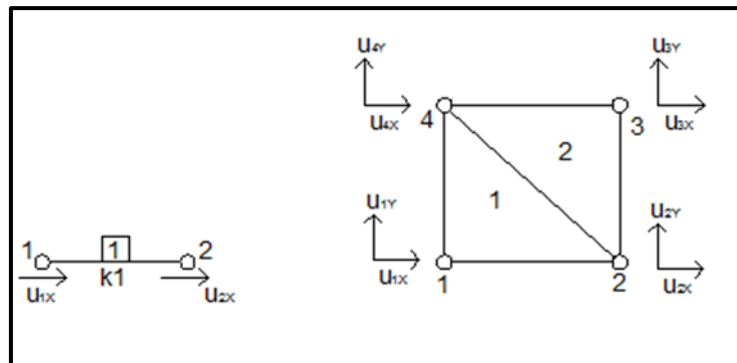
$$\begin{matrix} u_1 & v_1 & \theta_1 & u_2 & v_2 & \theta_2 \end{matrix}
 \begin{bmatrix} k_{11} & k_{12} & k_{13} & k_{14} & k_{15} & k_{16} \\ k_{21} & k_{22} & k_{23} & k_{24} & k_{25} & k_{26} \\ k_{31} & k_{32} & k_{33} & k_{34} & k_{35} & k_{36} \\ k_{41} & k_{42} & k_{43} & k_{44} & k_{45} & k_{46} \\ k_{51} & k_{52} & k_{53} & k_{54} & k_{55} & k_{56} \\ k_{61} & k_{62} & k_{63} & k_{64} & k_{65} & k_{66} \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ \theta_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ \theta_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ M_1 \\ F_3 \\ F_4 \\ M_2 \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

Burada:

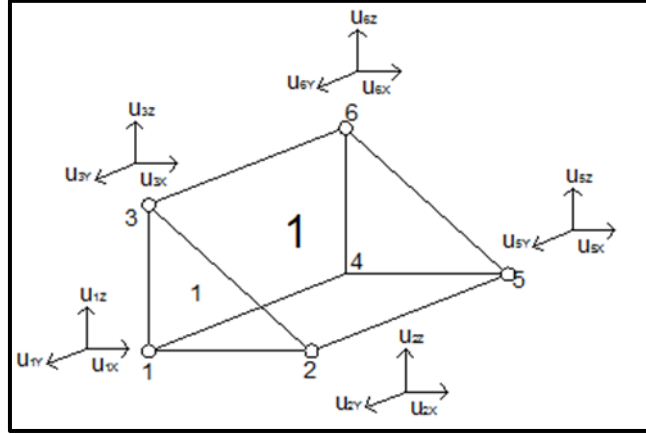
k_{11} terimi EA/L , yani uzama rijitliğini,

k_{13} terimi ise dönme rijitliği olan $12EI/L^3$ olarak tanımlanmaktadır.

Bu matris eşitliği şeklindeki denklem bilinen matris işlemleriyle (Gauss vs.) çözülebilir ve bilinmeyenleri bulanabilir. Bu tür elemanların çözümünde çubukları ikiye, üçe veya ihtiyaç olan sayıda bölünmeye imkan vardır. İşte bu gibi elemanları bölerek sonlu sayıda parçalara ayırma ve her çubuğun denklemini ayrı ayrı yazarak, sonrasında da kendi aralarında ortak noktalarından birleştirme ve global matrisi elde etme işlemine Sonlu Elemanlar Yöntemi denir. Yöntem bir çubuk sisteminde kullanılabildiği gibi iki boyutlu (2D) düzlem ve üç boyutlu (3D) hacim elemanlarında da çözümde olanak sağlar (Şekil 3.2. ve Şekil 3.3.).

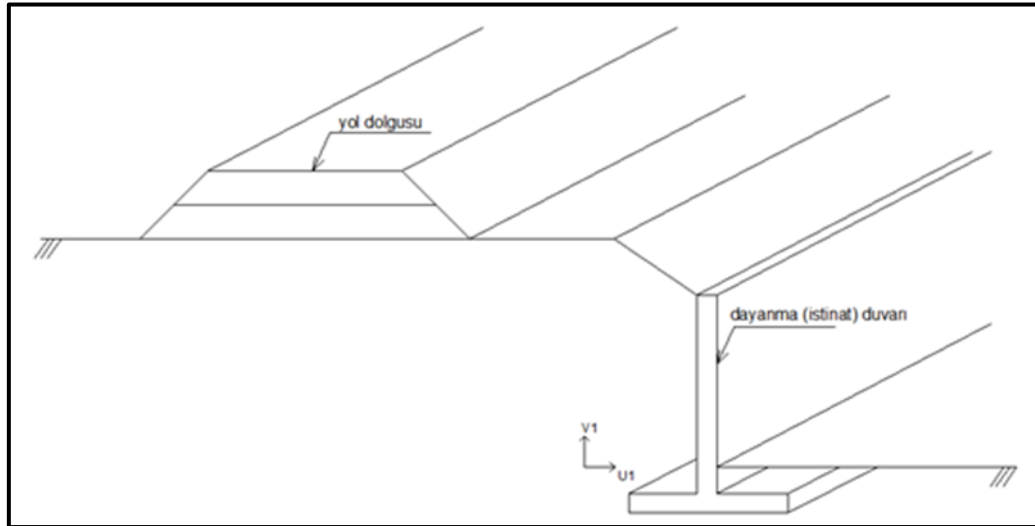


Şekil 3.2. Bir ve iki boyutlu sonlu eleman örnekleri



Şekil 3.3. Üç Boyutlu bir sonlu eleman

Zemin mekaniği problemleri genelde iki boyutlu (düzlem zorlanma) veya uç boyutlu problem olarak karşımıza çıkar. Zemin ortamı 3D bir sistem olup amaçlar doğrultusunda eğer sistem elveriyorsa iki boyutlu probleme indirgenebilir. Örneğin bir doğrultuda çok uzun olan istinat duvarı, yol dolgusu gibi ortamlar uzun doğrultularda ihmal edilebilecek bir deformasyon yaparlar. Yani bu doğrultularda zemin yenilmesi (failure) meydana gelmez. Bu indirgeme, işlem hacmini ve çözüm zamanını kısaltır (Şekil 3.4.).



Şekil 3.4. 2D probleme bir örnek (düzlem zorlanma)

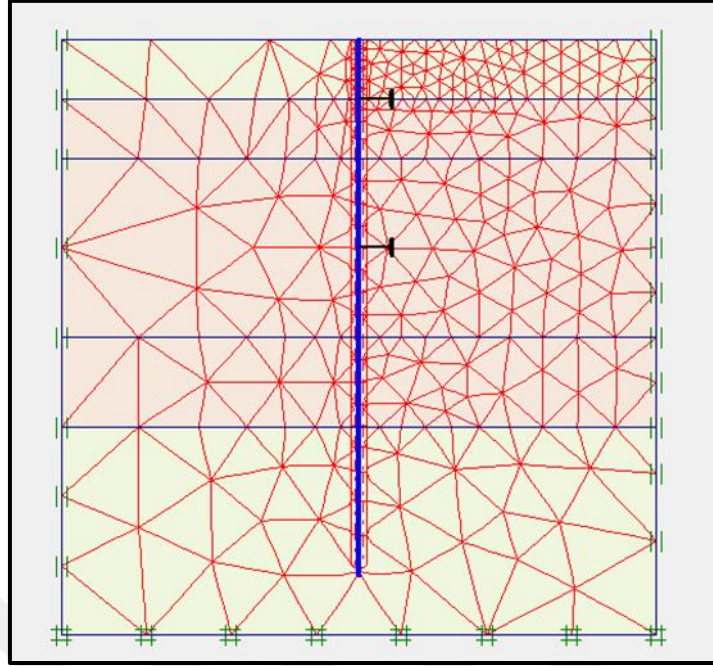
Böyle problemlerde u_1 ve v_1 bulunarak problem çözülür. Ancak öyle problemler olabilir ki, zemine oturan bir yüksek yapıyı iki boyutlu olarak çözümlemek yanlış

sonuçlara götürebilir. Binanın boyutları 20 m. x 30 m. ve yükseklik 30 m. gibi ise y yönündeki etkiler x yönündeki etkiler kadar önemli olabileceğinden her iki yöndeki gerilme ve yer değiştirmeleri bulmak gerekir.

3.1.2. Plaxis yazılımı

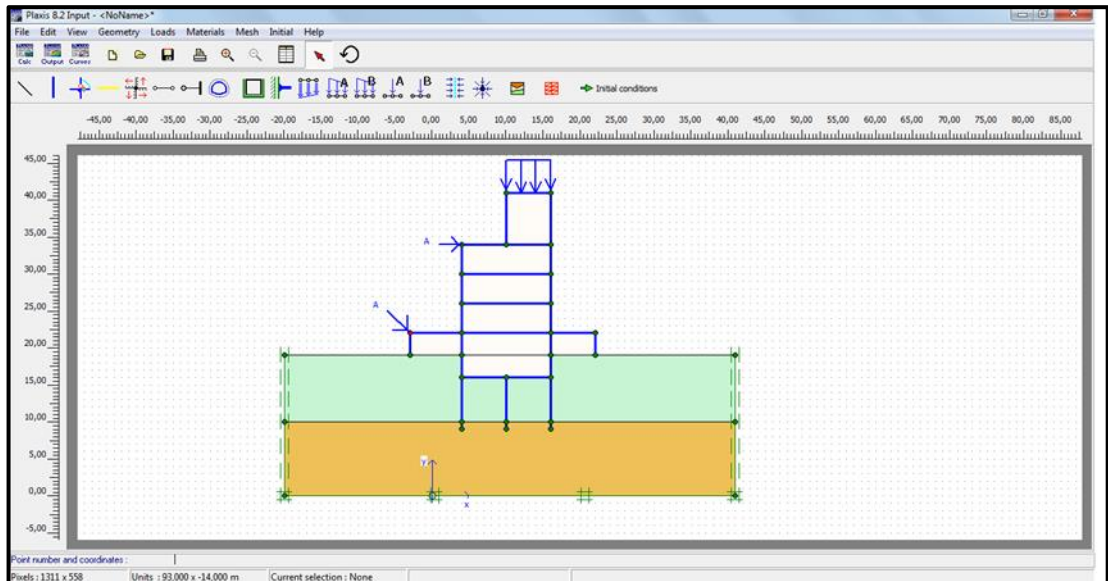
Plaxis yazılımı geoteknik problemlerinin analizi için geliştirilmiş bir sonlu eleman yazılımıdır. Problemler iki veya üç boyutlu olarak bir önceki başlıkta anlatıldığı gibi modellenir. Özellikle son 20-30 yılda zemin mekaniği ve geoteknik problemlerin çözümünde buna benzer programlar geliştirilmiştir. (Lusas, Geosoft vb.) Bu yazılımlardan bazıları sadece şev, kazı-dolgu problemlerinde öne çıkarken bazıları ise yüzeysel ve derin temellerin hesaplanmasında kullanılmaktadır. Plaxis programı ise statik-dinamik problemler başlığı altında şevler, aşamalı kazı ve dolgular, yüzeysel ve derin temeller, yapı-zemin etkileşimi problemleri ve tüneller gibi pek çok konuda çözüm getirebilmektedir.

Programda zemin katmanlar halinde tanımlanabilmekte, her zemin katmanında Elastisite modülü (E), poisson oranı (ν), kayma direnci açısı (ϕ), kohezyon gibi birçok parametre ile giril yapılmaktadır. Dolayısıyla sondaj loglarından gelen veriler programın data editörlerinde girilebilmektedir. Sonlu eleman yazılımlarında hesap hassaslığının en önemli ölçüsü sonlu eleman öğelerinin büyüklüğü, yani eleman boyutlarıdır. Ele alınan problem hassaslık derecesine göre veya aynı zemin ortamı içerisinde daha duyarlı sonuçlar alınması istenen yerlerde eleman boyutu ayarlanır (Meshing) (Şekil 3.5.).



Şekil 3.5. Plaxis zemin ortamında sonlu eleman ağı ve hassaslık

Bazen de dinamik analiz gibi problemlerde yapıya oranla zemin sınırları büyük tutularak dalga yayılımında sahte yansımaların önlenmesi amaçlanır. Örneğin 10 m. genişlikte bir makine temelinde analiz yapmak için problem sınırları 8-10 kat uzağa yerleştirilmelidir. Şekil 3.6.'da temel ile zemin derinlikleri arasındaki bırakılması önerilen uzaklık belirtilmektedir [30].



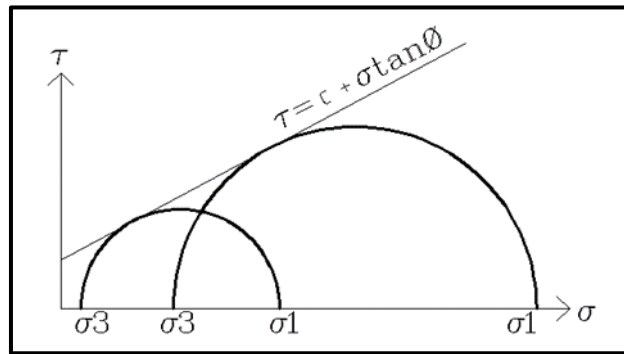
Şekil 3.6. Plaxis bilgi giriş ekranı

3.2. Plaxiste Zemin Davranış Modelleri

3.2.1. Mohr-Coulomb zemin modeli

Zemin problemlerinin çözümü gerilme odaklı olarak ele alınır. Yani bir zemin küp elemanı yatay ve düşey yöndeki gerilme zorları altındadır. Bunlar normal gerilmelerdir. Zemin prizmatik parçasının dışından etkileyen kayma gerilmeleri de bulunabilir. Gerek normal, gerekse kayma gerilmeleri etkisindeki bir zemin elemanının içinde normal gerilmeler ve kayma gerilmeleri oluşur. Dolayısıyla dış ve iç kuvvetler denge halindedir. Buna elastik denge koşulu denir. 1800'lü yıllarda Otto Mohr adlı Alman matematikçi bu gerilme halini incelemiş ve teorik olarak öne sürmüştür. Kendi adıyla anılan Mohr metodu günümüzde hala geçerliliğini korumaktadır.

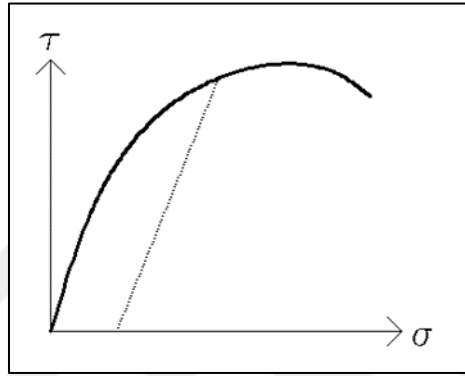
Plaxis programı düzlem zorlanma problemlerinde Mohr-Coulomb zemin modelini kullanmaktadır. Bu modelde zemin normal gerilmelere karşılık kayma gerilmeleri olarak denge durumunun tarifi yapılmaktadır. Üç eksenli hücre kesme deneyinde, yatay gerilme (σ_3) sabit tutulup, düşey gerilme (σ_1) artırılarak zemin örneği denenir. Bu deney farklı deviator gerilmeler ($\sigma_1 - \sigma_3$) altında tekrarlanırsa farklı gerilme daireleri elde edilir. Bütün dairelerin ortak teğeti akma doğrusu olup kırılma zarfı olarak tanımlanır (Şekil 3.7.) [2].



Şekil 3.7. Zeminde Mohr-Coulomb akma tarifi. (teğet)

3.2.2. Pekleşen zemin modeli

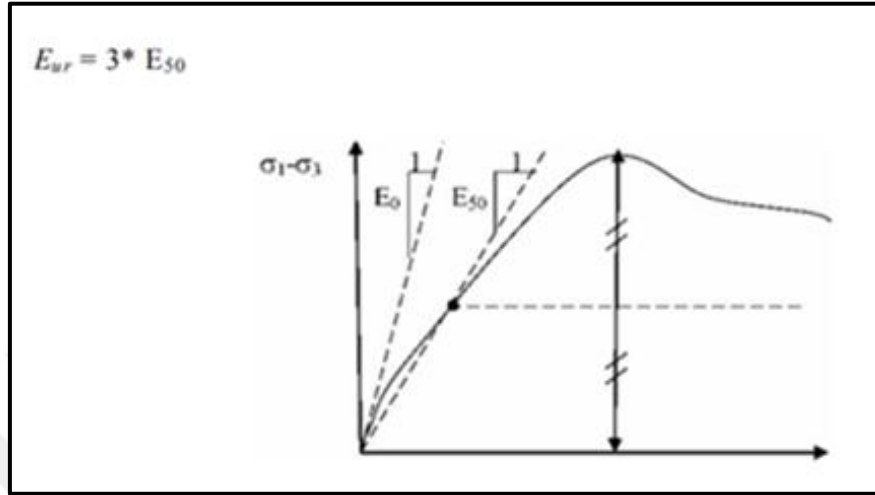
Kazı problemlerinde ise Mohr-Coulomb zemin modelinin kullanılması önerilmez. Bunun nedeni, kazı yapılan kesitlerde yatay gerilmenin (σ_3) bulunmamasıdır. Böyle problemlerde, pekleşen zemin (Hardening Soil) modelinin kullanılması önerilir. Zeminin bu modelde gerilme-deformasyon diyagramı (hiperbolik) bir şekilde, Şekil 3.8.'deki gibidir [2-30].



Şekil 3.8. Pekleşen zemin modelinde davranışın şekli

Zeminin elastoplastik davranışını tanımlayan model, pekleşen zemin (Hardening Soil Model) olup bu modelin Mohr-Coulomb modelinden farkı, akma yüzeyinin asal gerilme aralığı ile sınırlı olmayıp, plastik şekil değiştirmeye bağlı olarak genişleyebilmesidir. Üç eksenli basınç deneyi sonucunda elde edilen gerilme-şekil değiştirme diyagramı Mohr-Coulomb modelinde doğrusal olarak temsil edilirken Pekleşen Zemin modelinde hiperbolik olarak kabul edilmektedir, bu da gerçek zemin davranışına daha yakın sonuçların elde edilmesini sağlamaktadır. Buna ilaveten, zemin rijitliğinin, zemine etkiyen gerilme artışına bağlı olarak arttığı hesaba katılmakta, dolayısıyla bu modelde tüm rijitlikler belirli bir referans gerilme alınarak belirlenmekte, yazılım zeminde gerilme artışına bağlı olarak rijitlik artışını başka bir işleme gerek kalmaksızın dikkate almaktadır. Pekleşen Zemin modelinde, Mohr-Coulomb zemin modelinin tanımında detaylı olarak yer verilen Elastisite Modülü'ne ek olarak, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen üç ayrı Elastisite Modülü parametresi ile zeminin davranışı daha hassas bir şekilde tanımlanabilmektedir. Bu parametreler, üç eksenli basınç deneyinden elde edilen elastisite modülü E_{50} olup,

grafiksel tanımları Şekil 3.9.'da verilmiştir. Tekrarlı yükleme boşaltma deneyinden elde edilen Elastisite modülü (E_{ur}) olarak isimlendirilmekte olup, pratikte şu şekilde hesaplanabilmektedir [2].



Şekil 3.9. Zeminde deformasyon modülleri (E) nin değişik tanımları

$$E_{ur} = 3. E_{50} \quad (3.3)$$

3.2.3. Plaxis'te yeraltı su seviyesi tanımı

Zemin sondajından gelen yeraltı su seviyesi input bölümünde zemin katmanları içerisinde tanımlanır. Boşluk suyu basınç kontrolü bilgi girişi aşamasında grafiksel olarak yapılabilir.

3.3. Plaxis'te Zemin Katmanlarının Girilmesi ve Diğer Özellikler

Zemin kesitinin ele alınan parçası istendiği kadar yatay genişlik ve düşey yükseklikte tanımlanarak problemin arazideki duruma uyumluluğu sağlanır. Seçilen ve oluşturulan zemin tipleri (Kil, kum, silt, çakıl) bu zemin katmanları arasına sürüklenip zemin katmanları ayrı renklerde gösterilir. Problemin sınır şartları (sonlu eleman sınırları-boundaries) otomatik olarak tanımlanır. Araziyi eğimli olarak çizmek mümkün olup yapısal elemanları (kolon, kiriş, döşeme, temel, diyafram duvar) zemin yüzeyi üzerinde ve zemin yüzeyi altında plate elemanlar vasıtasıyla çizilebilir. Düzlem (plate) elemanların EA , EI gibi rijitlik parametreleri alt menülerde

girilip çubuklara atanır.

Programda statik analiz, dinamik analiz, konsolidasyon, ani oturma, şev analizi (Phi-c reduction) analizi, konuları ele alınıp çözülebilir. Düzlem zorlanma türü problemler yanında, eksenel simetri (axisymmetri) problemlerde de çözüm olanağı sağlar. Plaxis programı esas anlamda zemin-yapı etkileşimi için çok elverişlidir. Bunun dışında şev güvenlik analizi de yapılabilmektedir.



BÖLÜM 4. DEMİRYOLU KÖPRÜLERİ: WEIHERFELD KÖPRÜSÜ ÖRNEĞİ

Bu çalışmada Almanya'nın Karlsruhe kentindeki Weiherfeld demiryolu körüsünün 1905 tarihli çizimleri ve hesaplamaları ile ayrıca köprüde H. Güler tarafından yapılmış olan bilimsel çalışmalar sırasında köprünün çekilmiş olan fotoğrafları Ek 2 de verilmiştir [3-28-29].

4.1. Köprünün Özelliklerinin Tanıtımı

Hesaplamaları yapılacak olan Weiherfeld köprüsü Almanya'nın Karlsruhe şehrinde bulunan çelikten imal edilmiş, perçin bağlantılı bir demiryolu köprüsüdür. Köprü, 1908 yılında inşaa edilmiş olup 27 m genişliğinde, 5 m yüksekliğinde ve 54.90 m uzunluğundadır. Köprü üzerinde her iki yönde demiryolu trafiği olup dokuz hat bulunmaktadır. Dokuz hat üzerinde Almanya'nın Kuzey ve Güney yönüne doğru günde yaklaşık 560 yolcu ve yük treni ve ayrıca manevra trenleri hareket etmektedir. 2013 yılında köprünün rehabilitasyonu için proje çalışmaları başlatılmış ve çalışmalar 2014 yılının Ağustos ayında başlamıştır. Köprünün altyapısında ve üstyapısında yapılan rehabilitasyon çalışmaları tren trafiği altında yapılmış ve çalışmalar 2016 yılında tamamlanmıştır (Şekil 4.1.) [3].



Şekil 4.1. Weiherfeld Köprüsünün bir görünümü [3] [28]

4.2. Köprü Malzeme Özellikleri

Weierfeld köprüsü çağının gerektirdiği şekilde çelik malzemedan imal edilmiştir. Çelik birleşimleri Perçin bağlantılı olarak gerçekleştirilmiş, bütün kolon, kiriş, ara bölme elemanları ve çapraz düzenleri çok parçalı çubukların saç levhalarla beslenerek ve kombine edilerek perçinli birleşimlerle oluşturulmuştur. Kaynaklı birleşim tiplerine çok az yer verilmiştir.

Köprü, kolon-kiriş, kiriş-dayanma yapısı ve kolon-temel birleşimlerinde *ST44* çeliğinden yapılmış küresel düğüm nokta mesnetleri kullanılmıştır. Bu küresel mesnetler, sert çelikten imal edilmiş olan mesnet parçaları ile bulonlu ve geçmeli tarzda birleştirilmiştir. Perçin malzemesinin *ST37* kalitesinde (sünek nitelikli) olması olasıdır [3] [28] [29].



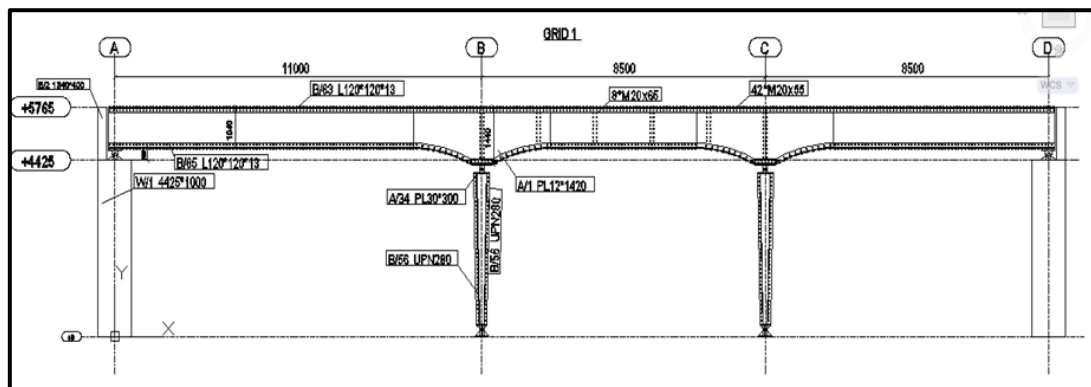
Şekil 4.2. Köprü birleşim tipi örneği [3] [28]

4.3. Köprü Fiziksel Özellikleri

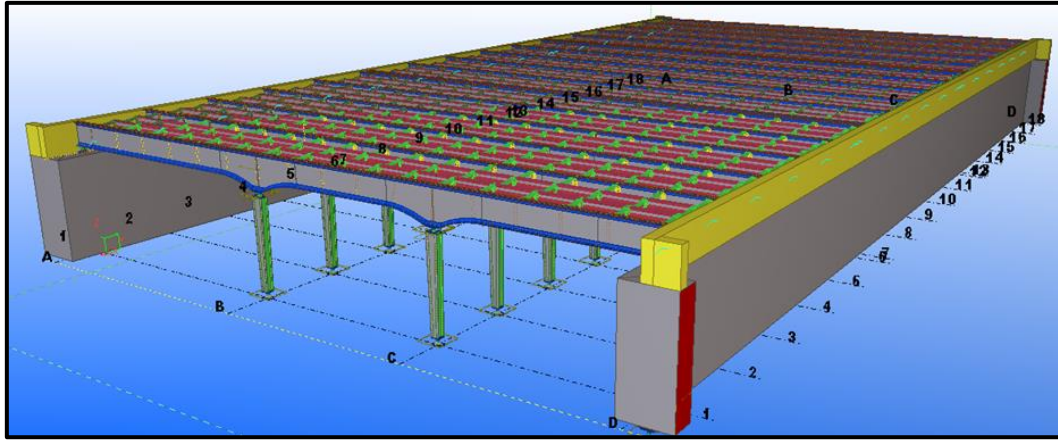
Weierfeld köprüsü 3 adet açıklığa sahip olup açıklıklar soldan sağa doğru; 11.00 m, 8.50 m ve 8.50 m şeklindedir. Köprüdeki orta ayaklarda yaklaşık sistem yüksekliği 4.50 m mertebesindedir. Köprü enine doğrultuda 18 adet açıklığa sahip olup bu açıklıklar 3 m. de bir düzenlenen kolonlar, makaslar ve kirişlerle geçilmiştir. Bütün kolon ayakları alttan ve üstten mafsallı (hinge) olarak çalışmaktadır. Dikkat çeken bu konunun açıklamasında fayda vardır: Buna göre köprü çalışma doğrultusunda ki (tren hat doğrultusu) dört mesnetten ilk ve son mesnet sabit mafsallı orta mesnetlerse kayıcı tarzda görünmektedir. Ancak köprü kirişleri sürekli kiriş tarzında

düzenlenmiştir. Orta ayak kolonları statikçe pandül ayak (pandulum: sarkaç) formunda olacak şekilde inşa edilmiştir. Orta kolonların hem alttan ve hem de üstten mafsallı olması ilk bakışta stabil olmayan bir görünüm sergilese de, mafsallı birleşimlerin yatay kayma (kesme) kuvvetlerini karşılama kapasiteleri bulunmaktadır. Bu durumda ara ayak düzenleri düşey normal kuvvet taşıma kapasitesine sahiptir. Bu tarz bir taşıma düzeninde tren geçişlerinde köprü makas elemanları elastik olarak çökerek kolon başlarında dönecek, ancak yüksek kesme kapasitesi ile sistem stabilitesi karşılanacaktır. Yine köprünün ilk ve son çelik mesnetleri betonarme dayanma yapılarına (retaining wall) oturarak tepkileri zemine aktarmaktadır. Betonarme kenar dayanma yapılarının enleri yaklaşık 1.1 m mertebesindedir.

Sistemdeki kolon ve dayanma yapıları temellerinin genişlikleri yaklaşık 3.0 m dir. Köprü üst yapısında demiryol platformu çelik yapıdan üste doğru çıkılarak şöyle sıralanmaktadır: Çelik yapı üstünde 15 cm kalınlıkta sinüzoidal formlu betonarme bir plak olup, onun üzerinde ise 50-60 cm kalınlıkta balast tabakası serilmiştir. Balast tabakası, travers ve rayları taşımaktadır. Balast tabakasının bu sistemde bulunması, dinamik tren yüklerinin stabilize edilerek daha rijit olan betonarme plaklara ve çelik köprüye aktarılmasında sönümleyici özellik göstermesi sağlamaktadır (Şekil 4.3. ve Şekil 4.4.).



Şekil 4.3. Köprünün çelik programında tasarlanan modeli



Şekil 4.4. Köprünün çelik programında modellenen perspektif görüntüsü

4.3.1. Öz (sabit) yükler (G+S)

Bu başlıkta köprünün çelik kısmının ağırlıkları, Çelik üstünde sırasıyla yükleri aktaran betonarme plak tabakası, balast tabakası, travers ve ray yükleri ele alınacaktır. Bu yükler değişmez sabit yükler olup köprünün üzerinde kalıcı olarak etkir. Bu yüklerin analizi Tablo 4.1.'de verilmiştir.

Tablo 4.1. Yük analizi tablosu

Yüklerin tanımı	Yük Değeri (kN/m ²)
Ray ve travers yükü	1.20
Balast tabakası yükü (0.40x20)	8.00
Betonarme plak zati ağırlığı (0.20x25)	5.00
Çelik yapı zati yükü	2.20
Kar yükü (0.6)	0.60
Toplam (G+S)	17.00

Yükün birim genişlik başına düşen değeri $17.00 / 1.00 = 17.0$ kN/m alınacaktır.

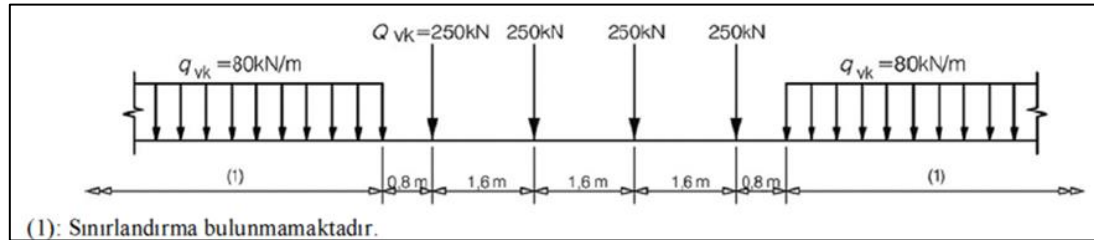
Yükün simgesi (G+S) olarak tanımlanmıştır.

4.3.2. Hareketli yükler (Q: Tren hareketli yükü)

Bu aşamada hareketli yük köprü üstündeki trafik yükünü tanımlamaktadır. Bu yük geçici bir etkiye özelliğine sahiptir. Demiryolu köprülerinin yükleme koşulları ile ilgili ayrıntılar EN 1990 numaralı standartta verilmiştir. Demiryolu köprülerine etki

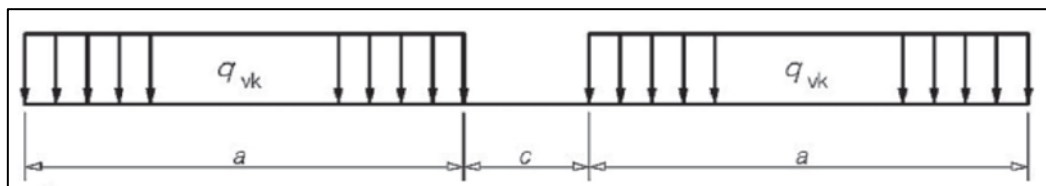
eden yükler; ölü yükler, hareketli yükler, dinamik yükler, yatay yükler, tren geçişlerinden kaynaklanan aerodinamik kuvvetler ve trenlerin köprülerde raydan çıkmaları sonucu oluşan kuvvetler gibi ana başlıklarda incelenir [4]. Demiryolu köprüleri üzerindeki hareketli yük modelleri EN 1991-2’de tanımlanmıştır. Bu standarda göre analizlerde önemli olan beş yükleme modeli aşağıda sıralanmış ve her bir modelde dikkate alınan yüklemeler Şekil 4.5., Şekil 4.6., Şekil 4.7. gösterilmiştir. Demiryolu yükleme modelleri; elastik yatağa oturan kiriş, tek ve çok açıklıklı kiriş prensipleri dikkate alınarak geliştirilmiştir [4-5-6-7-8-9-10-11].

- Yük Modeli 71 (Sürekli köprülerde yük Modeli SW/0): Ana demiryolu hatlarında normal demiryolu trafiğini tarif eder (Şekil 4.5.).
- Yük Modeli SW/2: Ağır yüklerin taşındığı demiryolu hatlarını ifade eder (Şekil 4.6.).
- Yük Modeli HSLM: 200 km/sa hızı aşan yolcu trenlerinin yükleme koşullarını ifade eder (Şekil 4.7. ve Şekil 4.8.).
- Yüksüz tren yük modeli: Yüklenmemiş trenlerin etkisini ifade eder. Düşey yönde 10 kN/m değere sahip yayılı yük hesaplarda dikkate alınır.



Şekil 4.5. Yük Modeli 71 ve düşey yükler [4-5-6-7-8-9-10-11]

Yük modeli 71’de 250 kN olarak verilen yükler tren dingil yüklerini, 80 kN/m olarak verilen yüklerse, istatistiksel araştırmalarla belirlenmiş demiryolu üst yapı yükleridir.



Şekil 4.6. Yük Modeli SW/0 ve SW/2 [4-5-6-7-8-9-10-11]

Tablo 4.3. Yük modeli SW/0 ve SW/2 de yükleme değerleri [4-5-6-7-8-9-10-11]

Tren Tipi	Orta vagon sayısı	Vagon uzunluğu	Boji aks aralığı	Tekil yük
	N	D (m)	d (m)	P (kN)
A1	18	18	2.0	170
A2	17	19	3.5	200
A3	16	20	2.0	180
A4	15	21	3.0	190
A5	14	22	2.0	170
A6	13	23	2.0	180
A7	13	24	2.0	190
A8	12	25	2.5	190
A9	11	26	2.0	210
A10	11	27	2.0	210

Bu alışmada Yukarıda ayrıntıları verilen yükleme tiplerinden “Yük Modeli 71” kullanılacaktır. Çalışmada hangi yk tipinin alınacağı uzmanların görüşleri dikkate alınarak belirlenmiştir.

BÖLÜM 5. WEIHERFELD DEMİRYOLU KÖPRÜSÜ ANALİZ VE SONUÇLAR

5.1. Zemin-Yapı Etkileşimli Analiz ve Hesaplara Giriş

Hesaplama şekli köprü tipi ve dış yükler aynı olmak kaydıyla iki tip zemin üzerinde incelenecektir. Bu zeminlerden ilki iri daneli zemin başlığı altında kumlu zeminlerde davranış, ikincisi ise ince daneli zeminler başlığı altında killi zeminlerde davranış olarak ele alınacaktır. Buradaki zeminlerde gözetilen fark kohezyonsuz ve kohezyonlu zeminler olarak da tariflebilir.

5.1.1. Kumlu zeminlerin özellikleri

Bilindiği gibi kumlu zeminler görece iri daneli olup maksimum dane çapı 2 mm olarak tanımlanır [34]. İçinde kil-silt bulunabilir. Kohezyona sahip olmadıkları varsayılır. Yani daneler birbirine yapışmaz. Kayma dirençleri danelerin birbirine sürtünmesi (friction) esasına göre tanımlanır. Danelerin su emmesi mümkün olmayıp yüksek bir hidrolik iletkenliğe (permeabilite) sahiptir. Genellikle bulundukları yerler denizel kaynaklı olur veya alüviyal yataklarda depolanırlar. Doğal durumda tam temiz olarak bulunmaları pek mümkün değildir. Sıkı olmaları durumunda sıvılaşma eğilimi göstermezler. Bina temellerinde kullanılmasında taşıma gücü bakımından güvenilir performans sergilerler. Kumun kayma direnci parametreleri genellikle (ϕ) kayma direnci açısından kaynaklanmaktadır. Kesme kutusunda düşey (N) normal gerilmesi etkinken yatay (Q) makaslama gerilmesi altındaki zeminin gösterdiği direnç kumun kayma mukavemeti tanımı olarak belirir.

$$\tau = \sigma \cdot \tan(\phi) \quad (5.1)$$

Bu kabulde tariflenen kumun kayma direnci danelerin sıkı ve gevşek olmasına göre

farklılıklar gösterir. Sıkı (boşlukların az olması) kumlarda direnç bir doruk noktasına çıktıktan sonra danelerin birbiri üzerinden aşma hareketi ile aşağıya inmekte en sonunda da bu iniş yataylaşmakta ve kalıcı (reziduel) olarak sonlanmaktadır. Buna kalıcı direnç de denilir. İnce danesi fazla olan kumlarda suyun varlığı (doygun kum) özellikle depremesel dış etkilerle stabilite sorunlarına yol açabilmektedir. Özellikle deprem gibi tekrarlı (cyclic) yükler, kum daneleri arasında ani artan boşluk suyu basıncının danelerin kararsız olarak davranmalarına ve sürtünme dirençlerini önemli ölçüde yitirmelerine neden olmaktadır. Buna sıvılaşma (liquefaction) denilir. Bu nedenle üniform ve çok ince taneli kumlarda zeminde sıvılaşma analizi yapmadan temel boyutlandırması yapılmamalıdır. Buna göre kumlu zeminlerde güvenlik derecesinin kumun gevşek ya da sıkı olmasına bağlı olduğu söylenebilir. Gevşek kumlara rastlandığında dışardan titreşim uygulayarak danelerin sıkılaştırılması iyileştirme seçeneklerinden birisidir.

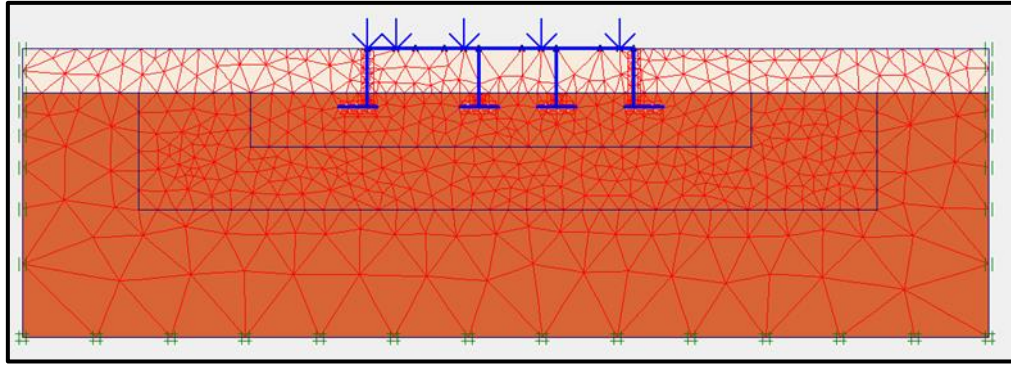
5.1.2. Kumlu zemin ortamında köprü modelinin kurulması

1. Hesap Adımı: Köprü tamamen kumlu bir zemin ortamına oturtulmuştur. Model boyutları yatayda 100 m ve düşeyde 30 m olarak seçilmiştir. Temel kuma 1.5 m olarak gömülüdür. Sadece köprünün sağ ve sol taraflarındaki istinat duvarı yüksekliğince dolgu (filling) ile doldurulmuştur. Bu dolgunun temel taşıma gücüne etkisinin az olduğu kabul edilmiştir. Bu bağlamda kumlu temel zemininin indeks özellikleri Tablo 5.1.'de verilmiştir.

Tablo 5.1. Modeldeki zemin ve yapı özellikleri tablosu

Parametreler	Derinlik ve Zemin-Köprü yapısı özellikleri				
	0-4.50 m.	0 - 6.00 m.		-4.50- - 30 m.	> -30 m.
Zemin adı	Dolgu	Çelik Köprü Yapısı (Kolon/kiriş)	Betonarme yapılar (Temel/duvarlar)	Kum	Taban Kayası
Simge	Filling	Çelik Yapı	BA	SP	Taban kayası
Malzeme modeli	Pekleşen Zemin	Lineer Elastik	Lineer Elastik	Pekleşen Zemin	Lineer Elastik
Malzeme tipi	Drenajlı	-	-	Drenajlı	Drenajsız
Birim hacim ağırlık $\rho_{\text{doğru}}$ (kN/m ³)	20	78.5	24	20	27
Power (m)	0,5	-	-	0,5	-
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	20.000	-	-	40.000	-
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (kN/m ²)	19.310	-	-	40.000	-
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (kN/m ²)	45.000	-	-	90.000	-
c'_{ref} (kN/m ²)	10	-	-	1.0	-
ϕ (derece)	20	-	-	38	-
Kabarma açısı Ψ (deg.)	0	-	-	10	-
Possion oranı ν	0.20	0.25	0.25	0.20	0.10
P_{ref} (kN/m ²)	100	-	-	100	-
K_0	0,658	-	-	0,384	-
R_{int}	0,65	-	-	0,67	-
Eksenel rijitlik EA (kN/m/m)	-	Kolon	Kiriş	Duvar	Temel
		4.720.000	11.030.000	7.500.000	28.000.000
Eğilme rijitliği EI (kN/m ² /m)	-	8.860	11.250	1.000.000	2.333.000
Boyut (m/cm/mm)	-	H profil 250/250	I profil 300/1200	1.265/1.00	1.00/1.00

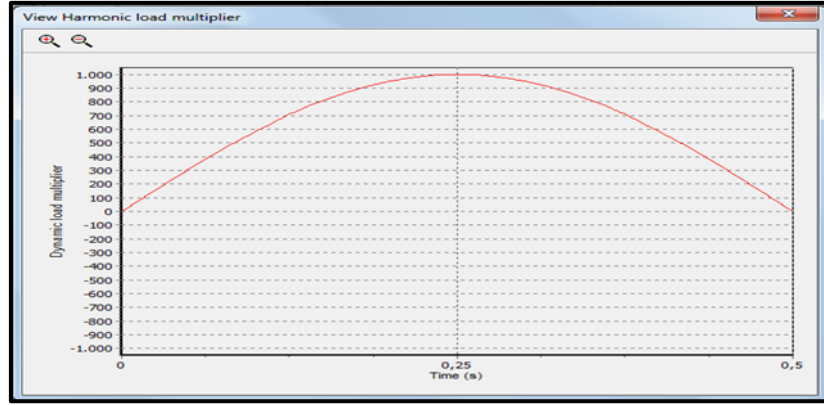
Yukarıda özellikleri tanımlanan zemin malzemeleri ve yapı elemanları karakteristik özellikleri modelde girilen özelliklerdedir. Tablodan da anlaşılacağı üzere deneydeki kumlu zemin yaklaşık 30 m kalınlığındadır. Fakat kum zemin katmanı belli aralıklarla sonlu elemanlarının sıklığı bakımından farklılıklarla tanımlanmıştır. Burada toplam kalınlığı 25,5 m olan kum tabakası sonlu eleman ağ sıklığı bakımından üç bölüme ayrılmış, temelinde içinde bulunduğu ilk 12,0 m'si orta (medium) sıklıkta daha derindeki kum tabakası ise kaba (coars) sıklıkta elemanlara ayrılmıştır. 0,00-4,50 m. derinliklerdeki dolgu tabakası da orta (medium) sıklıkta girilmiştir. Şekil 5.1.'de kumlu zemin ortamındaki köprünün modeli gösterilmektedir.



Şekil 5.1. Sonlu eleman ağında sıklık farklılığının belirtilmesi

Köprünün genel yapısı 3 açıklıklı ve tek katlıdır. Model sınırları dikey ve yatay olarak Şekil 5.1.'de gösterilmektedir. Bu sınırlar çalışılan zemin kesidinin yatay ve dikey yerdeğiştirmelerini kısıtlamak amacıyla oluşturulur. Bu açıklamalardan sonra köprünün yükleme tiplerinin nasıl olacağı şöyle açıklanabilir. Öncelikle köprü kendi öz ağırlığı ve üstündeki kaplama tabakaları ile yüklenecektir. Öz ağırlık yükleri çeliğin kendi yalın ağırlığıdır. Kaplama ağırlıkları ise beton, balast ve raylardan ve bundan başka kar yüklerinden oluşan yük tipidir. Daha önce 4.3.1 de tanımlanan öz yükler bu yüklerdir. Öz yüklerin şiddeti 17 kN/m ' dir. Ayrıca bu yükler plaxis programı aşamalar bölümünde "KÖPRÜ YAPIMI" ve "KÖPRÜ ÜST YAPISI" aşamaları olarak gösterilmektedir.

Hareketli (dinamik) yükler bölüm 5.2 başlığında belirtilen yüklerdir. Hareketli yükler ise dinamik yük olma özelliğini zamana bağlı olarak etkimesinden almaktadır. Bu yükler üst yapı üstünde etkiyen tren yükleridir. Yapılan araştırmalarda trenlerin ortalama 90 km/sa hızla köprü üzerinden geçtiği belirlenmiştir. Yük modeli 71 standardında da belirtildiği gibi bu yükün şiddeti 1.000 kN (4×250) değerindedir. Basitleştirme amacıyla ve sistemin yük etki sonuçlarında kayda değer bir değişikliğe yol açmayacağı için yükler birleştirilmiştir. Bu 1.000 kN 'luk yük, 16 m. sonra yani diğer dingil aks mesafesine kadar tekrar etki ettirilecek şekilde yükler girilmiştir. Yine dinamik yükler 4 aşamada köprüye etki ettirilmiştir. Dinamik yükler her bir seçilen noktaya zamana bağlı olarak etkiyen türdendir. Yani ilk yükleme noktasında (1. aks kolonu üstünde iken) yük başlangıç anında sıfır mertebesinde iken $0,25 \text{ sn}$ de 1000 kN ' a çıkmakta ve $0,5 \text{ sn}$ sonunda tekrar sıfıra düşmektedir. Bu yüklemenin grafiği Şekil 5.2.'de verilmiştir.

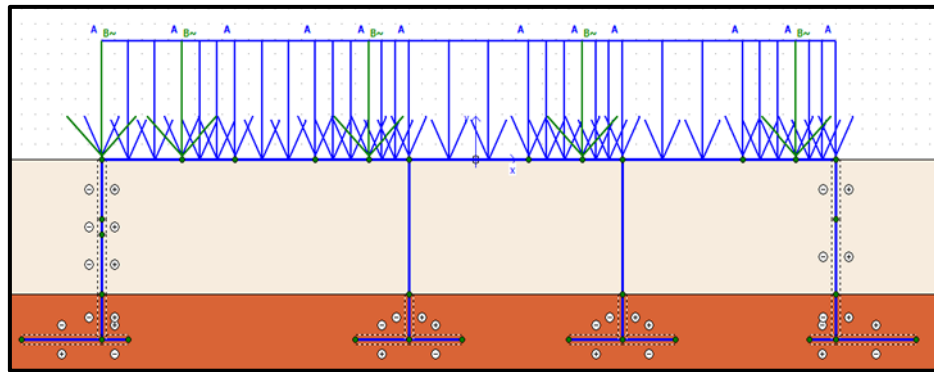


Şekil 5.2. Dinamik yükün değişimi.

4 aşamada girilen bu dinamik yükler, trenin köprü üzerindeki 4 konum anını temsil etmektedir. Bunlarda sırasıyla şöyle tariflenebilir.

1. aşama: Trenin köprüye girdiği ilk an, tren 1. aks kolonu üzerindedir.
2. aşama: Trenin ilk tekerleğinin köprünün üstünde başlangıçtan 10 m uzaktadır.
3. aşama: Trenin ilk tekerleğinin köprünün üstünde başlangıçtan 18 m uzaktadır.
4. aşama: Trenin ilk tekerleğinin başlangıçtan 24 m uzakta ikinci tekerlekse başlangıçtan 4.5 m uzaklıktadır. (trenin köprü üstünde tamamen olması)

Bunlar Plaxis aşamalar (fazlar) kısmında DYN1, DYN2, DYN3 ve DYN4 simgeleriyle gösterilmektedir. Yüklerin girildiği ekran görüntüsü Şekil 5.3.'de verilmiştir.



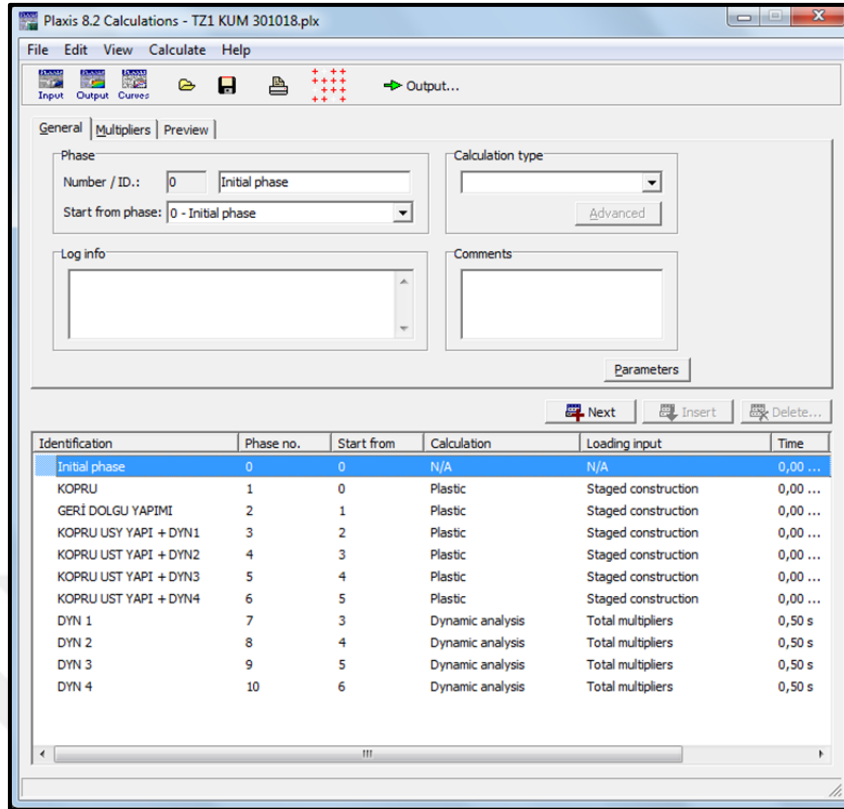
Şekil 5.3. Köprüye etkiyen yükler.

Burada, ‘‘A yükleri’’, köprü ve üst yapı yükleri, ‘‘B ~ ‘‘ yükleri ise dinamik (tren) yüklerdir. Yeraltı suyu tanımı olarak bilgi girişı bölümünde -4,50 m de tanımlanmıştır. Bu tanımlanan su seviyesine göre boşluk suyu basınçları ekranda test edilmiş ve bunun -247 kPa olduğu görülmüştür. Zemin başlangıç efektif gerilmeleri bilgisi ekranında girilmiş ve bu değerde 250 kPa olduğu görülmüştür.

İlk bilgi girişlerinden sonra aşamaların tanımlandığı hesapla (calculate) kısmına geçilmiştir. Hesap kısmında öncelikle yukarıdaki sözü edilen başlangıç koşulları ve yükleme halleri sırasıyla faz satırlarında girilmiştir. (Şekil 5.4.) Bilindiği gibi ilk işlem aşaması başlangıç halidir, yani arazinin ve yeraltı suyunun bulunduğu doğal jeolojik kesittir. Bu aşamada sisteme müdahale edilemez. Hesaplarda sırasıyla aynı inşaat yapımında yapılan sıra gibi aşamalar bulunmaktadır. Bu aşamalar aşağıda sıralanmıştır:

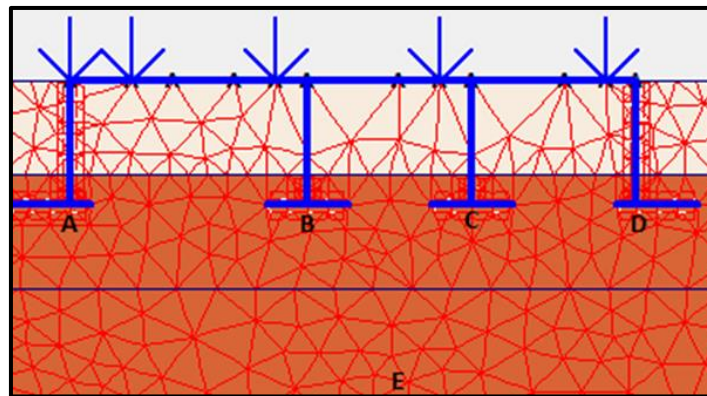
- 1- Başlangıç aşaması (initial phase)
- 2- Köprü yapım aşaması
- 3- Geri dolgu yapılması
- 4- Köprü üst yapısı yapılması + 1. dinamik yük ataması
- 5- Köprü üst yapısı yapılması + 2. dinamik yük ataması
- 6- Köprü üst yapısı yapılması + 3. dinamik yük ataması
- 7- Köprü üst yapısı yapılması + 4. dinamik yük ataması
- 8- 1. Dinamik yük halinde köprü ve zemin hesabı
- 9- 2. Dinamik yük halinde köprü ve zemin hesabı
- 10- 3. Dinamik yük halinde köprü ve zemin hesabı
- 11- 4. Dinamik yük halinde köprü ve zemin hesabı

şeklinde belirtilebilir. Bu dataların girildiği ekran görüntüsü Şekil 5.4.’de verilmiştir.



Şekil 5.4. Hesap Aşamalarının tanımlandığı girdi ekranı

Hesap aşamaları tanımlandıktan sonra zemin temel sisteminde inceleme yapılacak olan noktalar (eğri noktaları) seçilecektir. Eğri çizme noktaları (Curve Points) genellikle yapının temel altlarında ve temelden daha derinlerdeki zemin noktalarında seçilebilir. Bu noktalar deplasmanların kontrolü için seçilen noktalardır. Bu çalışmada seçilen noktalar köprü temel tabanlarının orta noktaları ve temelden 10 m daha derindeki bir zemin bölgesi olacaktır. Bu noktalar A, B, C, D ve E noktaları olarak adlandırılmıştır (Şekil 5.5.).



Şekil 5.5. Eğri çizilecek noktalar

5.1.3. Hesapların yapılması ve sonuçlar

Bu işlemlerden sonra yazılım çalıştırılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu köprü yüklemesinde her aşamada köprü ve zeminin nasıl davrandığı maddeler halinde açıklanmıştır.

1. Faz: Köprü yapım aşaması hesap sonucu:

Bu aşamada A, B, C, D ve E noktalarında zemin ve yapı deplasmanları beklendiği gibi düşey deplasman yapmıştır. Bu deplasmanlar sırasıyla A noktasında 17,18 mm, B noktasında 20,77 mm., C noktasında 17,56 mm , D noktasında 13,95 mm ve E noktasında 8,85 mm. olarak belirmiştir. Verilen elastik yer değiştirmeler kabul edilebilir düzeylerdedir. Yine bu hat üzerindeki efektif gerilmeler sırasıyla $\sigma'_A = 103$ kPa, $\sigma'_B = 98,41$ kPa, $\sigma'_C = 85,22$ kPa, $\sigma'_D = 72,98$ kPa ve $\sigma'_E = 125,54$ kPa olarak gerçekleşmiştir.

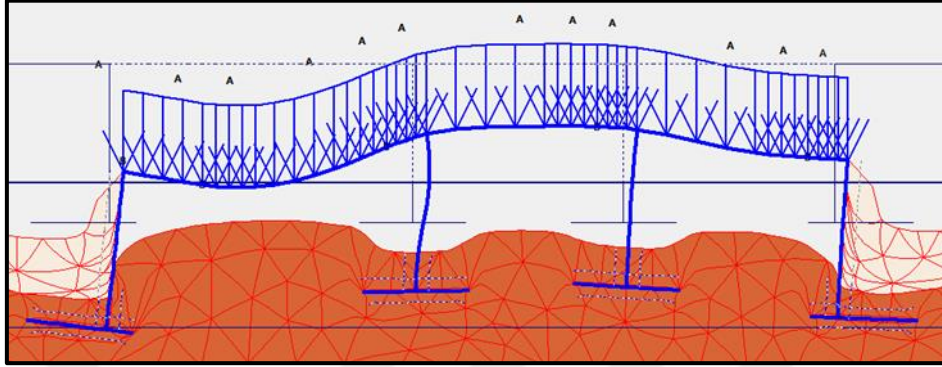
2. Faz: Geri dolgu yapım aşaması hesap sonucu:

Bu aşama köprü yapımından sonraki geri dolgu yapım aşamasıdır. Yaklaşık 4,5 m. kalınlıkta bir dolgu yapılmıştır. Bu aşamadaki yer değiştirmeler sırasıyla A noktasında 40.97 mm, B noktasında 24.88 mm, C noktasında 24.06 mm, D noktasında 34.82 mm. ve E noktasında 12.93 mm olarak belirmiştir. Çıkan yerdeğiştirmeler kabul edilebilir düzeylerdedir. Bu fazdaki temel altı efektif gerilmeleri $(\sigma'_A, \sigma'_B, \sigma'_C, \sigma'_D, \sigma'_E) = (131.50, 86.53, 87.20, 110.02, 125,12)$ kN/m² olarak belirmiştir.

3., 4., 5., 6. Fazlar: Köprü üst yapısının inşası hesap sonucu

Burada çelik köprü ve geri dolgunun yapılmasını takiben köprü üstündeki yol üst yapısı unsurları yüklemesi yapılmıştır. 3, 4, 5 ve 6 fazları aynı yükleme olup sadece dinamik yük atamaları farklarını gözetmek için 4 faz ile atama yapılmıştır. Buna göre A, B, C, D ve E noktalarındaki yer değiştirmeler vektörel gösterimle $(\delta_A, \delta_B, \delta_C$

δ_D, δ_E) = (41.85, 25.33, 24.21, 35.65, 13.07) mm. olarak belirlemiştir. Çıkan yerdeğiştirmeler kabul edilebilir düzeylerdedir. şekil 5.6.'da bu fazlara ilişkin deforme olmuş sistem şekli verilmektedir.

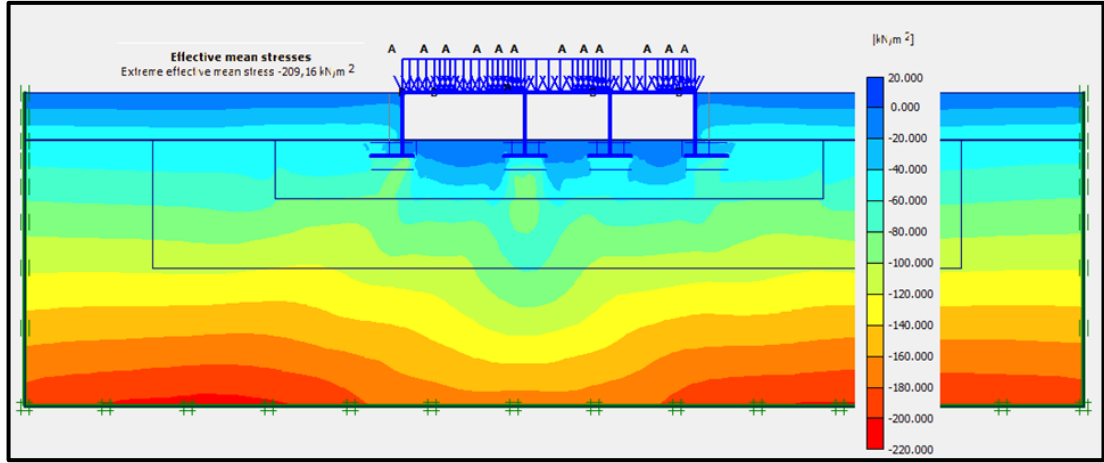


şekil 5.6. Köprü, geri dolgu ve köprü üst yüklemelerinin sonucu oluşan deforme olmuş hal

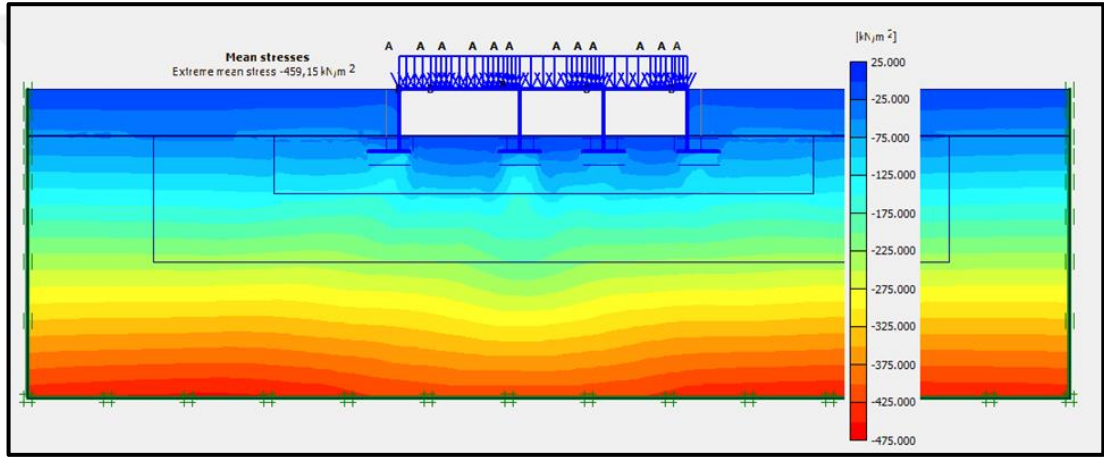
Bu işlem fazında baz alınan noktalardaki efektif gerilmeler vektörel gösterimle ($\sigma'_A, \sigma'_B, \sigma'_C, \sigma'_D, \sigma'_E$) = (144.20, 102.92, 84.12, 120.86, 126.48) kN/m² olarak belirlemiştir.

7. Faz: Köprü dinamik yüklemesi (DYN1)

Bu fazda köprü inşası, geri dolgular ve köprü üst yapı inşaatı tamamlanmış, köprü üzerinde 1. Dinamik hal olarak DYN1 yüklemesi yapılmaktadır. Yani köprü üzerinden tren geçişinin ilk aşamasıdır. Yük 1. aks kolonun üzerindedir. Bu aşamadaki yer değiştirmeler A, B, C, D ve E noktalarındaki vektörel gösterimle ($\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E$) = (71.05, 16.64, 5.71, 2.39, 11.02) mm. olarak belirlemiştir. Buradaki elastik yer değiştirmeler deplasmanlar sıfırlanarak elde edildiği unutulmamalıdır. Sistemde önceden bir deplasman olmadığı kabul edilerek en baştan bu ana kadar ne kadar deplasman oluşacağını gözlemlemek amacıyla elde edilmiştir. Dolayısıyla aslında bu deplasmanlardan bir önceki statik hal deplasmanlarının farkını almak rölatif deplasmanları verecektir. Örneğin bu yüklemede en kritik nokta olan A noktasında beliren rölatif deplasmanın $\delta_z = 29.20$ mm (71.05- 41.85) olacağı görölür. Bu işlem fazında baz alınan noktalardaki toplam gerilmeler vektörel gösterimle ($\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E$) = (225.25, 129.92, 90.55, 136.08, 217.55) kN/m² olarak belirlemiştir. şekil 5.7.'de bu fazlara ilişkin deforme olmuş sistem şekli



Şekil 5.11. DYN2 fazı efektif gerilme diyagramı



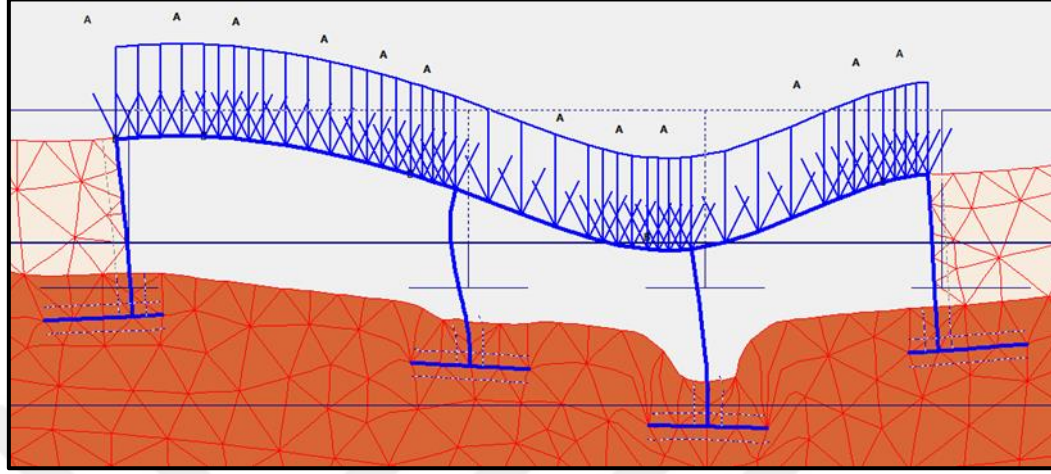
Şekil 5.12. DYN2 fazı toplam gerilme diyagramı

9. Faz: Köprü dinamik yüklemesi (DYN3)

Bu fazda yine köprü inşası, geri dolgular ve köprü üst yapı inşaatı tamamlanmış, köprü üzerinde 3. Dinamik hal olarak DYN3 yüklemesi yapılmaktadır. Yani köprü üzerinden tren geçişinin 4. aşamasıdır. Yük köprü üzerinde 18. m. dedir. Bu aşamadaki yer değiştirmeler A, B, C, D ve E noktalarındaki vektörel gösterimle (δ_A , δ_B , δ_C , δ_D , δ_E) = (11.10, 27.70, 47.82, 22.30, 29.10) mm olarak belirlemiştir. Yerdeğiştirmeler yine kabul edilebilir aralıklarda kalmışlardır. Burada da en büyük mutlak yer değiştirme C noktasındadır.

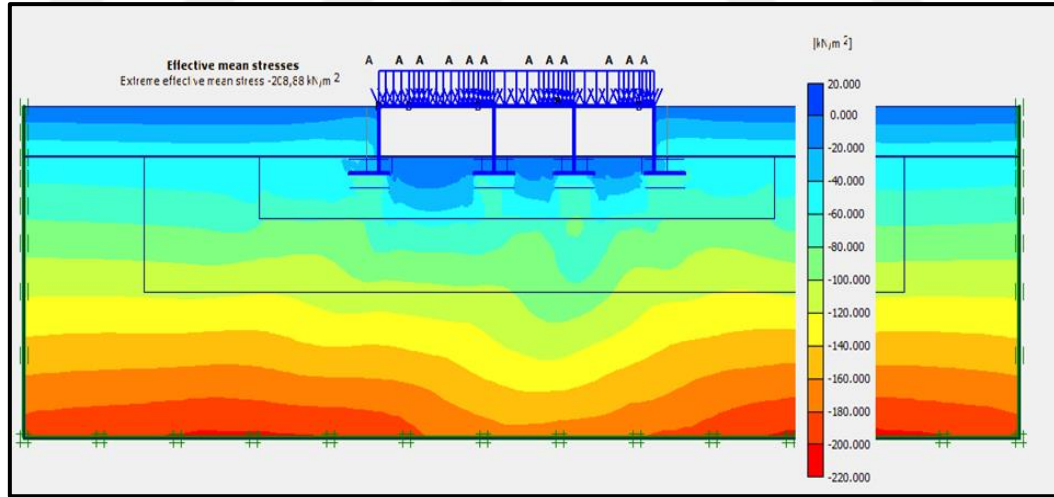
Bu işlem fazında baz alınan noktalardaki toplam gerilmeler vektörel gösterimle (σ_A , σ_B , σ_C , σ_D , σ_E) = (158.90, 122.86, 105.28, 144.28, 215.85) kN/m² olarak belirlemiştir.

Şekil 5.13.'de bu faza ilişkin deforme olmuş sistem şekli verilmektedir. Deformasyon şeklinde, 3. aks kolonunun en fazla çöktüğü açıkça görülmektedir.

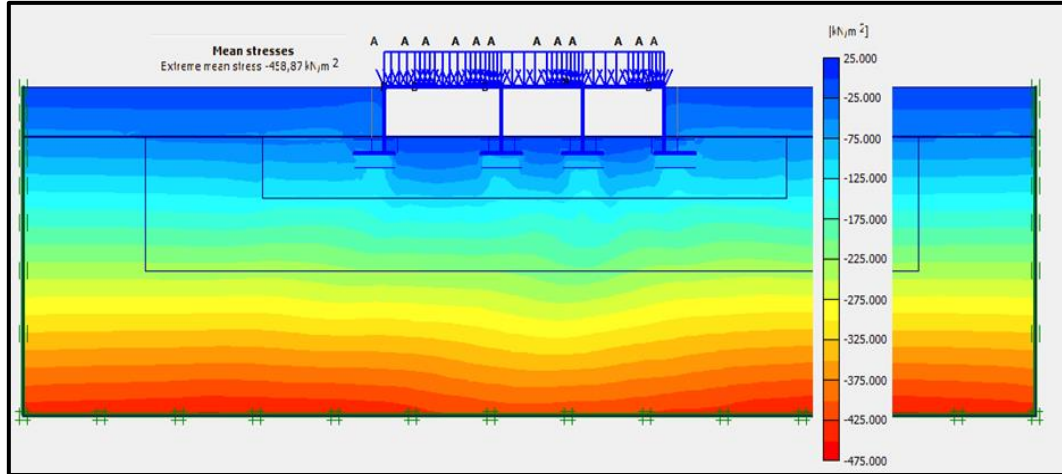


Şekil 5.13. 3. Dinamik zaman anındaki köprü deforme olmuş hali

DYN3 Fazına ait Efektif Gerilme ve Toplam Gerilme Diyagramları Şekil 5.14. ve Şekil 5.15.'de verilmiştir.



Şekil 5.14. DYN3 fazı toplam efektif gerilme diyagramı



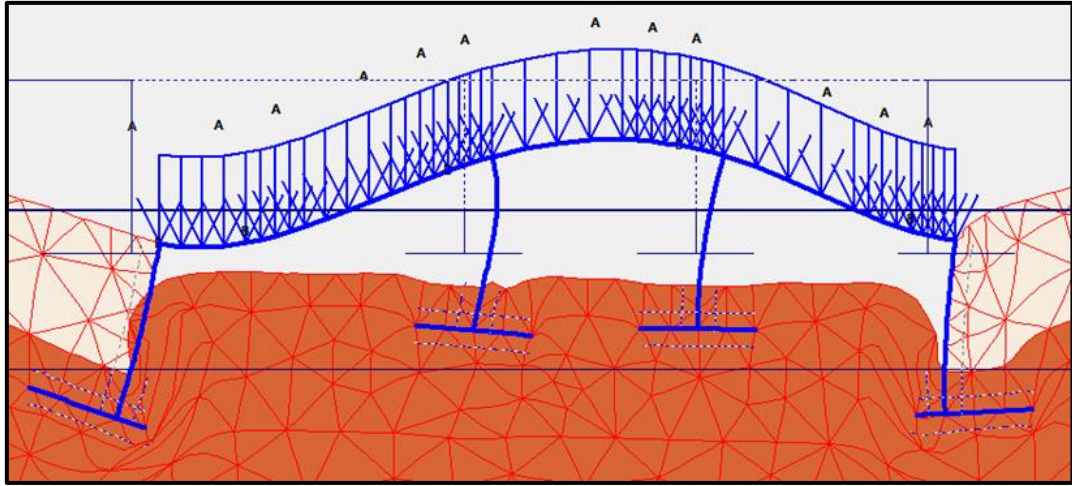
Şekil 5.15. DYN3 fazı toplam gerilme diyagramı

10. Faz: Köprü dinamik yüklemesi (DYN4)

Bu fazda 4. Dinamik hal olarak DYN4 yüklemesi yapılmaktadır. Yani köprü üzerinden tren geçişinin 4. aşamasıdır. Yük köprü üzerinde ön tekerlek 26 m de arka tekerleğe 4 m.‘dedir.

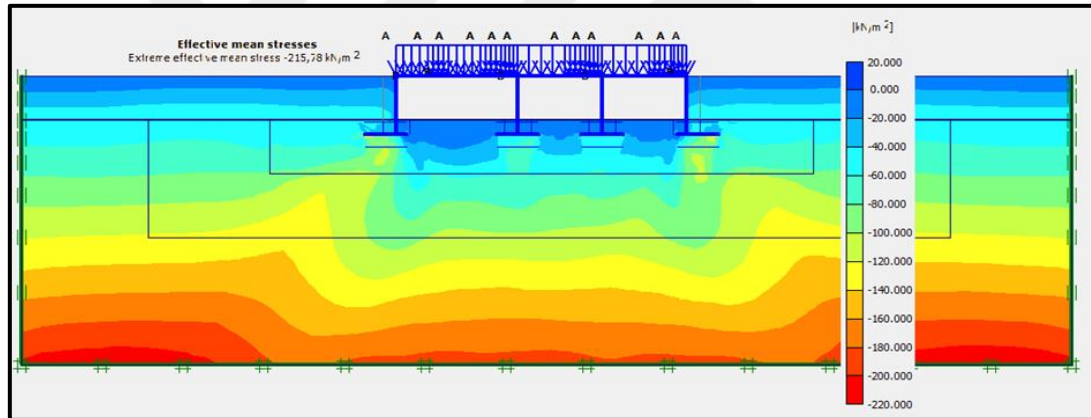
Bu aşamadaki yer değiştirmeler A, B, C, D ve E noktalarındaki vektörel gösterimle $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (61.32, 28.00, 26.10, 58.20, 23.10)$ mm. olarak belirlemiştir. Elastik deformasyonlar yine kabul edilebilir aralıklarda kalmışlardır. Burada da en büyük mutlak yer değiştirme A ve D noktalarında birbirlerine yakındır.

Bu işlem fazında baz alınan noktalardaki toplam gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E) = (236.25, 120.55, 110.29, 187.16, 204.70)$ kN/m² olarak belirlemiştir. Şekil 5.16.’da bu faza ilişkin deforme olmuş sistem şekli verilmektedir.

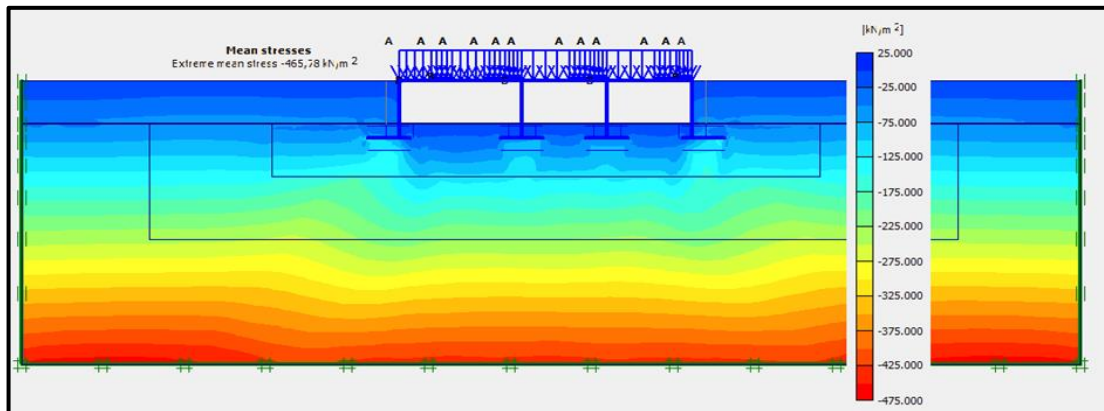


Şekil 5.16. 4. Dinamik zaman anındaki köprü deforme olmuş hali

DYN4 fazına ait Efektif Gerilme ve Toplam Gerilme Diyagramları Şekil 5.17. ve Şekil 5.18.'de verilmiştir.



Şekil 5.17. DYN4 fazı toplam efektif gerilme diyagramı



Şekil 5.18. DYN4 fazı toplam toplam gerilme diyagramı

5.2. Killi Zeminlerde Yapı Zemin Etkileşiminin İncelenmesi

Bu bölümde, köprü modeli altında killi zeminlerde inceleme ve analiz yapılacaktır. Kil zeminin sınıfı orta katı kil karakterinde ele alınacaktır. Aşağıdaki 5.2.1 bölümünde killerin özelliklerine değinilmektedir.

5.2.1. Killi zeminlerin mekanik özellikleri

Kayma direnci konusunda kumlarla killeri birbirinden ayıran en belirgin özelliklerin kumların yüksek geçirimliliği, killerde de jeolojik geçmiş etkilerinin daha ağır basması olduğu söylenebilir. Kilin kayma direnci, içerdiği danelerin mikroskobik boyutları nedeniyle daneler arası yüzey kuvvetlerinden önemli ölçüde etkilenmektedir. Aşağıdaki açıklamalardan görüleceği gibi gevşek kumlarla gevşek kumlarla normal yüklenmiş killer; sıkı kumlarla da aşırı konsolide killerin $\sigma-u_w-\varepsilon-\Delta V$ bağıntılarında paralellik ve kritik durumlarda tam benzerlik bulunmaktadır. Burada kil terimi ile CL, CI, CH, MI, MH ve şeyl gibi kıvam özellikleri gösteren tüm malzemeler anlatılmak istenmektedir. Killerde kayma direncinin şu özelliklere bağlı olduğu bilinmektedir,

1. Efektif gerilme düzeyi
2. Kilin kıvamı (plastisite)
3. Çimentolanma
4. Daneler arası itme veya çekme
5. Su muhtevası
6. Kesilme hızı
7. Anizotropi
8. Gevreklik
9. Numune kalitesi
10. Ölçüm tekniği

Daha basit bir deyişle, killerin kayma direnci fiziksel, fizikokimyasal, ve gerilme özelliklerinin yanında örnekleme ve ölçüm yöntemi gibi onun doğasından

kaynaklanmayan etkenlere de bağlıdır. Killerde kayma direnci ölçümü, kolaylığı ve gereken sürenin kısalığı nedeniyle laboratuvarda yapılagelmiştir. Arazi koşullarına çok benzer olmasa da, laboratuvar deneylerinin yüklemenin özelliği ve drenajın kontrolü ile olabildiğince gerçekçi yapılmasına çalışılır. Laboratuvarda tüm kontrollerin en kolay sağlandığı deney üç eksenli hücre kesme deneyidir. Bu deney değişik konsolidasyon ve drenaj koşullarında, özellikle yumuşak killere, kolaylıkla uygulanabilmektedir.

Yumuşak killerde beliren en önemli sorunlardan biri çok hızlı yapılan yüklemenin getirdiği kritik gerilme durumlarıdır. Bir dolgunun NL (normal yüklenmiş) çok hızla inşa edilmesi, bir barajın yüksek plastisiteli çekirdeğinin hızla yükseltilmesi ya da yumuşak kil üzerine oturtulan bir temelin aşırı yüklenmesi konsolidasyonsuz-drenajsız (UU) koşulları yaratır. Bu durumda, hızla artan gerilmeler sonucu kilde ani yükselen boşluk suyu basınçları sistem dışına çıkmadan kayma gerilmeleri aldığından ani yenilmeler oluşmaktadır. Bu gibi problemlerde analizlerin sadece toplam gerilmelerle yapılması gerçekçi olur. Drenajsız dayanım ölçümü numunelerin hücreye konup yalıtıldıktan sonra bir çevre basıncına tabi tutulması ve yine hiç drenaj olanağı sağlanmadan uygulanacak düşey yükle hızla kesilmesiyle gerçekleştirilir. Yumuşak killerde gerilme daireleri aynı çaplarda olur. Buna göre yumuşak kilin drenajsız kayma direnci toplam gerilmelere göre yatay bir kırılma zarfı ile,

$$S_u = \tau_{max} = C \quad (5.2)$$

İfadesiyle gösterilebilir. Bu açıklamalardan UU (drenajsız - konsolidasyonsuz) koşullarda) bir yumuşak kil için sadece tek efektif gerilme dairesi olacağı sonucu da çıkmaktadır.

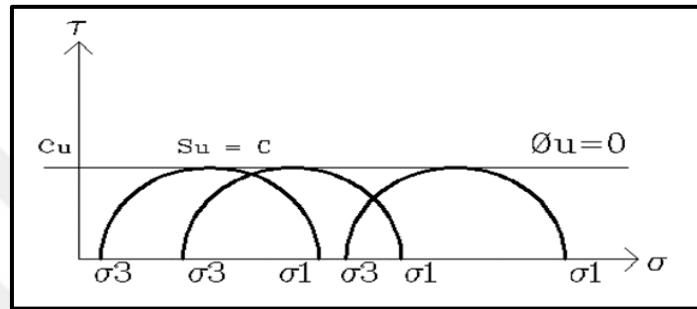
UU deneylerde yapılan diğer bir ölçüm de kilin drenajsız deformasyon modülünün bulunmasıdır. Sayısal olarak ifade edildiğinde,

$$E_u = K \cdot P_a \cdot \frac{\sigma}{p_a} \quad (5.3)$$

denkleminde P_a atmosfer basıncı, K ve n ise boyutsuz parametreler olarak tariflenmiştir.

Normal yüklenmiş killerde, $\frac{E_u}{c_u} = 200 - 1000$, (5.4)

Burada, $K < 300$ ve n ise yaklaşık 1.0 alınır. Normal yüklenmiş kilin kırılma zarfı Şekil 5.19.'daki gibi yataydır.



Şekil 5.19. Yumuşak kilde kırılma zarfı ve kayma direnci

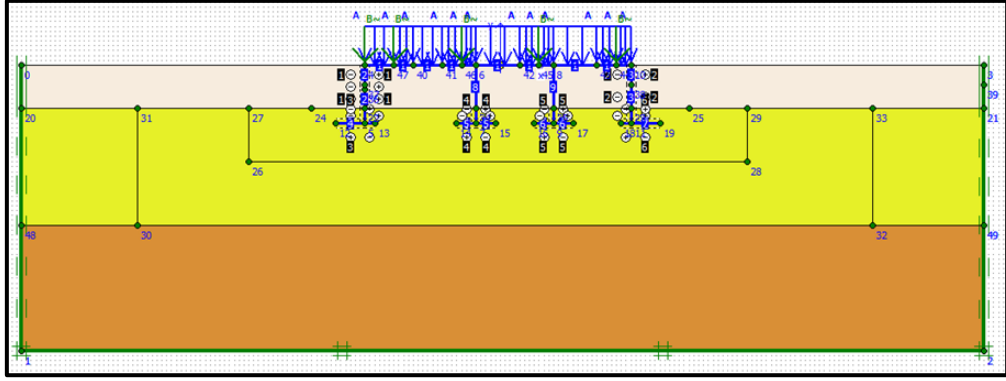
5.2.2. Killi zemin ortamında köprü modelinin kurulması

Bu hesap analiz modelinde de köprü tamamen killi bir zemin ortamına oturtulmuştur. Model boyutları yatayda 100 m. ve düşeyde 30 m. olarak seçilmiştir. Temel kile 1.5 m gömülüdür. Sadece köprü'nün sağ ve sol taraflarındaki istinat duvarı yüksekliğince dolgu (filling) ile doldurulmuştur. Bu dolgunun temel taşıma gücüne etkisi az olduğu kabul edilmiştir. Bu bağlamda killi temel zemininin indeks özellikleri Tablo 5.2.'de verilmiştir.

Tablo 5.2. Modelde kullanılan yapı ve zemin parametreleri.

Parametreler	Derinlik ve Zemin-Köprü yapısı özellikleri					
Derinlik (m)	0-4.50 m.	0 – 6.00	0 – 6.00	-4.50 - -16.50	> -30.00	
Zemin adı	Dolgu	Çelik Köprü Yapısı (Kolon/kiriş)	Betonarme yapılar (Temel/duvarlar)	Kil	Taban Kayası	
Simge	Filling	Çelik Yapı	BA	CH	BR	
Malzeme modeli	Pekleşen Zemin	Lineer Elastik	Lineer Elastik	Pekleşen Zemin	Lineer Elastik	
Malzeme Tipi	Drenajlı	-	-	Drenajsız	Drenajsız	
Birim Hacim ağırlık $\rho_{\text{doğru}}$ (kN/m ³)	20	78.5	24	20	27	
Power (m)	0.5	-	-	0.8	-	
E_{50}^{ref} (kN/m ²)	20.000	-	-	25.000	-	
$E_{\text{oed}}^{\text{ref}}$ (kN/m ²)	19.310	-	-	25.000	-	
$E_{\text{ur}}^{\text{ref}}$ (kN/m ²)	45.000	-	-	75.000	-	
c'_{ref} (kN/m ²)	10	-	-	80	-	
ϕ (derece)	20	-	-	15	-	
Kabarma açısı Ψ (derece)	0	-	-	0	-	
Poisson oranı ν	0.20	0.25	0.25	0.20	0.10	
P_{ref} (kN/m ²)	100	-	-	100	-	
K_0	0.658	-	-	0.741	-	
R_{int}	0.65	-	-	0.67	-	
Eksenel rijitlik EA (kN/m/m)	-	Kolon	Kiriş	Duvar	Temel	-
		4.720.000	11.030.00	7.500.000	28.000.000	
Eğilme rijitliği EI (kN/m ² /m)	-	8.860	11.250	1.000.000	2.333.000	-
Boyut (m/cm/mm)	-	H 250/250	I 300/1200	1.265/1.00	1.00/1,00	-

Modelde kullanılan zeminde ilk 4.50 m. dolgu, onun altında 12 m. kalınlıkta orta katı kil, en alt tabakada da 12.5 m. lik tekrar kum tabakası şeklinde sıralanmaktadır. Kil ve kum zemin katmanları sonlu eleman ağı sıklığı bakımından farklılaştırılmıştır. En üstteki dolgu tabakası orta sıklıkta, -4.5 m. ile -10.00 m arasındaki kil tabakası ince (fine) sıklıkta, -10.00 m ile -16.5 m derinlikteki kil tabakası orta sıklıkta, ve en alttaki kum tabakası kaba (coarse) sıklıkta sonlu eleman ağına sahiptir. Model görünümü Şekil 5.20.'de verilmiştir.



Şekil 5.20. Kil zemine oturan yapı modeli

Bu model üzerindeki yükler Şekil 5.3.'deki kumlu zemin modelindeki aynısıdır. Kısaca tüm köprü açıklıkları boyunca $q=17.0 \text{ kN/m}$ 'lik öz ağırlık yüklerine maruzdur (G+Q). Dinamik yükleme aşamaları ise;

1. aşama: Trenin köprüye girdiği ilk an, tren 1. aks kolonu üzerindedir.
2. aşama: Trenin ilk tekerleğinin köprüünün üstünde 10 m de olması anıdır.
3. aşama: Trenin ilk tekerleğinin köprüünün üstünde 18 m de olması anıdır.
4. aşama: Trenin ilk tekerleğinin 24 m de ve 2. tekerleğinin 4.5 m de olması anı (trenin tamamen köprü üstünde olması) dinamik fazlarından oluşmaktadır.

Bunlar Plaxis aşamalar (phases) kısmında DYN1, DYN2, DYN3 ve DYN4 simgeleriyle gösterilmektedir. Yüklerin girildiği ekran Şekil 5.3.'de verilmiştir.

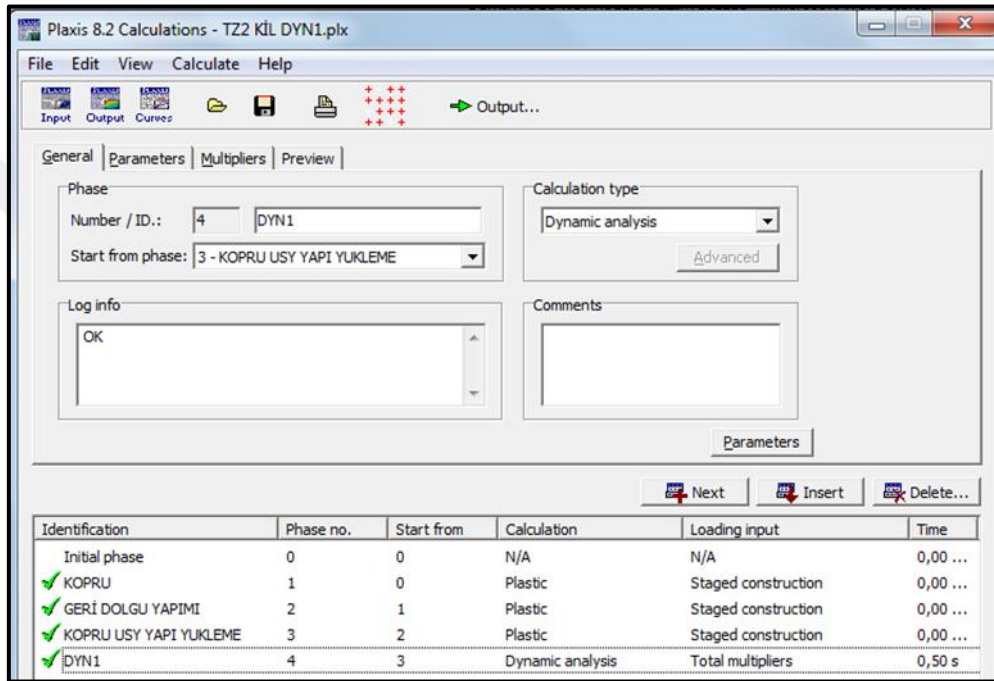
Yeraltı suyu yüzeyden -4,50 m de tanımlanmıştır. Bu tanımlanan su seviyesine göre boşluk suyu basınçları ekranda test edilmiş ve bunun 247 kPa olduğu görülmüştür. Zemin başlangıç efektif gerilmeleri input ekranında girilmiş ve bu değerinde 250 kPa olduğu görülmüştür.

İlk bilgi girişlerinden sonra aşamaların tanımlandığı calculate (hesapla) kısmına geçilmiştir. Başlangıç aşamasından (initial phase) sonraki aşamalar sırasıyla:

- 1- Başlangıç fazı
- 2- Köprü yapım aşaması
- 3- Geri dolgu yapılması

- 3- Köprü üst yapısı yapılması 1. dinamik yük ataması
- 4- 1. Dinamik yük halinde köprü ve zemin hesabı (DYN1) olarak belirtilebilir.

Burada kil zemine oturan zemin yapı etkileşiminde en olumsuz durum olarak 1. faz dinamik hesap yapılarak sistem kontrol edilecektir. İzin verilen oturma-gerilme limitlerinin aşılmaması halinde 2, 3 ve 4 dinamik hallerde hesaba devam edilecektir. Bu dataların gösterildiği ekran görüntüsü Şekil 5.21.'de verilmiştir.



Şekil 5.21. Hesap aşamalarının tanımlandığı bilgi girişi ekranı

5.2.3. Hesapların yapılması ve sonuçlar

Bu işlemlerden sonra sistem çalıştırılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu köprü yüklemesinde her aşamada köprü ve zeminin nasıl davrandığı maddeler halinde açıklanmıştır.

1. Faz: Köprü yapım aşaması hesap sonucu

Bu aşamada A, B, C, D ve E noktalarında zemin ve yapı beklendiği gibi düşey deplasman yapmıştır. Bu aşamadaki yer değiştirmeler A, B, C, D ve E noktalarındaki

vektörel gösterimle $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (3.50, 3.70, 3.85, 3.61, 3.32)$ mm olarak belirmiştir. Elastik deformasyonlar yine kabul edilebilir aralıklarda kalmışlardır. Burada da en büyük mutlak yer değiştirmeler aynı değerlerdedir. Bu işlem fazında baz alınan noktalardaki toplam gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E) = (66.25, 65.62, 62.75, 66.12, 188.10)$ kN/m² olarak belirmiştir.

2. Faz: Geri dolgu yapım aşaması

Bu aşamada A,B,C,D ve E noktalarında zemin ve yapı deplasmanları beklendiği gibi düşey ve yatay deplasman yapmıştır. Bu aşamadaki toplam yer değiştirmeler A, B, C, D ve E noktalarındaki vektörel gösterimle $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (53.25, 3.20, 5.50, 49.69, 6.65)$ mm olarak belirmiştir. Elastik deformasyonlar yine kabul edilebilir aralıklarda kalmaktadır. Burada da en büyük mutlak yer değiştirmeler 1. ve 4. aks kolon temelleri altındadır.

Bu işlem fazında baz alınan noktalardaki toplam gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E) = (138.95, 58.07, 62.26, 192.17, 216.18)$ kN/m² olarak belirmiştir. Deformasyon şeklinde 3. aks kolonunun en fazla çöktüğü açıkça görülmektedir.

3. Faz: Köprü üst yapı yüklemesi

Bu aşamada A,B,C,D ve E noktalarında zemin ve yapı deplasmanları beklendiği gibi düşey ve yatay deplasman yapmıştır. Bu aşamadaki toplam yer değiştirmeler A, B, C, D ve E noktalarındaki vektörel gösterimle $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (55.42, 7.85, 7.75, 49.20, 7.88)$ mm olarak belirmiştir. Elastik deformasyonlar yine kabul edilebilir aralıklarda kalmaktadır. Burada da en büyük mutlak yer değiştirmeler 1. ve 4. Aks temelleri altındadır.

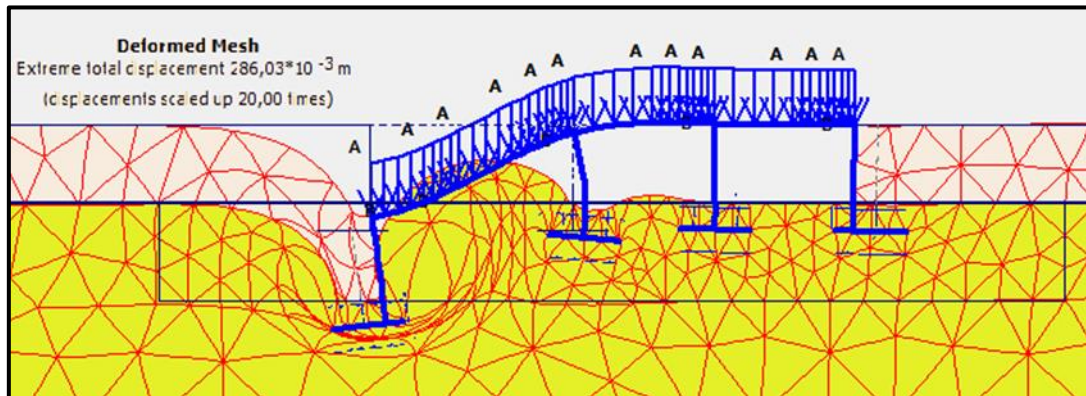
Bu işlem fazında baz alınan noktalardaki toplam gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E) = (149.21, 97.75, 88.68, 138.95, 222.00)$ kN/m² olarak belirmiştir.

3. Faz: Köprü üst yapı yüklemesi

Bu aşamada A,B,C,D ve E noktalarında zemin ve yapı deplasmanları beklendiği gibi düşey ve yatay deplasman yapmıştır. Bu aşamadaki toplam yer değiştirmeler A, B, C, D ve E noktalarındaki vektörel gösterimle $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (55.42, 7.85, 7.75, 49.20, 7.88)$ mm olarak belirmiştir.

4. Faz: Köprü dinamik yüklemesi (DYN1)

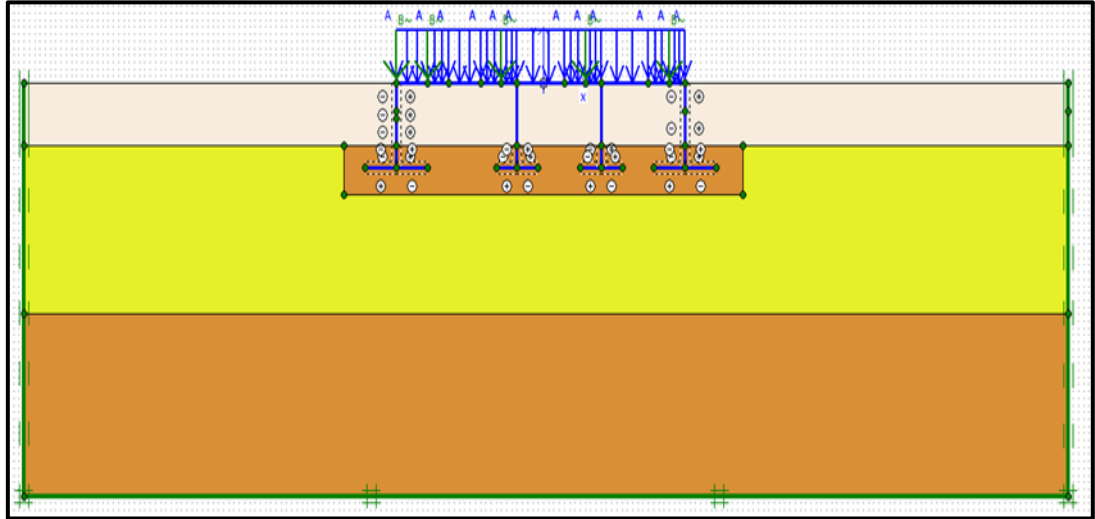
Bu fazda köprü inşası, geri dolgular ve köprü üst yapı inşaatı tamamlanmış, köprü üzerinde 1. dinamik hal olarak DYN1 yüklemesi yapılmaktadır. Yani köprü üzerinden tren geçişinin ilk aşamasıdır. Yük 1. aks kolonu üzerindedir. Bu aşamadaki yer değiştirmeler A, B, C, D ve E noktalarındaki vektörel gösterimle $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (278.56, 45.68, 9.50, 6.65, 14.40)$ mm olarak belirmiştir. DYN1 yüklemesindeki en önemli ve gözden kaçmayan nokta trenin ilk giriş anındaki dikkat çekecek denli fazla oturmalar olmasıdır. 1. aks kolonundaki 278 mm. lik ani oturma, oturma limitleri kriterlerini çok fazla aşmaktadır. Bu nedenle kile oturan yapı-temel sisteminde beklenen performans sağlanamamış, sistemde iyileştirme gerekliliği ortaya çıkmıştır. Bu iyileştirme ilk bakışta temel boyutlarının büyütülmesi ve temel altındaki zeminin niteliğinin daha olumlu parametrelere çekilmesi olarak akla gelmektedir. Sistemde deforme olmuş hal Şekil 5.22.'de verilmektedir.



Şekil 5.22. DYN1 yüklemesi deforme olmuş hal. (Şekil 100 kat büyütülmüştür.)

5.3. İyileştirilmiş Killi Zeminde Yapı Zemin Etkileşiminin İncelenmesi

Bu başlıkta yer alan incelemede, bir önceki başlıkta yer alan direkt killi zemine oturan yapı sistemi, temellerde yapılan büyütme değişikliği ve temellerin içinde olduğu zemin ortamının iyileştirilerek parametrelerinin daha dayanımlı olması haline göre incelenecektir. Bu amaçla önceden, 4 m olan temel genişlikleri, 1. ve 4. Aks kolonlarında 7 m ye çıkarılmakta, orta aks kolonları ise yine 4 m bırakılmaktadır. Temel seviyesinde eklenen zemin sıkı kum olup, 1.5 m' si temel üstünde, 2 m'si ise temel altında kalacak şekilde toplam 4 m yüksekliğinde sargılama (içine alma) bölgesi oluşturulmaktadır. Bu zemin modeline ilişkin ekran görüntüsü Şekil 5.23. dedir.



Şekil 5.23. İyileştirilen zemin ve iyileştirilen temel modeli

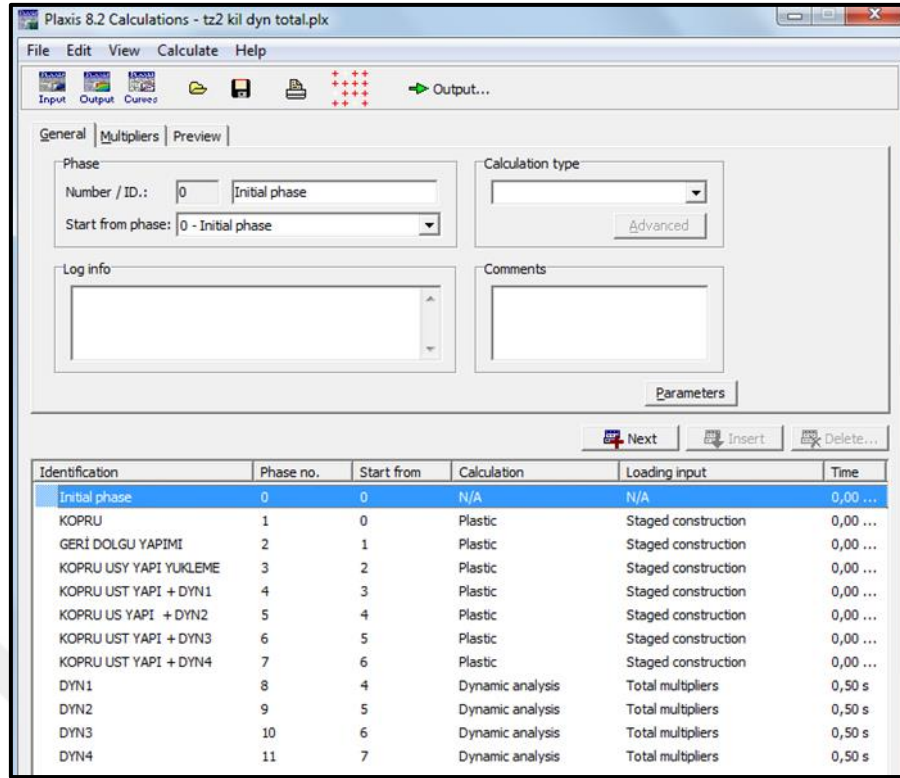
Bu zemin modelindeki zemin katmanlarının özellikleri Tablo 5.3.'de verilmektedir.

Tablo 5.3. Modelde kullanılan yapı ve zemin parametreleri

Parametreler		Derinlik ve Zemin-Köprü yapısı özellikleri					
Derinlik (m)	0 – 4.50	0 – 6.00	0 – 6.00	-4.5- 8.00	-8.00- 16.50	> -30.00	
				-16.50 - -29.50			
Zemin adı	Dolgu	Çelik Köprü Yapısı (Kolon/kiriş)	Betonarme yapılar (Temel/duvarlar)	Kum	Kil	Taban Kayası	
Simge	FL	Çelik Yapı	BA	SP	CH	BR	
Malzeme modeli	Pekleşen zemin	Lineer Elastik	Lineer Elastik	Pekleşen zemin	Pekleşen zemin	Lineer Elastik	
Malzeme Tipi	Drenajlı	-	-	Drenajlı	Drenajsız	Drenajsız	
Birim Hacim ağırlık $\rho_{\text{doğgun}}$ (kN/m ³)	20	78.5	24	20	20	27	
Power (m)	0.5	-	-	0.5	0.8	-	
E ₅₀ ^{ref} (kN/m ²)	20.000	-	-	40.000	25.000	-	
E _{oed} ^{ref} (kN/m2)	19.310	-	-	40.000	25.000	-	
E _{ur} ^{ref} (kN/m ²)	45.000	-	-	90.000	75.000	-	
c _{ref} ['] (kN/m ²)	10	-	-	1.0	80	-	
φ (derece)	20	-	-	38	15	-	
Kabarma açısı Ψ (derece)	0	-	-	10	0	-	
Poisson oranı ν	0.20	0.25	0.25	0.20	0,20	0,10	
P _{ref} (kN/m2)	100	-	-	100	100	-	
K _o	0.658	-	-	0.384	0.741	-	
R _{int}	0.65	-	-	0.67	0.67	-	
Eksenel rijitlik EA (kN/m/m)	-	Kolon	Kiriş	-	Temel	-	
		4.720.000	11.030.00	-	28.000.000		
Eğilme rijitligi EI (kn/m ² /m)	-	8.860	11.250	-	2.333.000	-	
Boyut (m/cm/mm)/m	-	H 250/250	I 300/1200	-	1.00/1.00	-	

Modelde oluşturulan zemin katmanlarının sonlu eleman ağı sıklıkları, temel altında ki kum zeminde sıkı, onun altında ki kil zeminde orta (medium) daha derinliklerde ise kaba (coarse) olacak şekilde ayarlanmıştır.

Model yükleme şekilleri, kumlu zemin şartlarındaki yüklemelerin aynıdır (Bölüm 4.3.1, 4.3.2). Yani köprü öncelikle çelik yapı öz ağırlıkları ile (KÖPRÜ fazı), sonra köprü yaklaşım geri dolgu yapımı ile (GERİ DOLGU fazı), ondan sonra da köprünün üst yapı yol katmaları ile (KÖPRÜ ÜST YAPI YÜKLEMESİ fazı) ve son olarakta 4 tipten oluşan Dinamik yükleme fazları ile yüklenecektir. (DYN1, DYN2, DYN3, DYN 4). Yük şiddetleri ve etkime noktaları kumlu zemin de belirtilen (Bölüm 5.1.2) şekildedir. Sistem modelinde gerilmelerin ve yer değiştirmelerin inceleneceği noktalar referans olarak verilen A, B, C, D, ve E noktalarıdır.



Şekil 5.24. Problemdeki yükleme fazlarının ekran görüntüsü

5.3.1. Hesapların yapılması ve sonuçlar

Bu işlemlerden sonra yazılım çalıştırılarak hesaplamalar yapılmıştır. Bu köprü yüklemesinde her aşamada köprü ve zeminin nasıl davrandığı maddeler halinde açıklanmıştır.

1. Faz: Köprü yapım aşaması hesap sonucu:

Bu aşamada A, B, C, D ve E noktalarında zemin ve yapı deplasmanları beklendiği gibi düşey deplasman yapmıştır. Bu aşamadaki yer değiştirmeler A, B, C, D ve E noktalarındaki vektörel gösterimle $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (4.17, 4.87, 4.48, 4.48, 3.15)$ mm olarak belirlemiştir. Verilen elastik yer değiştirmeler kabul edilebilir düzeylerdedir. Aynı şekilde bu fazdaki ve bu noktalarda ki efektif gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E) = (42.95, 51.48, 47.41, 40.75, 89.77)$ kN/m² olarak belirlemiştir.

2. Faz: Geri Dolgu yapım aşaması hesap sonuçları:

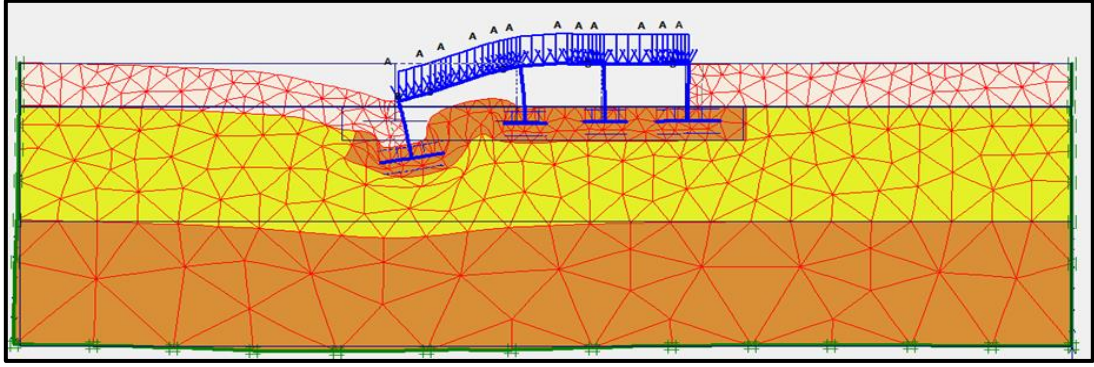
Bu aşamada çelik köprü inşaatı yapılmış, geri dolgular sisteme etki etmiştir. Buna göre baz noktalarda ki yer değiştirmeler $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (21.45, 5.22, 6.69, 18.41, 5.95)$ mm olarak belirmiştir. Aynı şekilde bu fazdaki ve bu noktalarda ki efektif gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma'_A, \sigma'_B, \sigma'_C, \sigma'_D, \sigma'_E) = (81.21, 41.45, 42.85, 78.50, 62.15)$ kN/m² olarak belirmiştir.

3.,4.,5.,6., Faz: Köprü üst yapı yükleme hesap sonuçları:

Bu faz köprü inşası, geri dolgu yapımı fazlarından sonra köprü üstünün kaplamaları yollarının yapımı ve kar yüklerine işaret etmektedir. Buna aynı baz noktalarda ki yer değiştirmeler $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (23.21, 10.15, 9.02, 18.61, 8.52)$ mm olarak belirmiştir. Aynı şekilde bu fazdaki ve bu noktalarda ki efektif gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma'_A, \sigma'_B, \sigma'_C, \sigma'_D, \sigma'_E) = (91.27, 85.47, 72.50, 90.63, 77.90)$ kN/m² olarak belirmiştir. Bu aşamalarda beliren temel altı ani oturmaları statik olarak kabul edilebilir düzeylerde oldukları görülmektedir. Bir diğer deyişle yük artımları orantılı olarak oturma artışlarını beraberinde getirmektedir.

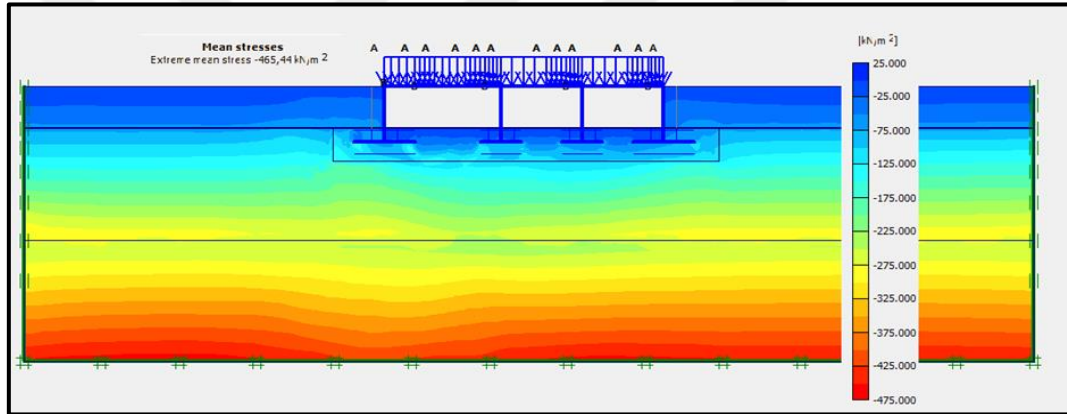
7. Faz: Köprü dinamik yükleme (DYN1)

Bu faz dinamik yükleme fazı olup tren geçişinin ilk anıdır. (L = 0.00 m). 5. fazda tren 10 m'de, 6. fazda 18 m.'de ve son fazda iki adet tekerlek 24 ve 4.50 m.'de yükleme halinde olacaktır. Bu hatırlatmadan sonra yerdeğiştirmeler : $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (86.30, 5.27, 8.78, 5.03, 12.34)$ mm olarak belirmiştir. Aynı şekilde bu fazdaki ve bu noktalarda ki toplam gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E) = (240.50, 116.40, 65.77, 159.95, 59.38)$ kN/m² olarak belirmiştir. Buradaki en fazla ani çökme 1. Aks kolonu altındaki çökme olan 86.30 mm dir. Bu değer mutlak çökme olup rölatif olarak değerlendirildiğinde $\delta_z = 63$ mm (86.00-23.21) mertebesinde ve ani oturma türündedir. Bu faza ilişkin deforme olmuş hal Şekil 5.25.'de verilmektedir.

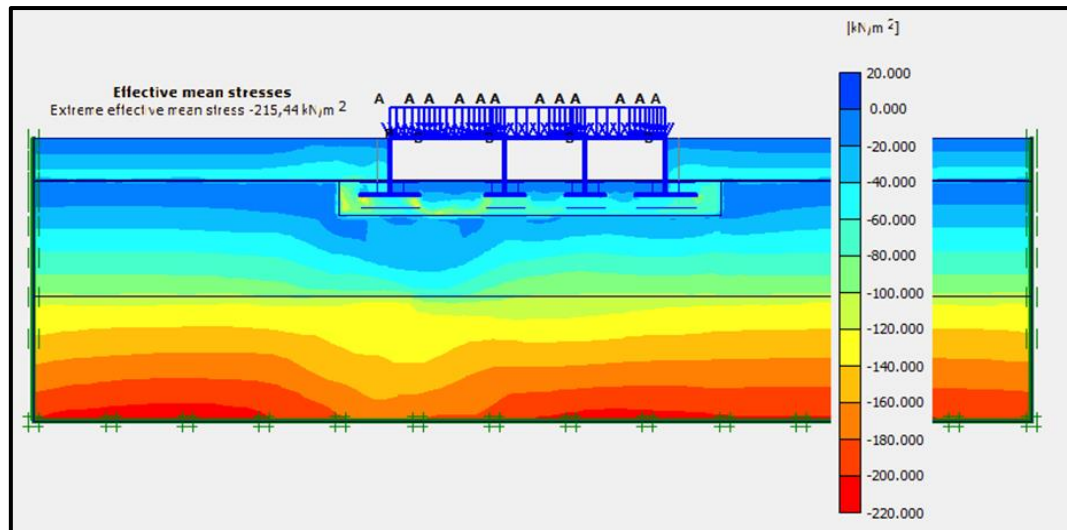


Şekil 5.25. Killi zemin DYN1 yüklemesi deforme olmuş hal (ölçek 50 kat büyütülmüş)

Killi zeminde DYN1 fazına ait Toplam ve efektif gerilme diyagramları Şekil 5.26. ve Şekil 5.27.'de verilmektedir.



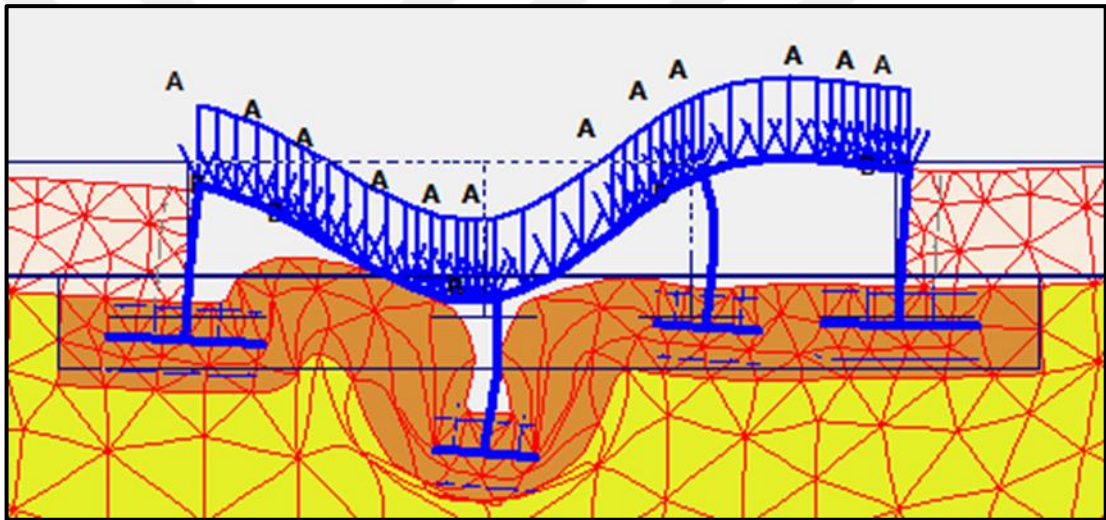
Şekil 5.26. Killi zemin DYN1 yüklemesi toplam gerilme diyagramı



Şekil 5.27. Killi zemin DYN1 yüklemesi efektif gerilme diyagramı

8. Faz: Köprü dinamik yüklemesi (DYN2) :

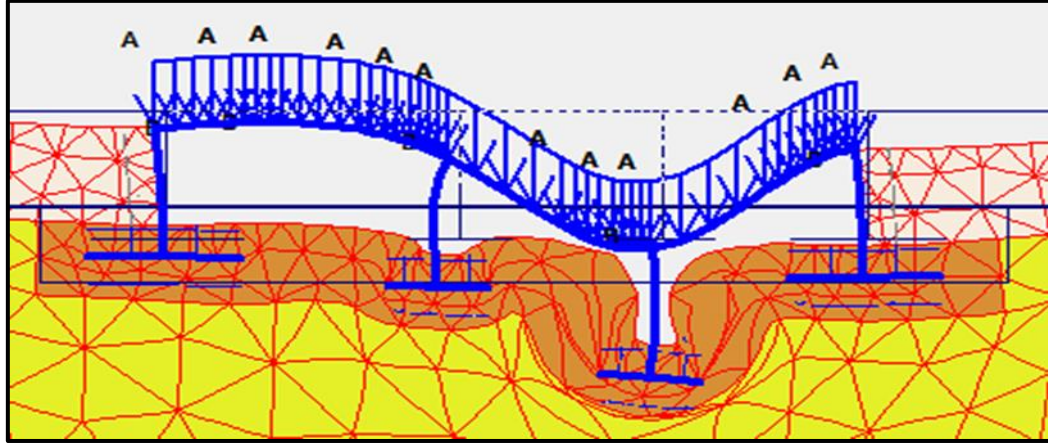
Bu fazda DYN 1 de açıklanan tren konumu daha önce söylenmişti. Buna göre oturmalar ve toplam gerilmeler: $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (20.02, 109.80, 16.25, 8.27, 36.95)$ mm olarak belirlemiştir. Aynı şekilde bu fazdaki ve bu noktalarda ki toplam gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E) = (176.85, 89.40, 234.50, 132.45, 187.15)$ kN/m² olarak belirlemiştir. Bu fazdaki maksimum mutlak oturma 2. Aks kolonu altında 109.80 mm. dir. Bu değeri rölatif olarak $\delta_z = 100$ mm (109.80-10.15) olarak belirtmek mümkündür. Bunun killerde sınır değere yakın bir ani oturma olduğu belirtilebilir. Bu faza ilişkin deforme olmuş hal Şekil 5.28.'de verilmektedir.



Şekil 5.28. Killi zemin DYN2 yüklemesi deforme olmuş hal (şekil ölçeği 50 kat büyütülmüştür)

9. Faz: Köprü dinamik yüklemesi (DYN3) :

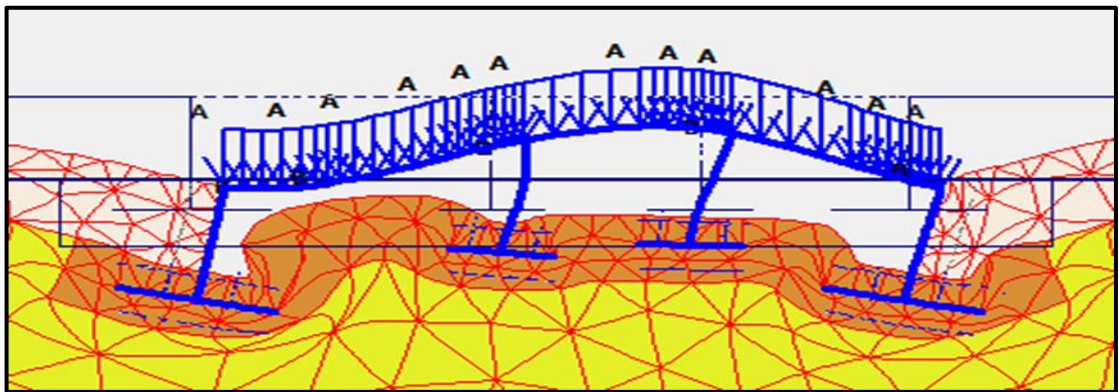
Bu fazda tren konumu DYN1 de açıklanmıştır. Buna göre oturmalar ve toplam gerilmeler: $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (8.95, 24.53, 66.58, 17.65, 32.90)$ mm olarak belirlemiştir. Aynı şekilde bu fazdaki ve bu noktalarda ki toplam gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E) = (163.97, 116.70, 78.50, 156.69, 203.12)$ kN/m² olarak belirlemektedir. Bu fazda en fazla yer değiştirme 3. Aks kolonu altında 66.58 mm. ve rölatif yer değiştirme ise $\delta_z = 45$ mm (63.58 - 18.60) değerindedir. Bu faza ilişkin deforme olmuş hal Şekil 5.29.'da verilmiştir.



Şekil 5.29. Killi zemin DYN3 yüklemesi deforme olmuş hal (şekil ölçeği 50 kat büyütülmüştür)

10. Faz: Köprü dinamik yüklemesi (DYN4) :

Bu son fazda tren köprü üstünde tamamen bulunmaktadır. Buna göre oturmalar ve toplam gerilmeler: $(\delta_A, \delta_B, \delta_C, \delta_D, \delta_E) = (52.20, 24.70, 20.37, 53.15, 22.70)$ mm olarak belirlemiştir. Aynı şekilde bu fazdaki ve bu noktalarda ki toplam gerilmeler vektörel gösterimle $(\sigma_A, \sigma_B, \sigma_C, \sigma_D, \sigma_E) = (116.10, 140.25, 132.00, 208.15, 210.72)$ kN/m² olarak belirlemektedir. Yine burada da en büyük yer değiştirmeler yüklerin etkiye noktaları altındaki 1. Ve 4. Aks kolonları altlarında oluşmuştur. Yer değiştirmeler oturma limitleri altında oluşmaktadır. Bu faza ilişkin deforme olmuş hal Şekil 5.30.'da verilmektedir.



Şekil 5.30. Killi zemin DYN4 yüklemesi deforme olmuş hal (şekil ölçeği 50 kat büyütülmüştür)

Buraya kadar kumlu ve killi zemin tipleri için demiryol köprüsünün zemin ve temellere olan etkisi analiz edilerek problemin nasıl bir karaktere sahip olduğu

incelendi. Kumlu ve killi zeminlerdeki hesap ve analiz sonuçlarına bağlı olarak yerdeğiştirme ve gerilmeler Tablo 5.4.'de verilmiştir.

Tablo 5.4. Tüm analizlerin yer değiştirme ve gerilme sonuçları. Yerdeğiştirmeler mm gerilmeler kN/m²

Yüklem Adı / Aşamalar		Zemin Tipi					
		Kumlu zemin		Killi zemin		İyileştirilmiş Killi Zemin ve İyileştirilmiş Yapı	
Köprü İnşası	Nokta No	Yer Değiştirme (δ_z) (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)
	A	17.18	103.00	3.50	66.25	4.17	42.95
	B	20.77	98.40	3.70	65.62	4.87	51.48
	C	17.56	85.20	3.85	62.75	4.48	47.41
	D	13.95	73.00	3.61	66.12	4.48	40.75
	E	8.85	125.50	3.32	188.10	3.15	89.77

Köprü üst yapısı inşası	Nokta No	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)
	A	41.85	144.20	55.42	149.21	23.21	91.27
	B	25.33	102.92	7.85	97.75	10.15	85.47
	C	24.21	84.12	7.75	88.68	9.02	72.50
	D	35.65	120.85	49.20	138.95	18.61	90.63
	E	13.07	126.48	7.88	222.00	8.52	77.90

Geri Dolgu Yapımı	Nokta No	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)
	A	40.98	131.50	53.25	138.95	21.45	81.21
	B	24.88	86.53	3.20	58.07	5.22	41.45
	C	24.06	87.20	5.50	62.26	6.69	42.85
	D	34.82	110.02	49.69	192.17	18.41	78.50
	E	12.95	125.12	6.65	216.18	5.95	62.15

DYN 1	Nokta No	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)
	A	71.05	225.25	278.56	Yenilme!	86.30	240.50
	B	16.65	129.92	45.68	-	5.27	116.40
	C	5.71	90.55	9.50	-	8.78	65.77
	D	2.39	136.08	6.65	-	5.03	159.95
	E	11.02	217.55	14.40	-	12.34	59.38

DYN 2	Nokta No	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)
	A	22.85	124.60	-	-	20.02	176.85
	B	56.88	123.82	-	-	109.80	89.40
	C	21.33	116.69	-	-	16.25	234.50
	D	10.77	127.93	-	-	8.27	132.45
	E	34.50	219.11	-	-	39.95	187.15

Tablo 5.4 (Devamı).

DYN 3	Nok ta No	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)
	A	11.10	158.90	-	-	8.95	163.97
	B	27.77	122.85	-	-	24.53	116.70
	C	47.82	105.28	-	-	66.88	78.50
	D	22.30	144.30	-	-	17.65	159.69
	E	29.10	215.85	-	-	32.90	203.12

DYN 4	Nok ta No	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)	Yer Değiştirme δ_z (mm)	Gerilmeler σ_t veya σ' (kN/m ²)
	A	61.32	236.25	-	-	52.20	116.10
	B	28.00	120.55	-	-	24.70	140.25
	C	26.10	110.29	-	-	20.37	132.00
	D	58.20	187.16	-	-	53.15	208.15
	E	23.10	204.70	-	-	22.70	210.72

Tabloda; σ' efektif gerilme, σ_t toplam gerilmedir. A, B, C, D ve E noktaları Şekil 5.5.'de verilmiştir.

BÖLÜM 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada, ulaştırmada demiryolu köprülerinin, özelde de Almanya'nın Karlsruhe bölgesindeki Weiherfeld köprüsünün iki farklı zemin tipindeki davranışları ele alındı. Buradaki amaç, aynı yük ve aynı yapısal özellikler korunarak, farklı zemin tiplerinin elastik-elastoplastik davranış tepkilerini ölçmektir. Bu bağlamda, elastik parametreleri ve geçirimsizlikleri birbirinden farklı zemin malzemelerinin gerilme ve şekil değiştirmeleri incelenmiştir. Sonuçta direkt killi zemine oturan köprü sisteminin dinamik yükler altında daha fazla şekil değiştirdiği gözlenmiştir. Buradaki esas amaç böyle köprü yapılarının, zeminin deneysel olarak elde edilen dayanım ve bünye davranışlarının karşılaştırılarak, olumsuzluk olarak göze çarpan durumlarını ortaya koymak ve bu olumsuz tarafları mühendislik yöntemleriyle iyileştirmek olarak belirtilebilir. Yani zeminde ve yapıda iyileştirme yaparak mühendislik yapılarının uzun ömürlü ve güvenli olmasını sağlamaktır. Tabiki bu yöntemlerden başka pek çok tedbirlerle bu iyileştirmeler sağlanabilir. Bu tezin konusu olarak zemin ve temellerde iyileştirme tercih edilmiş ve bunun analitik değerlendirmeleri yapılmıştır. Bütün analiz sonuçlarının karşılaştırmalı olarak Tablo 5.4.'ün incelemesinden varılan sonuçlar, yorumlar ve öneriler şöyle verilebilir.

1) Kumlu zeminlerde ki zemin davranışı, köprü inşaatı aşamasında 20 mm. lik oturma ile makul düzeylerde ve kalıcı bir yer değiştirmedir. Geri dolgu yapımında 41 mm. ye çıkan yer değiştirme kabul edilebilir ve kalıcı bir yer değiştirmedir. Köprü üst yapı inşaatı fazındaki yer değiştirme 42 mm. ve kalıcıdır. En büyük mutlak yer değiştirme DYN1 dinamik fazında 72 mm. olarak belirmiş, rölatif yer değiştirme ise $\delta_z = 29.20$ mm (71.05-41.85) olacağı görülmektedir. Bu da kabul edilebilir bir deplasmandır.

2) Killi zeminlerde, 1. fazda 4 mm., 2 fazda 53 mm. 3. fazlarda 55 mm. olan inşai kısımları içeren kalıcı yer değiştirmeler oluşmuştur. Fakat DYN1 fazında ki mutlak deplasman 278 mm ye çıkarak zeminin yenildiğini göstermektedir. Bu işlem adımından sonra yükleme sonlandırılmıştır.

3) İyileştirilmiş zemin ve iyileştirilmiş yapı şeklindeki incelemede, 1. fazda 5 mm., 2. Fazda 18 mm., 3. fazda 23 mm. lik kalıcı yer değiştirmeler oluşmuştur. Dinamik fazlara geçince, en büyük mutlak yer değiştirmeler, DYN1 de 86 mm. DYN2 109 mm olarak belirmiştir. Burada en büyük mutlak yer değiştirme, $\delta_z = 98$ mm (109-11) mm şeklinde belirmiştir. Buradaki yer değiştirme değeri ortadaki temellerin 4 m. den 6 m. gibi mertebelere çıkarılması ile daha düşük seviyelere de indirilebilir. Ya da derin temel (kazık, jet grout) seçenekleri uygulanabilir. Ancak şu bir gerçektir ki zeminin iyileştirilmesinin etkisi, 278 mm. lerden 90 mm. lere düşen yer değiştirmelerden anlaşılmaktadır.

KAYNAKLAR

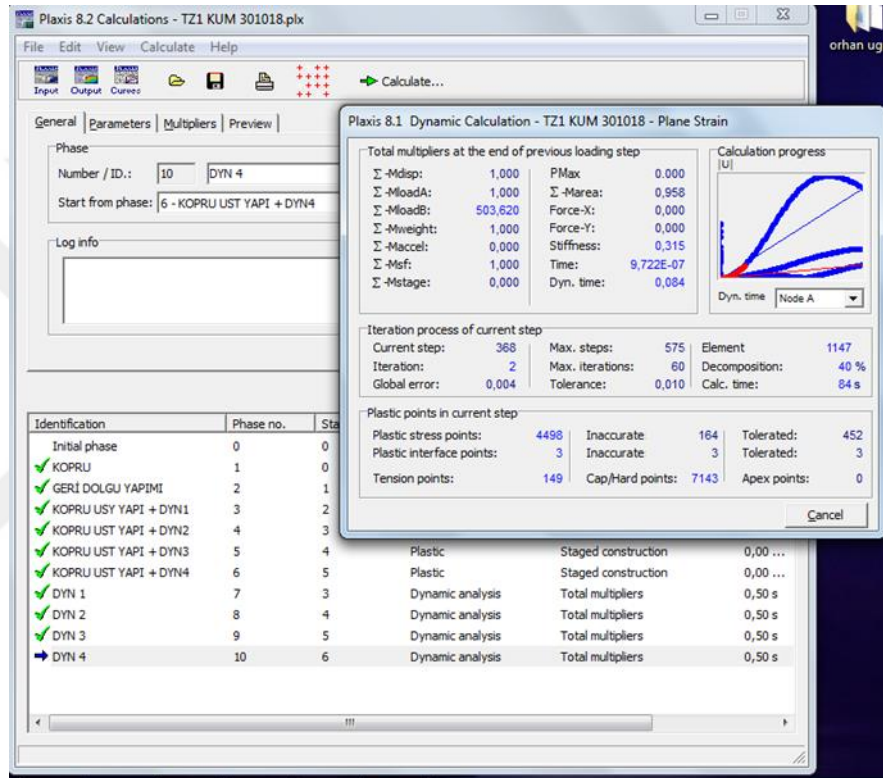
- [1] Siyahi, B., Çetin, K.Ö., Bilge, T. Geoteknik mühendisliği açısından Zemin-Yapı etkileşimine kritik bir bakış (2017).
- [2] Brinkgreve, R.B.J., Vermeer, P.A. Plaxis 2D Manual Nedherland (2016).
- [3] Güler, H., Fath, B. and Akyol, T.P. "Acoustic Performance of Railways: A Case Study in Germany", Railways (2014): The Second International Conference on Railway Technology: Research, Development and Maintenance, 2014, Ajaccio, Corsica, France.
- [4] EN 1990, 2006. Basis of structural design. CEN, Bruxelles.
- [5] EN 1991-2, 2005. Actions on structures. Part 2: Traffic loads on bridges. CEN, Bruxelles.
- [6] EN 1992-1-1, 2004. Eurocode 3: Design of concrete structures Part 1-1: General Rules. CEN, Bruxelles.
- [7] EN 1993-1-1, 2003. Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-1: General Rules. CEN, Bruxelles.
- [8] EN 1993-1-10, 2005. Eurocode 3: Design of steel structures Part 1-10: Material Toughness and Through-Thickness Properties. CEN, Bruxelles.
- [9] EN 1993-1-9, 2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 1-9: Fatigue. EN, Bruxelles.
- [10] EN 1993-2, 2005. Eurocode 3: Design of steel structures. Part 2: Steel Bridges. CEN, Bruxelles.
- [11] EN 1997-2, 2007. Eurocode 7 Geotechnical design Part 2: Ground investigation and testing. CEN, Bruxelles.
- [12] Önalp, A., Geoteknik Bilgisi I Zeminler ve Mekaniği (2012).
- [13] Sebastian Schneider, Steffen Marx. Design of railway bridges for dynamic loads due to high-speed traffic. (2018) Institute of Concrete Construction, Leibniz University Hannover, Appelstrasse 9a, 30167 Hannover, Germany.

- [14] Chongjie Kang, Sebastian Schneider, Marc Wenner, Steffen Marx. (2018): Development of design and construction of high-speed railway bridges in Germany. Institute of Concrete Construction, Leibniz University Hannover, Appelstrasse 9a, 30167 Hannover, Germany.
- [15] Fernando Marques, José A. F. O. Correia, Abílio M. P. de Jesus, Álvaro Cunha, Augusto A. Fernandes. (2018): Fatigue analysis of a railway bridge based on fracture mechanics and local modelling of riveted connections.
- [16] A. Doménech, M. D. Martínez-Rodrigo, A. Romero, P. Galvín. (2016) On the basic phenomenon of soil-structure interaction on the free vibration response of beams: Application to railway bridges.
- [17] M.D.Martínez-Rodrigo. (2018): Effect of soil properties on the dynamic response of simply-supported bridges under railway traffic through coupled boundary element-finite element analyses. Universitat Jaume I, Department of Mechanical Engineering and Construction, Avda. Sos Baynat s/n, 12071 Castellón, Spain.
- [18] A. Romero, M. Solís, J. Domínguez, P. Galvín. (2013) : Soil structure interaction. Soil Dynamics Engineering, Volume 47 , April 2013 , Pages 108-116.
- [19] Kodai Matsuoka, Andrea Collina, Masamichi Sogabe. (2017): Dynamic simulation and critical assessment of a composite bridge in high-speed railway. Procedia Engineering , Volume 199, 2017, Pages 3027-3032
- [20] Anubhav Shiva, Rajesh Purohit, R. S. Rana, Dinesh Kumar Koli (2017): Noise and Vibration Emissions of Railway Bridges. Materials Today: Proceedings, Volume 4, Issue 2, Part A, 2017, Pages 3745-3753.
- [21] Tomáš Plachýa, Michal Poláka, Pavel Ryjáčekb (2017) : Assessment of an Old Steel Railway Bridge Using Dynamic Tests. X International Conference on Structural Dynamics, EUROLYN 2017.
- [22] Elias G. Dimitrakopoulos, Qing Zeng (2015) : A three-dimensional dynamic analysis scheme for the interaction between trains and curved railway bridges. Computers & Structures , Volume 149, March 2015, Pages 43-60.
- [23] Chengbiao Cai, Qinglie He, Shengyang Zhu, Wanming Zhai, Mingze Wang (2019) : Dynamic interaction of suspension-type monorail vehicle and bridge: Numerical simulation and experiment. Mechanical Systems and Signal Processing 118 (2019) 388–407.
- [24] André Paixão, Eduardo Fortunato, Rui Calçada (2014): Transition zones to railway bridges: Track measurements and numerical modelling. Engineering Structures , Volume 80, 1 December 2014, Pages 435-443.

- [25] Nan Zhang, He Xia, Weiwei Guo, Jiawang Zhan, Yanmei Cao (2010): Vehicle-bridge interaction analysis of heavy load railway Proce Engineering, Volume 4, 2010, Pages 347-354.
- [26] Nan Zhang, Yuan Tian, He Xia (2016) : A Train-Bridge Dynamic Interaction Analysis Method and Its Experimental Validation. Engineering, Volume 2, Issue 4, December 2016, Pages 528-536.
- [27] Moreno Delgado, S. M. dos Santos R.C. (1997) : Modelling of railway bridge vehicle interaction of high-speed tracks. Computers & Structures, Volume 63, Issue 3 , May 1997, Pages 511-523.
- [28] D. Ilavská, “Deformationsbeobachtung einer Eisenbahnüberführung mit Tachymetrie und Laserscanning – Vergleich der Ergebnisse und Methoden”, BSc Thesis, Karlsruhe University of Applied Sciences (HsKA), Karlsruhe, Germany, 2012.
- [29] Hakan Guler, Tarik Pamir Akyol "A Genetic Algorithm Based Decision Support System for Railway Track Maintenance and Renewal Management" ,The Third International Conference on Soft Computing Technology in Civil, Structural and Environmental Engineering, 3-6 September,2013,Cagliari, Sardinia, Italy.
- [30] PLAXIS, User Manual. 2D version8, (Edited byBrinkgreeve, R.J.B.), Delft University of Technology&PLAXIS b.v., The Netherlands,2002.
- [31] Prasenjit Debnath, Ashim Kanti Dey. (2017): Bearing capacity of geogrid reinforced sand over encased stone columns in soft clay. Geotextiles and Geomembranes, Volume 45, Issue 6, December 2017, Pages 653-664.
- [32] A. R. Estabragh, M. Naseh, A. A. Javadi. (2014): Improvement of clay soil by electro-osmosis technique. Applied Clay Science, Volume 95, June 2014, Pages 32-36.
- [33] J.Hołowaty, Toughness tests on steels from old railway bridges. (2017): Procedia Structural Integrity, Volume 5, 2017, Pages 1043-1050.
- [34] TS 1500 (2000) İnşaat mühendisliğinde zeminlerin sınıflandırılması standardı.
- [35] Gündüz M. (2008) ‘‘Tarihi Uzunköprü’nün geoteknik yaklaşımla performans kontrolü ve rehabilitasyon önerileri.’’ Yüksek lisans tezi. İstanbul Kültür Üniversitesi.
- [36] Sert S., Önalp A., Özocak A., (2007) “Derin yumuşak kil üzerinde köprü ayağı temeli.” 1. Köprü ve Viyadükler Sempozyumu, Bildiriler Kitabı, sayfa: 150-160. Antalya.

EKLER

EK 1: Plaxis Ekranında Hesap ilerleyişi



EK 2 : Weiher Köprüsu Fotografları



Foto 1. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



Foto 2. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



Foto 3. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



Foto 4. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



Foto 5. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



Foto 6. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



Foto 7. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



Foto 8. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



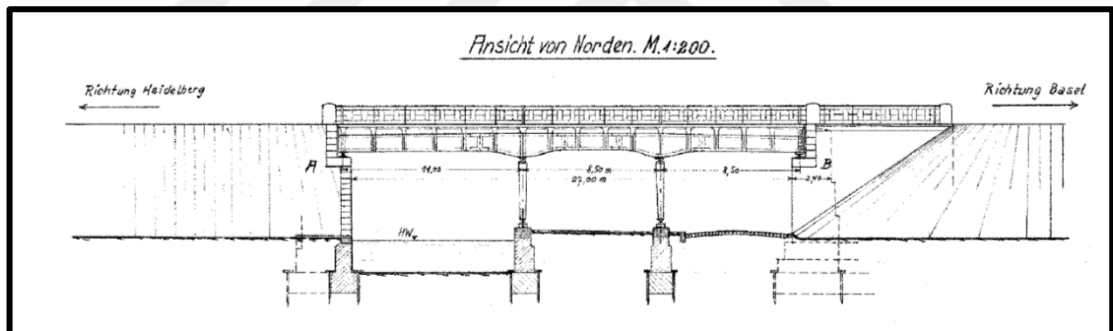
Foto 9. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



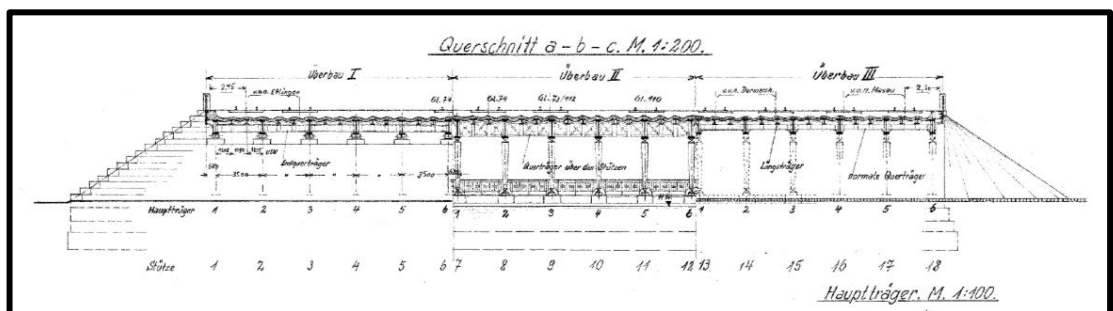
Foto 10. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



Foto 11. Weiherfeld Köprüsü [3-29]



Resim 1. Weiherfeld Köprüsü [28]



Resim 2. Weiherfeld Köprüsü [28]

ÖZGEÇMİŞ

Koray Şen 26.10.1966 yılında Üsküdar'da doğmuştur. İlköğrenimini Ümraniye Esenevler ilkokulunda, orta öğrenimini Ümraniye İstiklal Ortaokulu'nda ve Lise öğrenimini Üsküdar/Ümraniye Lisesi'nde tamamlamıştır. Yükseköğrenimine Anadolu Üniversitesi Fen-Edebiyat Fakültesi İstatistik bölümünde 1 yıl devam etmiş, daha sonra İ.T.Ü. Sakarya Mühendislik Fakültesi İnşaat Mühendisliği Bölümünü 1989 yılında tamamlamıştır. 1994 yılında girmeye hak kazandığı Sakarya Üniversitesi Geoteknik A.B.D.'de Lisansüstü eğitime çeşitli nedenlerle devam edememiş fakat tekrar 2011 yılında başladığı yüksek lisans eğitimini halen devam ettirmektedir. Koray Şen 2001 yılında kendi adına kurduğu firmasında meslek yaşamına devam etmektedir.