

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**TÜNEL KAZISI NEDENİYLE MEYDANA GELEN ZEMİN
OTURMALARI VE BUNLARIN MEVCUT BİR YAPIYA
OLAN ETKİSİ**

İnşaat Mühendisi Ali BULUT

**FBE İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Bilge DORAN (YTÜ)

İSTANBUL, 2007

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	viii
ÖNSÖZ	ixx
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1 GİRİŞ	1
1.1 Tünel Açma Metotları	1
1.2 Oturma Tayini	1
1.3 Hasar Tahmini	3
1.4 Müşterek Oturma ve Hasar Tayini	6
2 TÜNEL AÇILMASI NEDENİYLE OLUŞAN OTURMALAR ve YAPI HASARI İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR	8
2.1 Giriş	8
2.2 Sonuçların Derlenmesi	8
2.2.1 Tünel Açılmasından Dolayı Oluşan Oturmalar	8
2.2.2 Yapı Hasarı	10
2.3 Nümerik Metotlar	11
2.3.1 Tünel Oturmaları	11
2.3.2 Zemin-Yapı Analizleri	14
2.4 Sonuçlar	16
2.5 Nümerik Zemin Modelinin Oluşturulması: Sonlu Eleman Ağ Sisteminin Oluşturulması	16
2.5.1 Tünelin Oluşturulması	17
3. ÖRNEK YAPI	19
3.1 İncelenen Yapı ile İlgili Bilgiler	19
3.2 Oturma Analizleri	21
3.2.1 Kullanılan Modeller ve Parametreler	22
3.3 Yapısal Çözümleme	24
3.3.1 Düğüm Noktası ve Elemanlar	24
3.3.2 Toplam Sistem Serbestlik Derecesi	25
3.3.3 Rijit Diyafram Hareketi	26
3.3.4 Çubuk Eleman Uç İç Kuvvetleri ve Pozitif Yönleri	27
3.3.5 Yüzeysel Elemanlar İçin Gerilme ve İç Kuvvetler ve Pozitif Yönleri	27
3.4 Yapısal Modelleme	28
3.4.1 Zemin Oturmalarının Belirlenmesi	37

4	DEĞERLENDİRME ve İRDELEMELER.....	50
4.1	Yer Değiştirmeler	50
4.2	Yapısal Analizde Hasar Görmesi Beklenen Taşıyıcı Elemanlar	54
4.2.1	Yatay Taşıyıcılar.....	54
4.2.2	Düşey Taşıyıcılar	56
4.3	Yapının Tümü İçin Beklenen Hasar Durumu	58
5	SONUÇLAR	60
	KAYNAKLAR.....	61
	ÖZGEÇMİŞ.....	64

SİMGE LİSTESİ

S	Tünel yüzeyindeki çökme değeri
S_{max}	Tünel yüzeyindeki maksimum çökme değeri
i	Tünel çukuru eğrilik ifadesi
K^*	Tünel oturma eğriliğini belirleyen zemin sabiti
Z	Tünel derinliği
x	Tünel orta aksından itibaren yanal mesafe
D	Tünel çapı
V_S	Tünel açılması nedeniyle birim uzunluk boyunca yüzeyde oluşan hacim kaybı
V_L	Tünel hacim kaybı oranı
V_0	Tünel hacmi
ω	Yapıda bir doğrultuda iki uç nokta arasındaki dönme değeri
β	Açısal deformasyon değeri
Δ	Sehim değeri
P	Yük ifadesi
H	Yapı yüksekliği
L	Yapı uzunluğu
E	Elastisite modülü
G	Kayma modülü
I	Atalet momenti
ϵ_b	Maksimum çekme birim deformasyonu
ϵ_d	Maksimum kayma birim deformasyonu
ϵ_h	Maksimum yatay deformasyon
γ	Zeminin birim ağırlığı
δ	Tünel merkeziyle tünel yüzeyindeki herhangi bir nokta arasındaki açısal yer değiştirme
r	Tünel çevresindeki noktaların merkezle yaptıkları açı
s_u	Zeminin kayma mukavemeti
N^*	Zeminin stabilite indeksi
σ_v	Tünel merkezinde kazı öncesi mevcut yük değeri
n	Tünel kaplaması tarafından taşınan yük oranı
ρ_{max}	Bir kesite yerleştirilebilecek maksimum donatı oranı

KISALTMA LİSTESİ

BMP	Building Measurement Point
EPB	Earth Pressure Balance
ISE	Institute of Structural Engineers
MCC	Modified Cam Clay
NATM	The New Australian Tunneling Method
TBM	Tunnel Boring Machine

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Tünel kazısı yapılan yüzey ve parametreleri	2
Şekil 1.2 Hasar tespiti için kullanılan parametreler	4
Şekil 1.3 Burland ve Wroth'un yapı idealizasyonu	4
Şekil 1.4 Hasar dağılımları	6
Şekil 2.1 Oturma profilleri	9
Şekil 2.2 Sonlu eleman ağ tipleri	17
Şekil 2.3 Tünel kazı işlemi aşamaları	17
Şekil 2.4 Tünel kazı işleminin nümerik olarak modellenmesi	18
Şekil 3.1 Örnek yapı	19
Şekil 3.2 Guselerin yerleşimi	21
Şekil 3.3 3 Boyutlu sonlu elemanlar modeli	22
Şekil 3.4 Sistem eksenleri ve eleman eksenleri	24
Şekil 3.5 Düğüm noktaları serbestlikleri ve mesnet şartları	25
Şekil 3.6 Diyafram hareketi	26
Şekil 3.7 Eksenel kuvvet ve burulma momenti	27
Şekil 3.8 (1-3)Düzleminde etkiyen iç kuvvetler	27
Şekil 3.9 (1-2)Düzleminde etkiyen iç kuvvetler	27
Şekil 3.10 Eleman tipleri	28
Şekil 3.11 Alan elemanları için tanımlı iç kuvvetler	28
Şekil 3.12 Alan elemanları için tanımlı gerilmeler	28
Şekil 3.13 Sonlu eleman tipleri	29
Şekil 3.14 Izgaraların atanması	29
Şekil 3.15 Plan	30
Şekil 3.16 Elevasyon	30
Şekil 3.17 Malzeme girdileri	30
Şekil 3.18 Kesit özellikleri	31
Şekil 3.19 Temel modeli	31
Şekil 3.20 Bodrum kat planı	32
Şekil 3.21 (a) Zemin kat planı	32
Şekil 3.21 (b) Normal kat planı	33
Şekil 3.22 Elevasyon ve düşey taşıyıcılar	33
Şekil 3.23 Mevcut duruma ait 3D model	34
Şekil 3.24 Mevcut duruma ait deformasyonlu durum	35
Şekil 3.25 Temel plağı S11 gerilme durumu	35

Şekil 3.26 Temel plağı S22 gerilme durumu.....	36
Şekil 3.27 Temel plağı S12 gerilme durumu.....	36
Şekil 3.28 3D zemin-yapı modeli ve deformasyon durumu.....	37
Şekil 3.29 Farklı kesit ve aşamalar için deformasyon durumları	38
Şekil 3.29 Farklı kesit ve aşamalar için deformasyon durumları (devamı).....	39
Şekil 3.30 Oturma yüzeyi	39
Şekil 3.31 Temel plağı sonlu eleman ağı.....	40
Şekil 4.1 Bina yüzeyine yerleştirilen prizmaların lokasyonları	53
Şekil 4.2 Bodrum kat kirişleri	55
Şekil 4.3 Zemin kat kirişleri	55
Şekil 4.4 Kat 1 kirişleri	56
Şekil 4.5 Düşey taşıyıcılar	57
Şekil 4.5 Düşey taşıyıcılar(devamı)	58
Şekil 4.6 Örnek yapı için hasar dağılımları	59

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1a TBM için sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme parametreleri	23
Çizelge 3.1b Zemin için kullanılan parametreler	23
Çizelge 3.2 Deformasyon ölçümleri	23
Çizelge 3.3 Temel reaksiyonları	34
Çizelge 3.4 Taban düğüm noktalarına ait yerdeğiştirmeler	41
Çizelge 3.4 Taban düğüm noktalarına ait yerdeğiştirmeler	42
Çizelge 3.4 Taban düğüm noktalarına ait yerdeğiştirmeler	43
Çizelge 3.4 Taban düğüm noktalarına ait yerdeğiştirmeler	44
Çizelge 3.4 Taban düğüm noktalarına ait yerdeğiştirmeler	45
Çizelge 3.4 Taban düğüm noktalarına ait yerdeğiştirmeler	46
Çizelge 3.4 Taban düğüm noktalarına ait yerdeğiştirmeler	47
Çizelge 3.4 Taban düğüm noktalarına ait yerdeğiştirmeler	48
Çizelge 3.4 Taban düğüm noktalarına ait yerdeğiştirmeler	49
Çizelge 4.1 Yer değiştirmeler	50
Çizelge 4.1 Yer değiştirmeler	51
Çizelge 4.1 Yer değiştirmeler	52
Çizelge 4.1 Yer değiştirmeler	53
Çizelge 4.2 Yüzey okumaları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması	54
Çizelge 4.3 ε - β değerleri	59

ÖNSÖZ

Yapılarda can ve mal güvenliğini tehdit eden önemli bir unsur da zeminde meydana gelen hareketlerdir. Çeşitli çevresel faktörler ve kazı çalışmaları dolayısıyla zemin stabilitesi değişirken, üstünde yer alan yapılarda da değişimler meydana gelir. Bu değişimler bazen yapının taşıyıcı sistemini etkilemeyecek kadar küçük bazen de yıkımlara, can ve mal kayıplarına neden olacak kadar büyük olabilirler. Bu hasar etkisini belirleyen başlıca faktörler; yapı rijitliği(yapının enerji yutma kapasitesi), zemin rijitliği, zemin sürekliliği, iç kuvvetlerde meydana gelen değişimlerin büyüklüğü, yapının taşıyıcı sistemi, işçilik kalitesi vs. gibi çeşitlilik arz edebilir.

Bu çalışmada amaç, tünel açılması dolayısıyla zeminde meydana gelen deformasyonların üstyapıya olan etkilerini araştırmaktır. Bu doğrultuda altından tünel hattı geçen ve bu tünel hattının açılması sırasında gözlenebilir yapısal hasarlara maruz kalan kusurlu bir bina ele alınmıştır. Çalışma süresince binada oturma ölçümleri yapılmış, taşıyıcı sistemin rölevesi çıkarılmış ve yapısal kusurlar tespit edilmiştir. Zemin araştırmaları ışığında da zemin durumu tespit edilmiştir.

Yapı davranışını elde etmek için nümerik analizler yapılmıştır. Nümerik analizlerde sonlu elemanlar yöntemi tercih edilmiş, yapı ve zemin 3 boyutlu olarak ayrı ayrı modellenmiştir. Geliştirilen sonlu elemanlar modelinde üstyapı mevcut yükler altında analiz edilerek temele aktardığı yükler belirlenmiş ve bu yükler temelin yer aldığı 3 boyutlu bir zemin sonlu elemanlar modeline aktarılarak ikiz tünellerin açılması ile temelde oluşan deformasyonlar bulunmuştur. Bulunan deformasyonlar ile üstyapı yeniden analiz edilmiş ve davranışı saptanmıştır. Modellerin doğruluğunun tespiti bakımından son bölümde ölçülen deplasmanlarla modellerden elde edilen değerler karşılaştırılmış ve yakınsaklık sağlanmıştır. Bu aşamadan sonra yapıda gerek genel gerek çeşitli elemanlar bazında hasar durumları belirlenmiştir.

Bu tezin hazırlanmasında benden yardımlarını esirgemeyen ve bana yol gösteren başta tez danışmanım Sn. Yrd. Doç. Dr. Bilge DORAN 'a ve zemin ile ilgili model analizlerin gerçekleştirilmesinde katkılarından dolayı Sn. Yrd. Doç. Dr. Mehmet BERİLGEN 'e ve tezin yazımında büyük destek gördüğüm İnş. Müh. Enis UZAY'a teşekkür ederim.

Mayıs 2007

Ali BULUT
İnşaat Mühendisi

TÜNEL KAZISI NEDENİYLE MEYDANA GELEN ZEMİN OTURMALARI VE BUNLARIN MEVCUT BİR YAPIYA OLAN ETKİSİ

Ali BULUT

İnşaat Mühendisliği, Yüksek Lisans Tezi

Günümüzde zemin-üstyapı ilişkisinin araştırılması önemli bir çalışma alanı oluşturmaktadır. Gerçekleştirilen tünel kazı çalışmaları zeminde şekil değişikliğine ve dolayısıyla üstyapılarda hasara neden olmaktadır. Bu nedenle yapılarda meydana gelecek hasar düzeylerinin belirlenmesi oldukça gerekli bir hal almıştır.

Bu çalışmada, İstanbul ili, Esenler ilçesinde gerçekleştirilen tünel kazı çalışmaları sırasında örnek olarak belirlenmiş kusurlu bir yapıda oturma analizleri ile elde edilen deformasyonlar, aletsel yüzey okumaları ile karşılaştırılmıştır. Nümerik model hazırlanırken öncelikle zemin modeli oluşturulmuş ve yapı yükleri dikkate alınarak zeminde meydana gelen oturma yüzeyi Plaxis 3D Tunnel programı ile belirlenmiştir. Daha sonra oturma analizlerinden hareketle yapı temelinde, temel sonlu eleman ağına rastlayan noktalardaki oturmalar üst yapıya yer değiştirme yükü şeklinde etki ettirilmiştir. Zemin-üstyapı ilişkisini temsil eden model bu şekilde oluşturulduktan sonra üst yapı analizlerinde ETABS programı ile yapıdaki yer değiştirmeler hesaplanmış ve aletsel okumalarla karşılaştırılmıştır. Üst yapıda oluşan yer değiştirme nedeniyle yapıdaki hasar durumu belirlenmiş ve yapının hasar tespiti yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: Zemin-üstyapı ilişkisi, üstyapı, çerçeve sistem, tünel açılması, oturma yüzeyi, hasar durumu.

SOIL MOVEMENTS INDUCED BY TUNNELING AND THEIR EFFECTS ON EXISTENT BUILDING

Ali BULUT
Civil Engineering, M.S. Thesis

Recently, assessment of soil-structure interaction has become in a very popular and important research subject. Excavations in soil cause to deformations and also causes to damage in superstructures. Trough this fact, the need of the determination of damage level of the structures is arising.

In this study; displacements, estimated by a settlement analysis of a damaged building located in İstanbul Province, Esenler District, were compared with the measured displacements occurred due to tunneling. When preparing numerical model first, the soil model was developed, then the settlement surface, consisted due to effected structural loads to the soil, was estimated by a Plaxis 3D Tunneling program. Later troughs the settlement analysis, the displacements were effected on the nodes of the foundation meshed into finite elements as a displacement loads. In this way soil-structure interaction was developed. Then with the program ETABS, displacements of the structure were computed and compared with the measured displacements. In this way, the case of damage level, due to displacement effect on the structure was determined. Last, the damage assessment of the structure was prepared.

Keywords: Soil-structure interaction, superstructure, frame sytem, tunneling, tunneling effect, settlement surface, damage status.

1. GİRİŞ

1.1 Tünel Açma Metotları

NATM (The New Austrian Tunneling Method) metodu dışındaki tüm tünel açma metotları, çalışanları ve kazı makinelerini korumak için çeşitli geçici zemin destekleri kullanırlar. Bu destekler muhafaza şeklinde olup açık ya da kapalı yüzlü olabilirler. Açık yüzlü muhafazalar ancak sert killer gibi kendi stabilitesini koruyabilen zeminlerde kullanılırlar (Augrade, 1997).

Zeminin stabilitesini yitirdiği bölgelerde ise, tünel yüzeyini desteklemek amacıyla açık muhafazalardan kapalı muhafazalara geçmek gereklidir. Basınçlı havayla yapılan çalışmalarda da çamur muhafazaları arkasında, basınçlı bölmelerden oluşan özel muhafazalar kullanılır. Bunlara pompalanan sıvı sayesinde tünel yüzeyinin desteklenmesi sağlanır. EPB (Earth Pressure Balance) makineleri de çamur muhafazalarına destek sağlamak amacıyla kullanılırlar. EPB, ucundaki açıklıklardan alınan kazının, kapalı bir bölmeye geçmesini sağlayan dönel, kesici-delici uç barındırır. Bu kapalı bölme kazı boyunca dolu kalarak yüzeyden gelen basınca karşı bir toprak basıncı sağlar.

NATM metodu muhafazasız gerçekleşen bir inşaat metodudur. Bu metot yalnızca yumuşak zeminlerde uygulanır. Yöntemde, zemin için gereken desteklerin minimum kullanılması amaçlanmıştır. Burada kazı sonrası, iç kaplama öncesi deformasyonlara izin verilir, zemin kendini tutmaya çalıştıkça tekrar tekrar basınca maruz kalır ve bu yüzden geçici kaplamanın yerini tayin etmek için zemin hareketlerinin dikkatle izlenmesi gereklidir.

Tüneller açıldıktan sonra aşağıdaki metotlardan herhangi biriyle kaplama yapılabilir:

- Geçici çelik kemer elemanları, yerinde dökülen betonla kaplanan çelik plakalar ile
- Kazı yüzeyinin harç ile sağlamlaştırdıktan sonra betonarme kaplama elemanları ile
- Muhafaza işlemi sırasında yerinde betonarme elemanların eşzamanlı inşa edilmesi ile
- Kaya ankrajlı çelik hasır üzerine püskürtme beton uygulanması ile

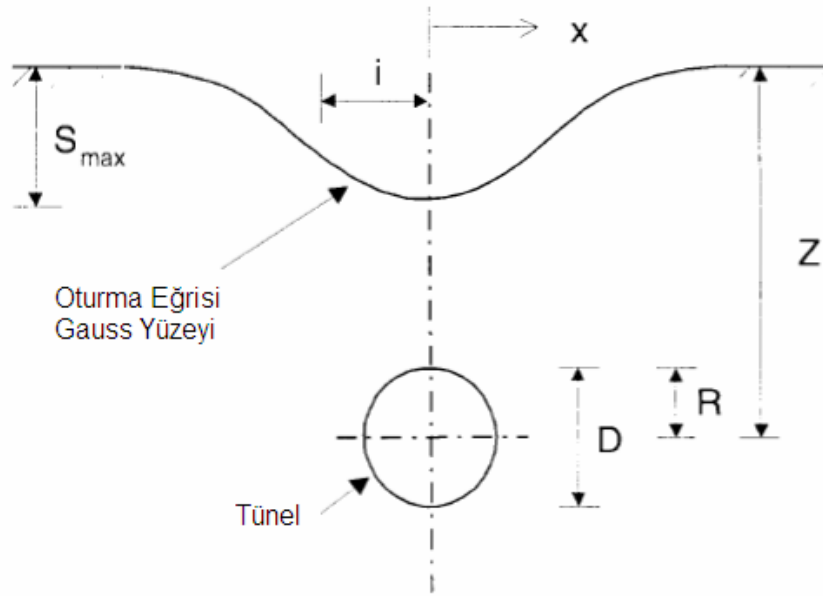
1.2 Oturma Tahmini

Pratikte tünel açılmasına bağlı olarak yapılarda hasar meydana getiren yüzey oturmaları ayrı işlemlerle tahmin edilir. İlk olarak tünel açılmasına bağlı olarak serbest zeminde oturma değerleri hesaplanır, daha sonra bu oturma değerleri bina modellerine uygulanır (Augrade,

1997). Bu işlemlerin detayları Attawell(1978), Rankin(1988), İnşaat Mühendisliği Odaları (ISE-1989), New ve O'Reilly(1992), Mair(1996) gibi araştırmacılar tarafından geliştirilmiş olup günümüzde uygulamada kullanılmaktadır.

Ani oturmalar genelde iki nedenden kaynaklanır;

- Malzemenin tünel eksenini boyunca boşluğa hareketinden dolayı oluşan hacim kaybından, bu genellikle *kuyruk kaybı* olarak adlandırılır.
- Malzemenin tünel ağzına taşınma hareketinden, bu da *yüzey kaybı* olarak nitelendirilir.



Şekil 1.1 Tünel kazısı yapılan yüzey ve parametreleri (Augrade, 1997)

Tünel açıldıktan sonra, zemin konsolide oldukça oturmalar devam eder. Bununla birlikte tünel açılmasına bağlı olarak meydana gelen hasarın araştırılmasında, konsolidasyondan dolayı oluşan oturmalar genellikle ihmal edilir (Ward ve Pender,1981).

Yumuşak zeminlerde, tünelden dolayı, serbest zeminde meydana gelen oturmaları hesaplamak için kabul görmüş en genel yöntem düşey yer değiştirmelerin enine kesitinin tahminidir (Şekil 1.1). Oturma eğrisi (Peck, 1969) enkesiti aşağıdaki simetrik formülle ifade edilebilir;

$$S = S_{max} e^{\frac{-x^2}{2i^2}} \quad (1.1)$$

Burada S_{max} tünel aksı üzerinde yer alan maksimum oturma değeri, x aks üzerinden itibaren yanal mesafe değeridir. Oturma çukurunun genişliği, merkezden eğrinin büküm noktasına olan mesafesini belirten " i " parametresiyle belirlenir. Çukur genişlik ifadesi i , tünel açma metoduna bağlı olmayıp (Mair 1993; Mair 1996) zemin durumuna bağlı olarak belirlenebilir. i parametresinin belirlenmesi için çeşitli yaklaşımlar mevcuttur (New ve O'Reilly 1992, Gunn 1993) ancak pratikte,

$$i = K^* \times Z \quad (1.2)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada killi zeminler için $K^*=0,5$ ve kohezyonsuz zeminler için de $K^*=0,25$ alınmaktadır (Rankin 1988). Birim uzunluk boyunca oturma yüzeyindeki hacim kaybı (1.1) denkleminin entegrasyonu ile,

$$V_s = \sqrt{2\pi i} S_{max} \quad (1.3)$$

şeklinde elde edilir. Tünel kazısı sonucunda beklenen hacim kaybı ifadesi:

$$V_L = \frac{V_s}{V_0} \times 100 \% \quad (1.4)$$

bağıntısıyla hesaplanabilir. Bu bağıntıda V_0 tünel hacmini ifade etmektedir. (1.3) ve (1.4) bağıntılarının yardımı ile de S_{max} ifadesi aşağıdaki hali alır;

$$S_{max} = \frac{V_L \pi D^2}{400 \sqrt{2\pi i}} \approx \frac{V_L D^2}{319 i} \quad (1.5)$$

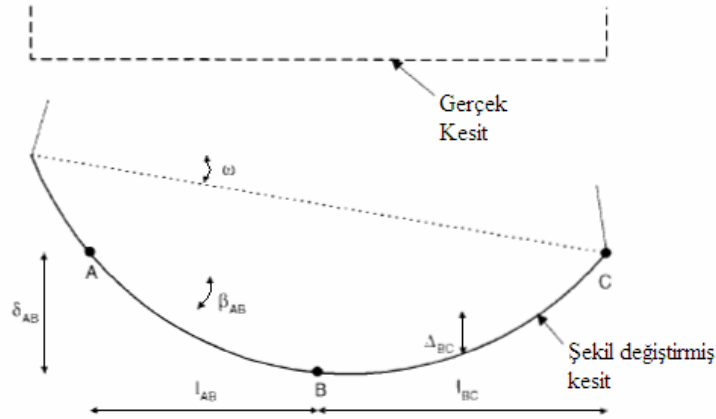
Hacim kaybının sayısal değeri zemin şartlarına ve tünel açma metoduna bağlıdır. Rijit ve aşırı-konsolide zeminlerde örnek olarak Londra Kili'nde bu değer yaklaşık 2% civarında olduğu belirlenmiştir (Attawell 1986, Mair 1996).

Genellikle kazı aksı boyunca oturmaların boyuna profillerinin kümülatif olasılık eğrisi formunu aldığı varsayılır. Bu eğri tünel kazısıyla beraber hareket eder. Bu varsayım Attawell ve Woodman (1982) tarafından tünel önündeki her noktada yer değiştirme ve gerilmeler için ifadeler geliştirilerek arazi verileriyle karşılaştırılmıştır. Oturma formları kazının orta aşamalarında belirlenebilir.

1.3 Hasar Tahmini

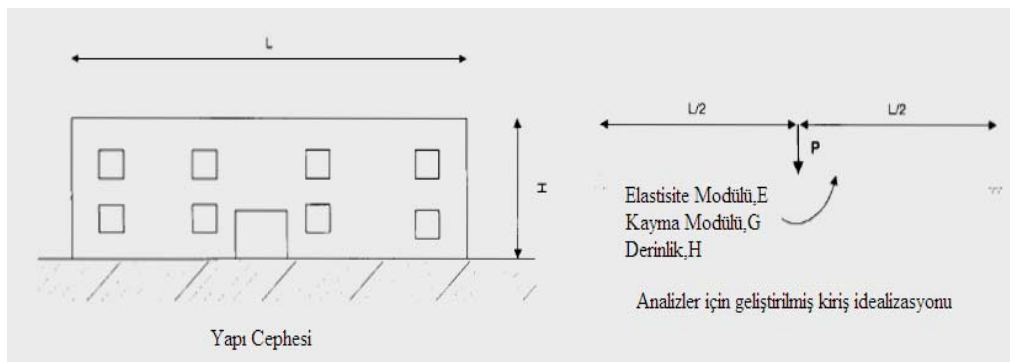
Oturmalar belirlendikten sonra genellikle idealize edilmiş yapıya direkt olarak uygulanır. Literatürde yapılan çalışmalarda, diğer yapı tipleri için de kritik durumlar söz konusu olsa da,

genellikle yığma yapılar ele alınmaktadır. Bunun nedeni; oturmalarından meydana gelen çekme gerilmelerinin, yığma yapılarda daha belirgin ve kritik hasar durumuna neden olmasıdır. Bu durum da gerek gözlem gerekse veri toplama açısından avantaj teşkil etmektedir. Hasar tahmininde genellikle deformasyon değerleri ve çatlakların seviyesi baz alınır. Hasarın sayısal olarak belirlenmesi oldukça güçtür ve bu nedenle gözlemlenebilir veriler ve ölçülebilir çatlaklar sağlıklı tespit için güvenilir etkenlerdir (Augrade, 1997).



Şekil1.2 Hasar tespiti için kullanılan parametreler (Augrade, 1997).

Oturmalara bağlı yapılar da oluşan hasarlar uzun vadede, yapı kendi ağırlığı altında konsolidasyon nedeniyle ya da kısa vadede tünel açılması nedeniyle olabilir. 1950’lerde araştırmacılar; Skempton ve McDonald (1956) ve Polshin ve Tokar (1957) oturmaya maruz kalan yapılar da hasar sınırlandırıcı olarak çeşitli ölçülebilir parametreleri kullanmışlardır. Skempton ve McDonald, yapıda iki nokta arası doğrunu parçasının dönme değeri olarak tanımladıkları “ β ” *açıs al deformasyon* parametresini ele almışlardır. (Şekil 1.2) Polshin ve Tokar ise aynı ilkelerle hareket etmiş ancak artı olarak, çatlama durumunu ifade eden *limit çekme deformasyonu* “ ϵ_{crit} ” değerini ele almışlardır.



Şekil 1.3 Burland ve Wroth'un yapı idealizasyonu (Augrade, 1997)

Burland ve Wroth (1975) çalışmalarında, daha önceki çalışmalarda ele alınan yapı hasar durumlarını karşılaştırarak analitik bir açıklama getirmiştir. Şekil 1.3'te görüldüğü üzere yapıyı elastik basit mesnetli derin kiriş gibi idealize etmişler ve kirişte maksimum çekme birim deformasyonu ile ölçülebilir bir değer olan sapma oranı “ Δ/L ” arasında kinematik bir ilişki kurmuşlardır. Bu yöntem, ortasından “P” tekil yüklü, “H” yüksekliğinde, “I” atalet momentine sahip ve “L” uzunluğundaki elastik, derin kirişin ortasındaki sehim değeri olan Δ değerini veren Timoschenko (1957)’nin geliştirdiği şu ifadeden yola çıkılarak uygulanmıştır;

$$\Delta = \frac{PL^3}{48EI} \left[1 + \frac{18EI}{L^2 HG} \right] \quad (1.6)$$

Bu yaklaşımda elastisite modülü ve kayma modülü kiriş boyunca sabit alınmıştır. Eğilme ve kesme durumu göz önüne alındığında, yapı ağırlığı olarak ortasından P yüklü ve Δ sehim yapan kiriş için yukarıda verilen denklem, maksimum çekme ε_b ve maksimum kayma birim deformasyonları ε_d ifadeleri cinsinden aşağıdaki gibi yazılabilir;

$$\frac{\Delta}{L} = \varepsilon_b \frac{L}{12} \left[1 + \frac{18EI}{L^2 HG} \right] \quad (1.7)$$

$$\frac{\Delta}{L} = \varepsilon_d \left[1 + \frac{L^2 HG}{18EI} \right] \quad (1.8)$$

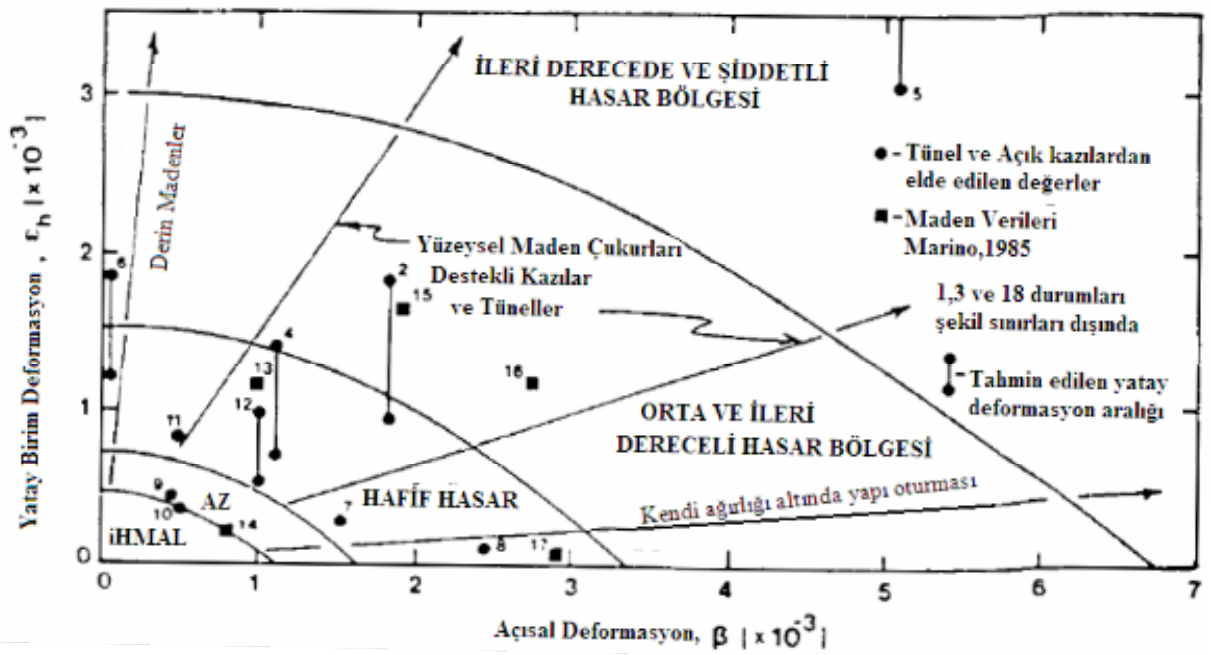
(1.7) ve (1.8) bağıntılarında tarafsız eksenin kiriş yüksekliği boyunca devam ettiği varsayılmıştır. Yapı temelde farklı noktalarda farklı sehim ve eğilme deformasyonlarına maruz kalacağından L uzunluğundaki yapının farklı etkiye maruz kalan bölümlerinin ayrı ele alınarak incelenmesi de daha doğrudur. İncelenen yapıda hesap edilen en büyük ε_b ve ε_d değerleri yapının sınırlandırıcı parametreleri olarak ele alınır ve sıklıkla 0.05% değeriyle kabul edilen, çatlamanın başlama anını ifade eden kritik çekme birim deformasyonu ε_{crit} değeri ile karşılaştırılır (Boscardin ve Cording 1989, Mair 1996).

Burland ve Wroth’un bu çalışması oldukça basit olarak görünmesine karşın çeşitli malzeme ve geometri durumları için günümüze kadar sıklıkla başvurulmuş bir yöntem olmuştur. Kerisel (1975) ise Burland ve Wroth’un geliştirdiği modele uygulanması zor olmakla beraber, yığma yapılarda hasar belirleyici faktörler olan büyük pencere boşluklarının etkisini de incelemiştir.

Boscardin ve Cording (1989) adlı araştırmacılar da Burland ve Wroth’un çalışmasını geliştirerek oturmadan dolayı hasar oluşan yapılardaki ölçümleriyle, yatay şekil değiştirme değeri arasında ilişki kurmuştur (Şekil 1.4). Maksimum çekme deformasyonu, eğilmeden

dolayı oluşan birim deformasyonla yatay birim deformasyonların bileşkesinden ortaya çıkar. Boscardin'in çalışması, tünel açılması sırasında Londra Waterloo İstasyonu'ndaki yapılarda hasar durumlarını araştırmak için kullanılmıştır.

Geddes (1992), Boscardin'in çalışmalarında zemindeki yatay deformasyon etkisinin direkt olarak sisteme uygulanmasını zeminden yapıya geçiş kısmında deformasyonda azalma olduğu hususundan yola çıkarak eleştirmiştir. Bu da yapı-zemin etkileşimi konusundaki belirsizlikleri sorgulamaktadır.



Şekil 1.4 Hasar dağılımları (Boscardin ve Cording, 1989)

1.4 Müşterek Oturma ve Hasar Tahmini

Önceki bölümlerde detaylı olarak anlatılan çalışmalarda en büyük eksiklik, oturma yüzeylerinin araştırılmasında yapı rijitliğinin ve yapı ağırlığının dikkate alınmamasıdır. Burland (1977) tarafından, yapının özelliklerinin, oturma yüzeyi üzerinde esaslı etkisinin olduğu şeklinde yorumlanmış ve bu husustaki eksikliğin altı çizilmiştir.

Daha sonraki çalışmalarda özellikle Attawell ve Yates (1986) ve Dulacska (1992) tarafından zemin oturma yüzeyinin, yapı hasar derecesi ile az ilişkili olduğu hususuna değinilmiştir. Mair (1993) de pratikte yapı hasarının, rijitliğin ihmal edilmesiyle birlikte olduğundan daha fazla tahmin edilmesine eleştiride bulunmuş, üç boyutlu ve non-lineer analizlerin gerekliliğine vurgu yapmıştır. Benzer bir ifade de Gunn (1993) tarafından belirtilmiştir.

Zemin ve yapı arasındaki ilişkiyi irdeleyen çok sayıda çalışma mevcuttur. Hellings ve Frischmann (1994), Londra’da tünel kazısı sırasında, tünel bölgesi üstünde yer alan bir malikanede hasar durumunu incelemiş, yapı ve zemin hareketlerini iki kısımda izlemişlerdir. İlk kısımda tünel hattının doğrudan yapının altından geçmesi durumunda yapı için oturmalarla ilgili olarak ileri derecede hasar seviyesi tespitinde bulunmuşlar ve yaklaşık iki yıl boyunca çalışmaları gözlemlemişlerdir. İkinci kısımda tünelin inşaat safhasında ise oturma yüzeyinin öngördükleri dışında, yapının varlığına rağmen daha geniş ve yassı şekilde olduğunu tespit etmişlerdir. Daha sonra ise ikinci tünel safhası için kompleks bir araştırma yapmışlar ve ilk kısımda tünel açıldıktan sonraki verileri toplayarak nümerik model geliştirmişlerdir. Nümerik modelde zemin, tünelin açılmış hali ile modellenmiştir. Oturma yüzeyini belirleyen, yapı ve zemin parametreleri, ikinci kısımda tünel açılmasından sonraki oturma yüzeyini verene kadar değiştirilmiş ve yapıda ortaya çıkan kritik alanlar incelenmiştir. Bu yöntemde ise yapının tepkisi üniform olarak ele alınmıştır ki bu da tünel etkisi altındaki gerçek davranış değildir. Bu çalışmalar Bölüm 2’de detaylı olarak ele alınacaktır.

Sonuç olarak pratikte, tünel açılmasından dolayı ortaya çıkan hasar durumu yarı ampirik, iki aşamalı prosedürlerle ele alınmıştır. Zemin ve yapı arasındaki etkileşim sıklıkla ihmal edilmiş ve olduğundan çok basit yapı modellerine başvurulmuştur. Zemin ve yapı arasındaki ilişkinin önemi tartışılmaz olsa da gerçeğe yakın tasarım yaklaşımlarının olmayışından, yukarıdaki basit yöntemler kullanımda uygunluk kazanmıştır.

2. TÜNEL AÇILMASI NEDENİYLE OLUŞAN OTURMALAR ve YAPI HASARI İLE İLGİLİ ÖNCEKİ ÇALIŞMALAR

2.1 Giriş

Daha önceki çalışmalarda tünel açma çalışmalarının etkisi üzerinde çeşitli sonuçlara varılmıştır. Son yıllarda nümerik metotlar başarılı bir şekilde geliştirilmiş ve popüler bir araştırma konusu olmuştur. Analitik metotların avantajı ise uygulama kolaylığı ve parametrelerin kolay değerlendirilebilmesi üzerindedir ancak dezavantaj olarak da arazi ölçümleri sırasında kalibrasyon gerekliliğini barındırmasıdır.

2.2 Sonuçların Derlenmesi

2.2.1 Tünel Açılmasından Dolayı Meydana Gelen Oturmalar

Yapılan önceki çalışmalarda oturmaları ifade etmek için referans olarak Şekil 1.1 de gösterilen tünel parametreleri kullanılmıştır. Açıklanacak ilk metot (Chow 1994), elastik yarı uzayda (Poulos ve Davis 1980) nokta yükten uzakta, düşey yer değiştirmelerin hesaplanmasını içermektedir. Kazı nedeniyle oluşan zemin kaybı, tünel doğrultusu boyunca çizgisel yük olarak modellenmiştir. Tünel yüzeyindeki oturma S , pratikte;

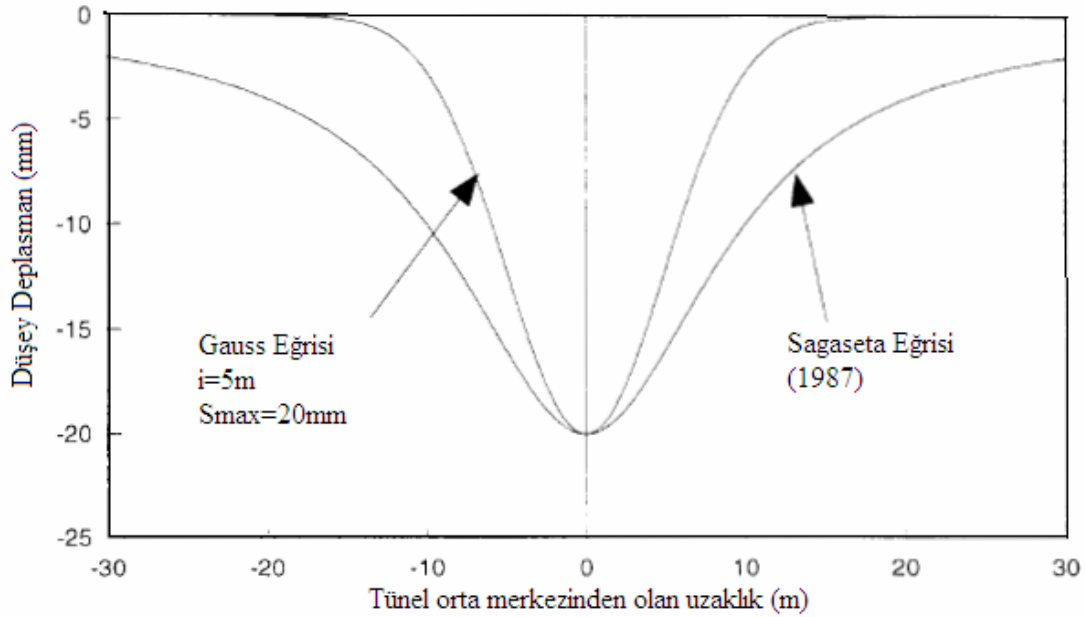
$$S = \frac{\gamma D^2 Z^2}{8G(x^2 + Z^2)} \quad (2.1)$$

bağıntısıyla ifade edilebilir. Burada " γ " zeminin birim ağırlığı, " D " tünel çapı, " Z " tünel derinliği, " x " yatay mesafe, " G " kayma modülüdür. Bu yaklaşım sadece yük kaybını ele alıp gerçekte hacim kaybından meydana gelen hareketi ihmal etmektedir. Bu nedenle oturmaların beklenenden yüksek olarak belirlenmesine sebep olmaktadır.

İkinci metotta (Sagaseta, 1987) kullanılan kinematik yaklaşımda ise tünel açma durumunda sınır şartları olarak sadece oturmalar ele alınmıştır ve yüzey oturmaları elde edilmiştir. Sagaseta bu yaklaşımda, zemini sıkıştırılamaz olarak ele alıp akışkanlar mekaniği (havuz ve memba) problemine benzetmiştir. Chow da bu yaklaşımı zemin yüzeyindeki düşey yer değiştirmeler için aşağıdaki şekilde ifade etmiştir;

$$S = -\frac{\gamma D^2 Z^2}{4G(x^2 + Z^2)} \quad (2.2)$$

(2.2) bağıntısından türetilen profil ile Gauss eğrisi profilinin karşılaştırması Şekil 2.1’de verilmiştir. Bu karşılaştırma sonucunda maksimum çökme S_{max} ve $i=0,5Z$ değerlerinin iki durumda da eşit olduğu görülebilir. Sagaseta’nın oturma profili daha geniş olup kendisinin Caracas metrosunda yapmış olduğu ölçümlerle daha yakın ilişkili olduğunu belirtmiştir (1987).



Şekil 2.1 Oturma profilleri (Augrade, 1997)

Einstein ve Schwartz (1979) ve Pender(1980) tünel kazı işlemi hakkında daha ayrıntılı elastik yaklaşımlar belirtmişlerdir. Bu araştırmacılar tüneli derinde kabul edip yüzey oturmalarıyla ilişkilendirmemişler, bu nedenle de yaklaşımları diğer yöntemlerle karşılaştırılmamıştır. Tüneli, basınca maruz ortamda yani zeminde aniden meydana gelen oyuklar olarak tanımlamışlardır. Bu durumda tünel kaplaması yapılmamışsa tünel çevresi zeminde açılmal ve kayma gerilmelerinde bir azalma söz konusudur. Tüneli ifade eden dairesel diskin ortamdan çıkartılmasıyla oluşan yüzey gerilmelerindeki ve doğrusal elastisite değişimi hesaplanabilir. Tünel yüzeyindeki sınır şartları, dış çeper ve zemin arasındaki kaymaya bağlı olarak belirlenebilir. Çeperin rijitliği de Flügge’nin (1966) dairesel elastik kabuk için vermiş olduğu ilişki yardımıyla belirlenebilir.

Mair ve Taylor (1993) tarafından geliştirilmiş, zemin plastisitesini içeren bir yöntemde de lineer elasto-plastik ortamda silindirik ve küresel oyukların kapalı form çözümleriyle, Londra Kilinde tünel açılmasından dolayı oluşan yüzey altı hareketlerinin kıyaslanmasıdır. Bu

yöntemdeki kapalı form çözümleri aşağıdaki gibidir;

$$\frac{\delta}{D} = \frac{s_U}{3G} \left(\frac{D}{r} \right)^2 e^{(0,75 N^* - 1)} \quad (2.3)$$

$$\frac{\delta}{D} = \frac{s_U}{2G} \left(\frac{D}{r} \right) e^{(N^* - 1)} \quad (2.4)$$

Bu bağıntılarda “ δ ”, tünel merkeziyle r açı yapan noktadaki açısal yer değiştirme, “ s_u ”, suya doygun zeminin kayma mukavemetidir. Stabilité oranı “ $N^* = \sigma_v / s_u$ ” olup, σ_v , tünel merkezinde kazı başlamadan önceki fazla yük değeridir. Yukarıdaki ifadelerde eksenel yer değiştirmelerin ifadesi (küresel oyuklar) $(D/r)^2$ içeren denklem ile bu esnada gerçekleşen açısal yer değiştirme ifadesi de (silindirik oyuklar) (D/r) ifadesi içeren denklemler kullanılmıştır.

Mair ve Taylor analizlerini devam ettirmişler, oyuk açılması sırasında boşalan kısmi yükü de ele alarak geçici tünel kaplaması durumu için (2.4) bağıntısını;

$$\frac{\delta}{D} = \frac{s_U}{2G} \left(\frac{D}{r} \right) e^{[N^*(1-n) - 1]} \quad (2.5)$$

şeklinde genişletmişlerdir. Bu bağıntıda “ n ” parametresi, kaplama tarafından taşınan fazla yükün oranıdır. Bu yaklaşım, yeraltı oturma yüzeylerinin belirlenmesinde uygulanabilirlik teşkil etmektedir. Tünel stabilitesi Davis (1980), Sloan ve Assadi (1992) tarafından, iç destek basınçlı ve basınçsız durum için, oyuk durumunu içeren bağıntılardan hesaplanmıştır.

Göçmeyi belirleyici metotların geliştirilmesi sırasında maden çalışmaları bakımından çokça incelenmiş olsa da tünel açılması bakımından aynı dikkati çekmemiştir.

2.2.2 Yapı Hasarı

Burland ve Wroth’un çalışması, Boscardin ve Cording’in geliştirilmiş uyarlamaları, analitik metotlar içerisinde, tünel açılmasından dolayı yapılarda görülen hasar seviyelerinin belirlenmesi bakımından en kullanışlı metottur. Bu metot ayrıca Bölüm 1.3’de irdelenmiştir.

2.3 Nümerik Metotlar

2.3.1 Tünel Oturmaları

Tünel açılması sırasındaki oturmaları belirlemekte kullanılan en popüler yöntem “Sonlu Elemanlar Yöntemi”dir. Bu yöntem çok kolay olmamakla beraber, New ve O’Reilly (1992) ‘nin de belirttiği gibi sonlu elemanlar metodu; kompleks zemin durumunu modellemek için vazgeçilmez bir yöntem olsa da genellikle tam tanımlanmamış parametreleri barındırır. Analizi yapan, inşaat aşamalarına ve tünel-yapı ilişkisine dikkat etmek ve bunları olduğu gibi ifade etmek zorundadır, aksi halde affedilemez hatalara yol açabilir.

Zemine uygulanan sonlu elemanlar metotlarının açıklamasına birçok kaynakta (Cook 1981, Astley 1992) yer verilmiştir. Bu nedenle yöntemin esasları burada açıklanmayacaktır.

Araştırmacıların bir çoğu, zemin için tatminkar üç boyutlu modeli yaratmak açısından gerekli imkanların sınırlı olduğundan, iki boyutlu basit gerilme durumunu modelleyerek çalışmalarını gerçekleştirmiştir. Bu çalışmalardan ilkleri Gioda ve Donato (1979) tarafından yapılmış olup, Mohr-Coulomb çökme yüzeyi, zemin için geliştirilen lineer elasto-plastik modelde kullanılmıştır. Tünel kaplaması, analizler sırasında özellikleri değişen ince elemanlar olarak tanımlanmış, püskürtülmüş beton olarak ele alınan bu kaplamanın modelde zamanla rijitliği ve dayanımı artmaktadır. Bu modelde oturma yüzeyleri, pratikte öngörülenden daha geniş olarak bulunmuştur.

Oteo ve Sagasetta (1982) zemin için basit bir elastik model kullanmışlar ve sonuçların sonlu eleman ağının boyutuna bağlı olarak değiştiğini bulmuşlardır. Bu durum tünel kazısı sırasında ortadan kalkan zeminin yüküyle iniltilidir. Bu problem de zemin rijitliğini derinlikle arttırarak ve Chow’un (1994) varsayımları kullanılarak çözülebilir.

Elastik zemin modeli ayrıca, mevcut 2 adet metro tünelinin yanına bir tünel daha açılması durumu için Ghaboussi (1983) tarafından da kullanılmıştır. Mevcut iki tünelin ve daha sonra açılan tünel, iki boyutta, tünel doğrultusuna uygun düzlem elemanla zemin modellenmiştir. Zeminde oluşan kayıplar dikkate alınmamakla beraber kaplama elemanları da kiriş gibi modellenmiştir. İnşaat aşamaları sırasında oldukça farklı değişiklikler yapıldığından bu analizlerin sonucunu saha ölçümleriyle kıyaslamak mümkün olmamıştır.

Romo ve Resendez (1982) üç boyutta tünel etkisini belirleyebilmek için, iki boyutta ortogonal elemanları kullanarak iki farklı analiz yapmışlardır. Bu analizlerin birinde zemin dilimi tünele doğru devam eden ağlara ayrılmış ve zemin kaybı tünel çevresinde üniform gerilme olarak

atanmıştır. Böylelikle tünel açılmasından dolayı ortaya çıkan enine oturmalar belirlenebilmiştir. Boyuna oturma değerleri ise ortasında tünel yuvasını ifade eden boşluk kullanılarak sonlu elemanlara ayrılmıştır (tünel doğrultusu boyunca). Burada non-lineer (hiperbolik) elastik zemin modeli kullanılmıştır. Romo ve Resendez bu çalışmada, Bölüm 1.2 de adı geçen araştırmacıların zemini elastik kabul edip yaptıkları yarı ampirik çalışmaya göre daha geniş oturma yüzeyleri bulunmuştur.

Mair 'in (1981) çalışmasında zemin MCC (Modified Cam clay) yaklaşımıyla modellenmiş ve daha önceki santrifüj deneylerinden elde ettiği verilerle kıyaslamıştır. Elde ettiği veriler öncekilere göre daha geniş ve düz bir profili belirtmektedir. Tünelden dolayı oluşan hacim kaybı ölçülerek, zemin kaybının belirlenmesi ise gerçeğe yakın davranışı ifade etmektedir. MCC ile modellenen zeminde plastisite, tünel çevresinde gerçekçi şekilde ifade edilmiştir. Buna karşı olarak izotropik elastik zemin modelinin zemin yüzeydeki etkileri, daha baskın olarak ortaya çıkmaktadır.

Enine oturma profilinin tahmin edilmesini geliştirmek amacıyla Lee ve Rowe (1989) analizlerinde çapraz-anizotropik, elasto-plastik zemin modelini tanımlamışlardır. Analizleri, kaplamanın mevcut olmadığı tünellerin santrifüj test verilerine (Mair 1979) dayandığından onlar da kaplama durumunu dikkate almamışlardır. Sonuçlarında kayma modülünün (G_{hv}) düşey elastisite modülüne (E_v) anizotropik oranının oturma eğrisinin şeklini belirlediğini ifade etmişlerdir.

Tünel probleminde zeminin lineer elastik modelinin uygulanma yöntemi literatürde çokça eleştiriye maruz kalmıştır. Ward ve Pender (1981) çalışmalarında yeni kazılmış tünel çevresinde, stabilitesini yitiren zeminin belli, sınırlandırıcı bir bölge içerisinde kaldığını deneysel ve gözlemsel olarak sonuçlandırmışlardır. Tünel modelinde, kazı aşamalarında ve kaplama durumlarında tünelde zeminde drenajın uygulanması gibi aşama olarak farklılıklar olsa da tünel çevresindeki muhafazalar boyunca yüzeydeki deformasyon ihmal edilebilir düzeydedir. Bu durum da modellemenin drene edilmemiş zemin için yapılmasının önemini ortaya çıkarmaktadır.

Güncel olarak, laboratuvar testleri, aşırı konsolide killerde başlangıçta uygulanan küçük gerilmelerin arttıkça kayma modülünün azaldığını göstermektedir. Bu durumun doğru modellenmesi ile tünel boyunca deformasyonların ve oturma yüzeyinin daha gerçekçi olarak elde edilebilir (Lee ve Rowe 1989). Gunn'un (1993) geliştirdiği model bu davranışı ifade etmektedir. Gerilme seviyesine bağlı rijitlik değişimini ifade eden, Tresca göçme yüzeyini

belirleyen zemin akma durumuyla birlikte bu non-lineer elastik model, kaplamalı durumun göz önüne alınmadığı analizlerde kullanılmıştır. Karşılaştırma Gauss eğrisine göre öngörülen zemin kaybı ile yapılmıştır. Bu çalışmada öngörülen oturma yüzey biçimleri için çeşitli geliştirmeler yapılmışsa da, bu oturma profilleri pratikte beklenen oturma profillerinden oldukça uzaktır.

Daha önce de belirtildiği gibi tünel kaplamasının etkisi sadece birkaç iki boyutlu çalışmada açıkça belirlenmiştir. Bakker (1996), El-Nahhas (1992), Adenbrooke ve Potts (1996) kaplama durumunu belirtmek amacıyla, kayma deformasyonları etkilerini de içeren kirişlerde sonlu elemanları kullanmışlardır. İlk iki çalışmada kirişler zemine mesnetlenip, zemin kaybına karşı direnç katmıştır. Üçüncü çalışmada ise zeminin kaplama ile etkileşim içerisinde olduğu noktalarda deformasyon yapmasına izin verilmiş ve kaplamayı ifade eden elemanlar bundan sonra yerleştirilmiştir.

Gerçek üç boyutlu tünel davranışı esnasında tünel ağzında meydana gelen değişimler, iki boyutlu çalışmalarda ihmal edilmiştir. Tünel ağzındaki gerilmelerin iki boyutlarında inceleyen Lee (1992), “*Gap*” parametresini geliştirmiştir. Bu parametre, zemin kaybını ifade eden tünel boşluğunun üst ucundan, halka şeklindeki boşluğa olan düşey mesafe içinde tanımlanmıştır. Bu parametrenin bir bileşeni üç boyutta tünel yüzündeki gerilme durumunu ifade etmektedir. Bu bileşen, üç boyutlu sonlu elemanlar metoduyla yapılan çalışmalardan gelişmiştir (Lee ve Rowe 1992). 1992’de Lee ve Row tarafından yapılan çalışmada bu yöntemin arazi gözlemlerine uyumluluğu belirtilmiştir.

Önceki çalışmalarda yer alan üç boyutlu analizler basit zemin modelleri önermişlerdir. Lee ve Rowe (1992) çapraz-anizotropik, elasto-plastik zemin modelini ve Mohr-Coulomb göçme yüzeyini kullanmışlar ve iki durumu tetkik etmişlerdir.

- Tünelin uzunluğu boyunca içinden çıkarılmış olduğu üç boyutlu zemin bloğu için kaplamasız durum.
- Tünel yüzeyinde aynı durumda zemin hareketinin önlenmiş olduğu rijit kaplamalı durum.

Bu iki inceleme de gerçek durumlara dayanır. Çalışmada, iki boyutlu enine oturma profilinin tünel ağzından oldukça geride bir mesafede ortaya çıktığı sonucuna varılmıştır. Bu mesafe tünel çevresini saran zeminin plastik davranış gösterme özelliğine bağlı olarak ortaya çıkmaktadır. Düzlem gerilme durumuna geçilmeden evvel, yüzey, iki boyutlu analizlerde

öngörülemeyen eksenel ve yatay deformasyonlara maruz kalacaktır.

Akagi ve Komiya (1996) çalışmalarında tüneli, başında ve içinde değişen eleman özellikleriyle üç boyutta tanımlamışlar ve tünelde kazı nedeniyle oluşacak hareketleri önlemek amacıyla kaplama durumunu rijit, sürekli elemanlar tanımlayarak ifade etmişlerdir. Sonuçları Gauss eğrisi profilleri ile yakın olmasına karşın, analizlerde zemin kaybı durumu göz önüne alınmamıştır.

Swoboda (1989) üç boyutlu analizler için bilgisayar yardımıyla tünel kazı çevresinde zeminde sonlu elemanları ve tünel çevresinden uzaktaki zemini ifade etmek için de sınır elemanları beraber kullanmıştır. Bu çalışma Beer'in (1993) sonlu elemanlar, İto ve Hisatake'nin (1982) sınır elemanlar çalışmalarının benzeri bir çalışmadır. Bu çalışmada püskürtme beton kaplama tabakaları tanımlanmıştır (NATM) ve analizler sırasında dayanımın arttığı göz önüne alınmıştır.

2.3.2 Zemin-Yapı Analizleri

Önceki bölümlerde açıklanan çalışmalarda, nümerik modelde yapı ağırlığı ve rijitliği dikkate alınmamıştır. Gerçek zemin davranışını belirleyebilmek için zemin üzerindeki yapı ağırlığı ve rijitliğinin olduğu gibi dikkate alınması gerekecektir.

Zemin ve yapı için elastik modeller kullanılarak yapılan çalışmalara örnek olarak Cline (1993) ve Hirst'in (1994) çalışmaları gösterilebilir. Hirst'in çalışması üç boyutlu modelleme ile yapılmış olup zemin üzerinde rijit elastik elemanların oturma profilini yassılaştırıcı etki gösterdiği hakkında etkileyici sonuçlar barındırmaktadır.

Hellings ve Frischmann (1994) tarafından yapılan, yığma bir yapıda oturmadan dolayı meydana gelen hasar seviyesinin tespitinde iki boyutlu sonlu elemanlar modeli kullanılmış, yapının cepheleri lineer elastik kiriş elemanları kullanılarak modellenmiştir. Malzeme özellikleri ilk tünel açıldıkta sonraki durum için hesaplanmış ve parametreler arazide ölçülen son oturma değerlerini verinceye kadar değiştirilmiştir. Yapıdaki çatlaklar kesit kalınlığıyla ilişkilendirilmiş, olası çatlakların oluşacağı bölgeler irdelenmiştir. İlk tünel açılmasından elde edilen verilerin sisteme uygulanabilirliği, diğer yapı cephelerinin destek etkisi göz önüne alındığı takdirde etkin olacaktır. Bu yöntemde tartışmaya açık başka bir konu da güvenlik faktörünün herhangi bir açıklama yapılmadan "2" olarak alınmış olmasıdır, ayrıca çalışmada belirtilen 2,5% lik hacim kaybı da Londra Kili için oldukça muhafazakar bir değerdir.

Londra'da bir metro tünelinin "Brittanic House" yapısına etkilerini Simpson (1994) ele

almıştır. Araştırmacı modelinde iki boyutlu sonlu elemanları kullanmıştır. Yapıya ait üç cephe basit iki boyutlu sonlu ağlarla modellenmiştir. Bina cepheleri derin, çok sıralı kirişler olarak ifade edilmiştir. Her sıra, cephenin bir bölümünün yatay şerit olarak ifade eder. Yapının, tünel açılması sırasında oturma yüzeyini etkileyeceği aşıkardır, bu yüzden arazideki oturma profili yapı temeline direkt olarak etki ettirilmemiştir. Bunun yerine oturma profili, yapı altındaki zemini ifade eden şeritlere uygulanmıştır. Bu çalışmada yapı, yığma yapı olduğundan çok düşük çekme dayanımına sahip ve lineer elastik olarak tanımlanmıştır.

Simpson'un vardığı sonuçlarında oturma yüzeyini daha yassı elde etmiş ve yapıda kritik çatlama oluşan kısımların altını çizmiştir. Analizlerde oturmaların adım adım uygulanması ile çok ilginç gözlemlerde bulunulmuş, başlangıçta düşey çatlakların yapı temelinden itibaren bu çatlakların tepe noktasına kadar devam ettiği belirtilmiştir. Yapının üst noktalarında, yapıyı farklı parçalara ayıracak kadar şiddetli çatlamlar meydana gelmiştir. Buradan ortaya çıkan sonuç da şunu göstermektedir ki, ileri seviyede hasar beklenen yapılar için saha ölçümleri uyarı niteliğinde olabilmektedir. Yapının maruz kaldığı oturma profili, çatlamalardan dolayı yapının ayrı kısımlarına uygulanmış ve yapı altındaki dolgu zeminle beraber modellenmiştir.

Pots ve Adenbrooke (1996) yanal birim deformasyon ve sapma oranı gibi saha ölçüm değerlerinin yapı oturma yüzeyine olan etkilerini ele alarak bir yöntem geliştirmişlerdir. Bu yöntem, iki boyutlu sonlu elemanlar modeliyle yapılan parametrik bir çalışmadır. Zeminin modellenmesi sırasında zeminin, elasto-plastik davranış gösterdiği ve drenajsız durum için kabuller yapılmıştır. Çalışma sırasında kirişin eksenel ve eğilme rijitliği değişmektedir. Rijitliklerin artırılmasıyla zeminde oluşan oturma profilinin yassılaştığı gözlemlenmiştir. Çalışmadaki verilerin güvenilirliği doğrultusunda, arazi şartlarının göz önüne alınıp hesaplandığı yatay birim deformasyon ve sapma oranlarının bir değişim faktörü ile çarpılması gerektiği ifade edilmiştir. Bu faktörler rölatif rijitliklere (eksenel ve eğilme) bağlı olup bu faktörlerin değerlerinin belirlenmesi de zorluklar içermektedir. Bu yöntem, problemin çözümü için geliştirilen ilk ve tek basit tasarım yöntemidir.

Literatürde çokça rastlanabilen, yığma yapıların sonlu elemanlarla modellenmesi çalışmalarının dışında yapıları oldukça detaylı irdeleyen çalışmalar da mevcuttur. Mensah-Dwumah, (1984) tünel açılmasından dolayı meydana gelen oturma profilini bütün bina için, sonlu elemanlar ile modelleyerek yarı ampirik bir metot geliştirmişlerdir. Yığma yapı bu yöntemde, elasto-plastik malzeme modeliyle tanımlanmış ve laboratuarda tuğla duvarlar için yapılan deneyler yardımıyla yığma elemanlar arası boşluklar da ifade edilmiştir. Bu çalışmada varılan en önemli sonuç; mevcut metotların, yapının tahmini hasar direncinin gerçekte

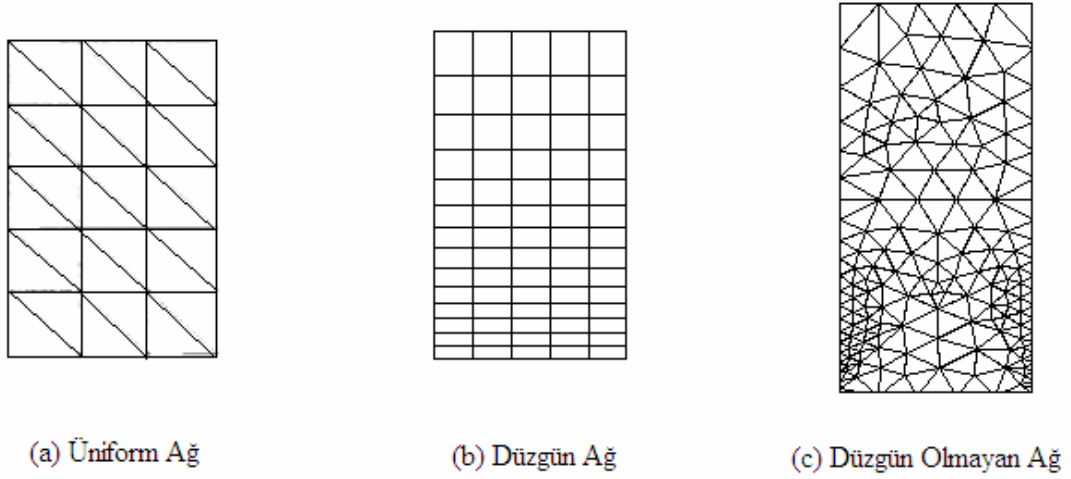
olduğundan daha büyük tahmin etmeleridir. Bu bağlamda Boscardin (1980) tarafından da aynı sonuca, kompleks model kullanılmadan varılmış olduğunu belirtmek gerekir.

2.4 Sonuçlar

Günümüzde tünel etkisini tatmin edici şekilde ele alan bir metot geliştirilmemiştir. Ancak nümerik çalışmalar, malzeme modellerindeki zorluklara rağmen, yapı etkisini ve mevcudiyetini üç boyuta kolay modellenmesinin de yardımıyla oldukça büyük aşamalar kaydetmişlerdir. Yapılan çalışmalarda varılan en önemli sonuçlar, oturmaların gerilme boşalması ve zemin kaybından dolayı ortaya çıktığı yönündedir. Ancak bu çalışmalarda önemli bir faktör olan, tünel muhafazasının üzerinde meydana gelen hacim kaybı, *kuyruk kaybı* ihmal edilmiştir. Çalışmalarda yapı ve oturma yüzeyinin beraber ele alınması daha gerçekçi bir yaklaşımdır.

2.5 Nümerik Zemin Modelin Oluşturulması: Sonlu Eleman Ağ Sisteminin Oluşturulması

Bir model için uygun sonlu elemanlar ağını oluşturmak ana hatlarıyla ele alınacak olursa, ağ sistemini oluşturmak için öncelikle birleşim noktalarının yerlerinin belirlenmesi ve elemanlarla bu noktalar arası ilişkinin sağlanması gerekir. Sonlu eleman analizleri için kullanılan ağlar iki sınıfa ayrılabilir: düzgün ve düzgün olmayan. Düzgün sonlu eleman ağında temas noktalarının yerleri basit matematiksel ilişkilerle ifade edilebilir. Şekil 2.2(a) da görüleceği üzere, bütün elemanlar aynı boyutta ve noktaların hepsinin bir doğru üzerinde yer aldığı üniform ağ biçimi gösterilmiştir. Bu ağ tipi en basit olan tiptir. Modeldeki uyum düzgün ağ sisteminde (Şekil 2.2(b)) görüldüğü gibi de sağlanabilir. Düzgün olmayan ağlar ise genellikle sistemde çok yönlü uyum sağlanmasına izin verirler (Şekil 2.2(c)). Düzgün ağ sisteminde temel şablon bir kere oluşturulduktan sonra model için genelleştirmeye gidilebilir. Düzgün olmayan ağ sisteminin ise oluşturulması daha zordur ve üç boyutta başlı başına bir hesap külfeti getirir. Üç boyutlu ağ oluşturulması için çeşitli algoritmalar mevcuttur. Modellerde üç boyutlu düzgün olmayan ağ sistemini kullanmak, düzgün ağ sistemi oluşturmaya nazaran daha doğru sonuçlar verecektir.

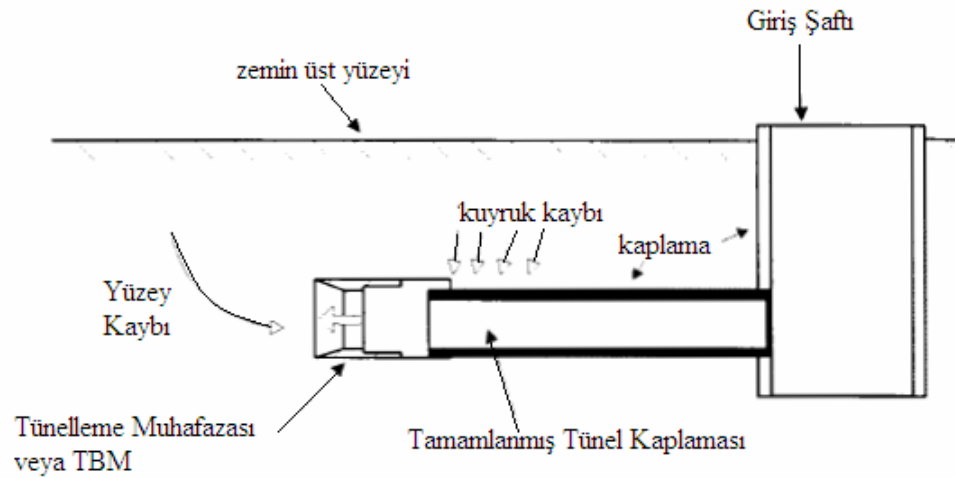


Şekil 2.2 Sonlu eleman ağ tipleri (Augrade, 1997)

2.5.1 Tünelin Oluşturulması

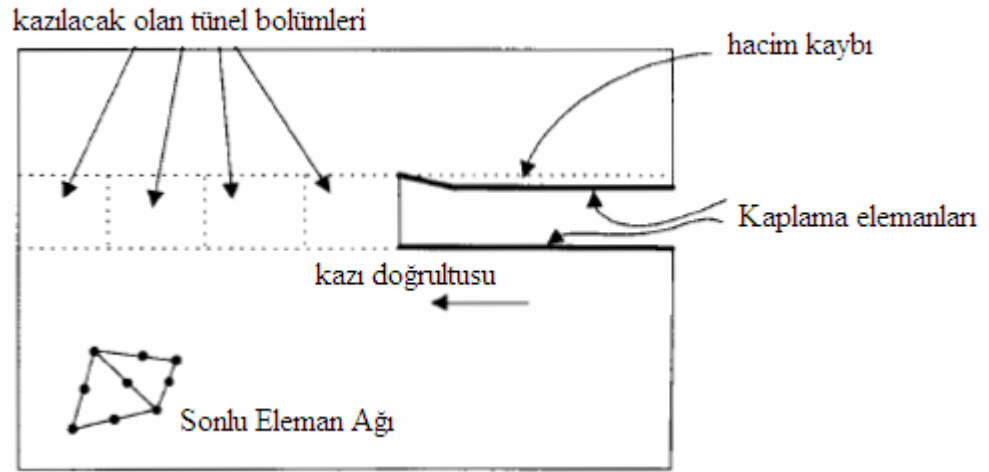
Tünelin modellenmesi problemde en önemli husustur. Yüzey oturmaları ele alınırken, tünelde oluşan hacim kaybı ve kaplamanın modellenmesi belirleyici faktörlerdir.

Genel olarak tünel çalışmaları, zeminde önce bir shaft açılması ve daha sonra bu shafta indirilen ekipmanın tünel içine prekast betonarme kaplamaların yerleştirilmesi şeklindedir. Bu aşamalar Şekil 2.3’de gösterilmiştir. Tünel açılması sırasında tünel yüzeyi kazıldıkça arada kalan boşluklar harç ile doldurularak, kullanılan ekipmanın geçtiği yerin stabilitesi sağlanmış olur. Burada kuyruk kaybı kazının başlangıcından harcın sertleşmesine kadar devam eder.



Şekil 2.3 Tünel kazı işlemi aşamaları (Augrade, 1997)

Tünel kazı aşamalarının idealize edilmiş hali de Şekil 2.4’de görüldüğü gibidir. İdealize edilmiş durumda tünelin her bir bölgesi kazıldıkça ilerleyen kaplamayla beraber kuyruk kaybı da ele alınır. Bu şekilde tünel yüzeylerinde oluşan hacim kayıplarına izin verilmiştir. Kazı çalışması da sonlu eleman ağına yük olarak verilebilir ve tünel ana hatları içerisindeki rijitlik azalması da göz önüne alınabilir. Daha önce de belirtildiği üzere kazı nedeniyle ortaya çıkan hacim kaybı zemin oturmaları üzerinde, kuyruk kaybına göre ikincil önem taşımaktadır. Açılan şaftlardan dolayı zeminin düşey oturmalarla maruz kalacağı kesindir. Bu oturmalar sadece tünel açılmasından dolayı ortaya çıkan oturma profillerini de değiştirecektir. Bu nedenle modellerde tünel, şaftından uzakta olarak tanımlanabilir.



Şekil 2.4 Tünel kazı işleminin nümerik olarak modellenmesi (Augrade, 1997)

3. ÖRNEK YAPI

Bu tez kapsamında zemin-yapı etkileşimi problemini incelemek amacıyla belirlenmiş örnek olarak ele alınan yapı, İstanbul ili, Esenler ilçesi ,Fevzi Çakmak mahallesi, 29. sokak 4 pafta-3141 parsel no ile tapuya kayıtlı bulunmaktadır. Yapıda, bölgede gerçekleştirilen tünel kazı çalışmaları sırasında bazı yapısal deformasyonlar meydana gelmiştir. Deformasyon ölçümleri; yüzey okumaları ve oturma analizleri Bölüm 3.2’de anlatılmıştır.

3.1 İncelenen Yapı İle İlgili Bilgiler

Örnek yapıya ait 10.10.1994 onay tarihli Mimari ve Statik-Betonarme projesi çizim paftalarında üzerinde gerekli incelemeler yapılmıştır. Buna göre, mimari projesinde 1 bodrum + zemin + 5 normal katlı olan yapı planda dörtgen şeklinde tasarlanmıştır (Şekil 3.1). Yapının kullanım amacı; Bodrum katta otopark ve konut diğer katlarda ise konuttur. Yapı zemin kat tavanından itibaren komşu bina cephesi dışındaki cephelerde 1m konsollarla genişletilmiştir. Normal katlarda konsollar arka ve sağ yan cephe boyunca balkon olarak tasarlanmıştır. İç duvarlar 10 cm, dış duvarlar 20 cm dir. Bodrum ve zemin kat oturma alanları 135.8 m^2 , normal katlarda ise 141.7 m^2 dir. Kat yükseklikleri bodrum katta 250 cm diğer katlarda 280 cm dir.



Şekil 3.1: Örnek yapı

Statik-betonarme projesinde ise yapı 1 bodrum + zemin + 5 normal kat olmak üzere 7 kattan oluşan betonarme karkastır. Taşıyıcı sistemi kolon-kiriş çerçeve sistemidir. Yalnızca bodrum kat tüm cephelerde betonarme perde ile çevrelenmiştir. Döşeme sistemi tüm katlarda çift doğrultuda çalışan kirişli plaktır. Temel sistemi iki doğrultuda sürekli temel olarak tasarlanmıştır. Temellerin de birbirine 40/80 cm/cm boyutunda tip bağ kirişler ile bağlanmış olduğu anlaşılmaktadır. Bodrum kat kalıp planı incelendiğinde X-X ve Y-Y doğrultusunda

düzgün akslar mevcut değildir, en büyük aks açıklığı 460cm dir. Bodrum kat tavanı kalıp planı incelendiğinde döşeme kalınlıkları 10-12cm, tüm kirişler 20/50 cm/cm, Y-Y doğrultusunda kolonlar 30/70 cm/cm, X-X doğrultusundaki kolonlar ise 70/30 cm/cm olarak boyutlandırılmıştır. Zemin kat ve normal kat tavanı kalıp planları incelendiğinde döşeme kalınlıkları 10-12 cm, 2-4-7-9-11 akslarında yer alan kirişler 20/60cm/cm, C-B-3-6 akslarında yer alan kirişler 20/70 cm/cm, diğer tüm kirişler 20/50 cm/cm, Y-Y doğrultusunda kolonlar 25/70 cm/cm, X-X doğrultusundaki kolonlar ise 70/25 cm/cm olarak boyutlandırılmıştır. Projede belirtilen malzeme sınıfları; beton sınıfı C14, inşaat demiri de S220 dir. Döşeme hesabında, 10 cm lik döşemelerde (marley ve karo kaplamalar) sabit yük $g=0.4 \text{ t/m}^2$, 12 cm'lik döşemelerde ise $g=0.445 \text{ t/m}^2$, hareketli yük $q=0.2 \text{ t/m}^2$, balkon ve sahanlıklarda ise hareketli yük $q=0.35 \text{ t/m}^2$ olarak alınmıştır. Yarım tuğla duvar yükü alan döşemelerde ise hareketli yük $q; 0.15 \text{ t/m}^2$ olarak arttırılmıştır. Kolon hesapları da iki doğrultuda tablolar halinde verilmiştir. Sürekli temel hesapları da detaylarıyla mevcuttur. Örnek yapının bulunduğu adreste yapılan incelemelerde yapının 1 Bodrum + zemin + 5 normal katlı olduğu tespit edilmiştir. Taşıyıcı sistemi ve mimarisine ait belirlemeler özetlenecek olursa; Bodrum katında otopark olarak tasarlanan kısım konuta dönüştürülmüş, dolayısıyla projeye uyulmamıştır. Bodrum kat boyunca bina çevresinde olması gereken perde yalnızca sol yan cephede bitişik nizamda ve merdivenin oturma bölgesinde inşa edilmiş, perde olması gereken diğer kısımlarda ise 20/30 cm/cm boyutlarında kirişlerle kolon çerçeve bağlantılarının sağlandığı görülmüştür. Bodrum kattaki perdeler üst katta devam etmemekle beraber yerine imal edilen kirişlerle ilgili herhangi bir hesaba rastlanmamıştır. Diğer kiriş boyutları ise 20/50 cm/cm yalnızca merdiven sahanlığı çevresinde Y-Y doğrultusundaki simetrik kirişlerin boyutu 15/50 cm/cm dir. Bodrum katta kolon boyutları keyfi olarak azaltılmış, kısa boyutlar korunmakla beraber yapılan ölçümlerde uzun boyutun 55-60-65-70 cm değerleri arasında keyfi olarak imal edildiği tespit edilmiştir. Bu durumdan kaynaklanan bir ek hesap mevcut değildir. Aynı katta K107, K109, K117 kirişlerinin inşa edilmediği tespit edilmiştir. Bu kirişlerin olmamasından dolayı, hesaplarda dört tarafından mesnetli çift doğrultuda çalışan döşeme olduğu belirtilen ve bu husus esas alınarak hesap yapılan döşemelerde, mesnet koşulları sağlanmamış dolayısıyla yapılan hesaplar geçerliliğini yitirmiştir. Ayrıca kolon kiriş birleşimlerinde 5 cm ye varan kaçıklıklar mevcuttur. Zemin katta ise kolon boyutları değiştirilmemiş, 25 cm olması gereken kısa kenar 30 cm olarak imal edilmiştir. Diğer kolon boyutları bodrum kattaki gibidir. Kiriş boyutları ise 20/50 cm/cm dir. Bu katta projesinde görünen tüm kirişler mevcuttur. E ve 12 akslarının birleştiği noktadan bu akslara doğru devam eden iki adet guse kat yüksekliğince inşa edilmiş olup kalınlığı 20 cm dir. 1. normal katta

yerinde olması gereken S7 kolonuna rastlanmamış bu kolonun yerine aksından kaydırılıp iki gusenin kenarına taşınmış 30/40 cm/cm lik projede mevcut olmayan kolonlara rastlanmıştır (Şekil 3.2). Konsolları taşıması gereken guseler burada kolonları taşımaktadır. Bu imalatla arka cepheye bakan odada balkonlar içeri alınmış ve kullanım alanı arttırılmıştır.



Şekil 3.2. Guselerin yerleşimi

1. normal katta projede balkon olarak görünen kısımlardan arka cepheye bakan oda ve duş-wc muhitlerinde balkonlar bu kısımlara dahil edilerek projeye uyulmamış ve bu cephelere doğru çıkan Y-Y doğrultusundaki konsol kirişler birbirine 20/30 cm/cm lik kirişlerle bağlanmıştır. Bu imalatla ilgili herhangi bir hesap mevcut değildir. Ayrıca mutfak muhitinde mevcut her iki dairede K202 ve K205 kirişleri kolonlara oturmamakta, 40 cm lik kaçıklıkla Y-Y aksında devam eden konsol kirişlere saplanmaktadır. Belirtilen durumlar dışında kiriş boyutları 20/50 cm/cm dir. Bodrum kat merdiven sahanlığındaki kiriş boyutlarının uygunsuzluğu bütün katlarda devam etmektedir. Projesinde verilen kolon boyutlarına uyulmuş, tüm katlarda bodrum kattaki boyutlar korunmuştur (belirtilen S7 kolonu dışında). 1.normal katta tespit edilen tüm uygunsuzluklar 2,3,4,5. katlarda aynı şekilde mevcuttur.

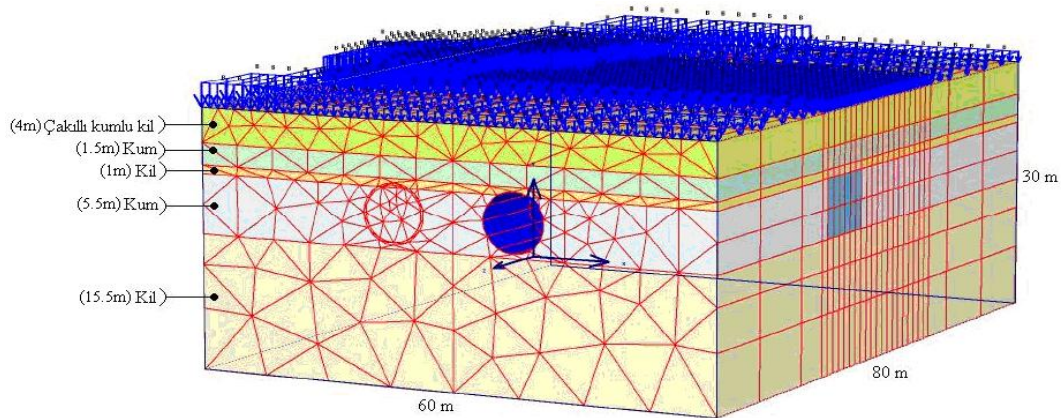
3.2 Oturma Analizleri

27.11.2006 tarihinde YTÜ öğretim üyeleri tarafından hazırlanmış olan “Otogar-Bağcılar Raylı Toplu Taşıma Sistemi 0+850 ile 0+950 km Arası Tünel Yapımında Ölçülen Zemin Hareketlerinin Değerlendirilmesi” isimli raporda, Bölüm 3.3’de belirtilen analizlerin yapılabilmesi için gerekli bilgiler alınmıştır; yapının bulunduğu bölgede TBM (Tunnel Boring Machine-Tünel kazma makinesi) ile KM 0+800’den ilk olarak sağ tünel kazılmaya başlanmıştır. Tünel kesitinin yüzeye yaklaştığı Km 0+850 ve Km 0+950 arasında 3 ve 2 boyutlu deformasyon analizleri yapılarak açılan tünel kesitinin çevreye verdiği etki araştırılmıştır. Analizlerde 3 boyutlu analizler için Plaxis 3D Tunnel ve 2 boyutlu analizler

için ise Plaxis adında bir yazılım kullanılmıştır. Bu yazılımlarda gerilme şekil değiştirme, konsolidasyon ve yeraltı suyu analizleri ile stabilite analizleri yapılabilmektedir.

3.2.1 Kullanılan Modeller ve Parametreler

KM 0+850 ve KM 0+930 arası ilk olarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. Şekil 3.3’de verilen sonlu elemanlar modelinde TBM kılıfı geometrisi, rijitliği ve pozisyonu, tünel aynasında uygulanan basınç (alın basıncı veya EPB), TBM arkasında uygulanan grout basıncı, bina yükleri, yeraltı suyu etkisi ve meydana gelen hacim kaybı ile karmaşık zemin davranışı ve inşa adımları göz önüne alınmıştır. Karmaşık zemin davranışı olarak suya doymun iki fazlı bir ortam olması ve bu ortamda katı fazı meydana getiren zemin iskeletinin yükleme altında doğrusal olmayan davranışı kastedilmektedir. Bina temellerinin aynı kotta bulunmamasından ve göz önüne alınan aralık (0+850-0+930) içinde dolgu kalınlığının değişken olması nedeniyle zemin profili Şekil 3.3’den görüleceği gibi dolgu altındaki tabakadan itibaren modellenmiştir. Değişen dolgu kalınlığı ortalama bir sürşarj yükü olarak ve bina yükleri ise kat sayısı ve genişliğine uygun olarak göz önüne alınmıştır.



Şekil 3.3. 3 Boyutlu sonlu elemanlar modeli

Analizlerde zemin ve TBM için kullanılan parametreler sırasıyla Çizelge 3.1a ve Çizelge 3.1b’ de verilmiştir. TBM 3 boyutlu plak eleman (eğilme ve eksenel rijitliğe sahip) olarak, tünel kaplaması ise 3 boyutlu hacimsel sonlu eleman olarak modellenmiştir. Tünel kaplaması için elastik malzeme davranışı göz önüne alınarak Young modülü 31000 MPa, Poisson oranı 0.1 ve birim hacim ağırlığı 24 kN/m³ alınmıştır. Modelde tünel aynasında uygulanan dengeleme basıncı için Broere (2001) tarafından önerilen aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır:

$$\sigma = K_0 \gamma' Z_0 + \sigma_W + 20 \text{ kPa} \quad (3.1)$$

K_0 için 0,4 değeri kullanılarak alın basıncının tünel tepesinde 90 KPa olduğu ve derinlikle

14 KPa/m arttığı kabul edilmiştir. Grout basıncı olarak da 200 KPa lık bir basınç TBM kuyruğunda bulunan kaplama anosunda (1,4 m) tünel çeperine uygulanmıştır. Analizler sırasında TBM in tepki kuvveti olarak 640 KPa lık bir basınç, tünel eksenini doğrultusunda TBM'e komşu kaplama elemanlara uygulanmıştır. Analizler sırasında her bir adımda TBM'in 1,4 m ilerlediği varsayılarak her bir adım için TBM uzunluğunca (8,6 m) hacim kaybı olarak %0,5 değeri alınmıştır.

Çizelge 3.1a: TBM için sonlu elemanlar modelinde kullanılan malzeme parametreleri

Eksenel rijitlik	EA	(kN/m)	8200000
Eğilme rijitliği	EI	(kNm ² /m)	83800
Birim ağırlık	w	(kN/m ²)	38,15
Poisson oranı	μ	(-)	0

Çizelge 3.1b: Zemin için kullanılan parametreler

Parametreler	Birim	Çakıllı kumlu kil	Üst kum	Üst kil	Kum	Kil
Yükleme sırasında drenaj	-	Yok	Var	Yok	Var	Yok
Birim hacim ağırlık	kN/m ³	18	18	19	18	20
Permeabilite	m/gün	0.0086	0.86	0.00086	0.86	0.00086
Sekant elastisite modülü	kN/m ²	14000	26000	32000	42000	29000
Konsolidasyon modülü	kN/m ²	14000	26000	32000	42000	29000
Kabarma modülü	kN/m ²	42000	78000	96000	126000	87000
Kohezyon	kN/m ²	5	1	5	1	10
İçsel sürtünme açısı	derece	27	37	28	42	28
Dilatansi açısı	derece	0	7	0	0	0
Poisson oranı	-	0.2	0.2	0.2	0.2	0.2
Referans gerilme	kN/m ²	100	100	100	100	100
Malzeme katsayısı (m)	-	0.7	0.5	0.8	0.5	0.8
Sükunetteki toprak basıncı katsayısı	-	0.546	0.398	0.53	0.331	0.53
Malzeme katsayısı (R _f)	-	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9

Bina yüzeylerine yerleştirilen prizmalar yardımı ve yerden alınan topografik ölçümler ile tünel güzergâhı çevresinde bulunan binalardaki hareketler 3 boyutlu olarak izlenmiştir. Çizelge 3.2'de, 2 No'lu binaya ait, belirli kesitlerdeki düşey yer değiştirmeler verilmiştir.

Çizelge 3.2. Deformasyon ölçümleri

Apt. No	Bina ölçüm noktası	Düşey yer değiştirmeler (mm)
2	BMP12	28
	BMP13	29
	BMP14	33
	BMP15	33

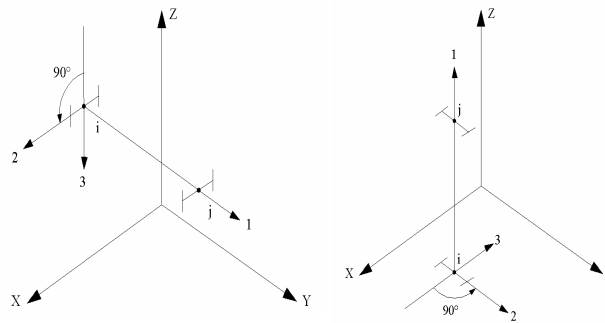
3.3 Yapısal Çözümleme

Yapısal analizler ETABS-ver.9.04 yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiştir. ETABS programı her ne kadar oldukça gelişmiş sonlu elemanlar tekniği ile çalışan bir yazılım olsa da, menüsünde tasarımcıların tanıdığı ve kullandığı kolon, kiriş, çapraz, duvar gibi bina terimleri kullanılır. Böylece bilgisayar modeli bina terimleri kullanılarak kolayca oluşturulmuş olur. Konut yapıları söz konusu olduğunda ETABS, modelleme, analiz ve boyutlandırmayı kolaylaştırmak için en hızlı otomasyon seçeneklerini sağlamaktadır. Betonarme ve çelik döşeme ana hatlarını, kolonları, çerçeveleri ve duvarları üretmek için gerekli komutlar, zati ve yatay yükleri çabuk üretme teknikleri ve genel sonlu eleman yazılımlarında bulunmayan çok sayıda özellik bünyesinde barınmaktadır; sismik izolatörler ve viskoz damperleri içeren tam dinamik analiz, ayrıca statik itme (pushover) analizi seçenekleriyle performans dizaynı gibi.

Söz konusu yazılımla ilgili olarak, aynı anda işlenebilen çok sayıda dörtgen ve silindirik koordinat ve grid sistemleri, benzer katlar kavramını kullanarak yeni katların otomatik üretilmesi, benzer kattaki elemanların birlikte ve ortak tanımlanması, duvarlar, döşemeler, delikler, yaylar, kütleler ve yükler için alan nesneleri, mesnetler, yaylar, kütleler ve yükler için noktasal nesneler, rijit diyafram tanımı, geniş kapsamlı parametrik hazır yapı tiplerinden seçerek modelleme, döşeme, rampa ve duvar panellerinin kendi içinde bölümlendirme seçenekleri, perde ve boşluklarının hızlı olarak modellenebilmesi gibi daha birçok özellik sayılabilir. Bu bağlamda modellemede temel olarak dikkat edilen hususlar ve genel kavramlar aşağıda sıralanmıştır:

3.3.1 Düğüm Noktası ve Elemanlar

Sonlu eleman ağının belirleyeceği tüm noktalar (gerçek veya fiktif), süreksizlik noktaları birer düğüm noktası, bu noktaların sınırladığı sistem parçaları ise eleman olarak dikkate alınır.



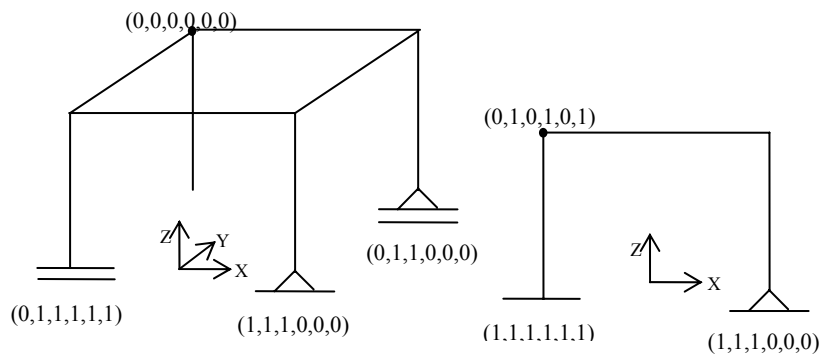
Şekil 3.4. Sistem eksenleri ve eleman eksenleri (Doran, B. ve Alacalı, S., 2004)

Her nokta üç boyutlu uzayda yer aldığından koordinatları global koordinat sistemine (sistem eksenleri; X, Y, Z) göre belirlenir. Şekil 3.4’de eleman ve sistem eksenleri görülmektedir.

Düğüm noktası koordinatları dışında, düğüm noktası yükleri, yer değiştirmeleri ve bazı eleman yükleri yine global koordinat sistemine göre belirlenebilir. Sistem eksenleri ile tanımlanan düğüm noktası kuvvetleri ve yer değiştirmeleri ise çıktı dosyalarında yer alır. Elemanlar ile ilgili yön ve doğrultu, eksen takımları arası ilişkiler, sağ el kaidesine göre belirlenir. Eleman eksenlerine göre belirlenebilecek yön ve doğrultu parametreleri; eleman kesit özellikleri ve bazı yük şekilleridir. Söz konusu eksenlerde tanımlı iç kuvvetler ise çıktı dosyalarında görülür. Elemanda sol uçta tanımlanan eksen takımında 1 eksen, eleman eksen doğrultusunda, 3 eksen ise genelde hakim eğilme eksenleri olarak tanımlanır. Dolayısıyla; 1-2 düzlemi yükleme düzlemi, 1-3 düzlemi ise eğilme düzlemi olarak düşünülebilir.

3.3.2 Toplam Sistem Serbestlik Derecesi

Sistem elemanlarının birbirleriyle bağlantılarını sağlayan düğüm noktaları 3 boyutlu Euklid uzayında tanımlıdır. Dolayısıyla her düğüm noktası için altı serbestlik tanımlanabilir. Üçü öteleme (yer değiştirme; U) diğer üçü ise dönme (açısal yer değiştirme; R) serbestliğidir. Düzlemde ise bu sayı üçtür. Sistemin genelinde bu yer değiştirmeler toplam sistem serbestlik derecesi olarak anılır. Mesnetlerin hareket kabiliyetlerinin bulunduğu doğrultularda tanımlanabilecek olan mesnet şartları da toplam sistem serbestlik derecesini etkileyen şartlar olarak tanımlanabilir.



Şekil 3.5. Düğüm noktası serbestlikleri ve mesnet şartları(Doran, B. ve Alacalı, S., 2004)

a) Uzayda b) XZ düzleminde

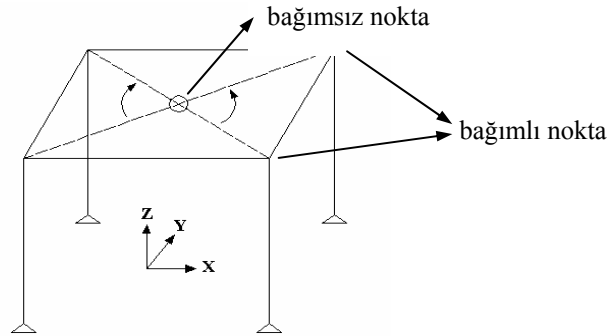
Gerek mesnet şartları gerekse düğüm noktası serbestlikleri tanımlanırken dikkat edilmesi

gereken en önemli nokta, sistemin stabilitesini bozmayacak şekilde söz konusu serbestliklerin belirlenmesidir. Tutulan serbestlikler doğrultusunda yük, kütle, yer değiştirme gibi büyüklükler tanımlanamaz. Şekil 3.5’de düğüm noktası serbestlikleri ve mesnet şartları gösterilmiştir.

Şekil 3.5’de serbestlik dereceleri (SD); U_x , U_y , U_z , R_x , R_y , R_z tanımlanırken, söz konusu düğüm noktalarının, U veya $R = 1$ ise tutulu olduğu; hareket etmediği, U veya $R = 0$ ise serbest olduğu; hareket ettiği anlaşılmalıdır.

3.3.3 Rijit Diyafram Hareketi

Uzay çerçevelerin yatay yüklere göre hesabında bilinmeyen sayısını azaltmak için betonarme döşemeler pratik olarak kendi düzlemleri içinde sonsuz rijit kabul edilebilir ve hesaplar bu kabule göre yapılır. Bu durumda bir diyafram hareketinin varlığından söz edilebilir. Bu kabule göre yapılacak hesaplarda bu hareketin sisteme bir şekilde empoze edilmesi gerekir.

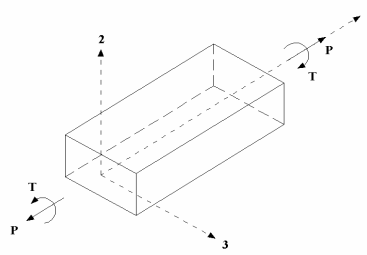


Şekil 3.6. Diyafram hareketi (Doran, B. ve Alacalı, S., 2004)

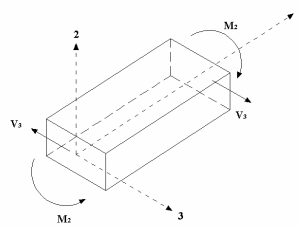
Bunun için öncelikle döşeme içinde kalmak şartıyla bir nokta (bağımsız nokta) tanımlanır. Daha sonra diğer tüm noktaların (döşeme üzerinde bulunan) bu bağımsız noktaya sonsuz rijit fiktif çubuklarla bağlandığı düşünülür (Şekil 3.6). Bu durumda söz konusu noktaların hareketleri bağımsız düğümün hareketlerine uyacaktır. Çözümlemelerde bu varsayıma sık başvurulur.

3.3.4 Çubuk Eleman Uç İç Kuvvetleri ve Pozitif Yönleri

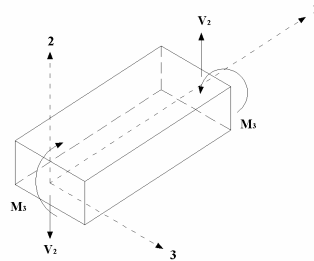
İç kuvvet, birim yüzeye etkiyen değerleri ile ölçülen gerilmeler olarak bilinmektedir. Gerilmelerin bileşkeleri ise kesit tesirleri olarak tanımlanır. Kesit tesirleri, yerel (lokal) koordinat sistemine (eleman eksenleri) göre tanımlanırlar. Buna göre her çubuğun eleman eksenini 1, 2, 3 ile gösterilmektedir. Şekil 3.7, 3.8, 3.9’da, ETABS yapısal analiz programında çubuk elemanlar (Frame) için tanımlı 6 adet iç kuvvet, etkidikleri düzlemler ve pozitif yönleri gösterilmiştir.



Şekil 3.7. Eksenel kuvvet ve burulma momenti (Doran, B. ve Alacalı, S., 2004)



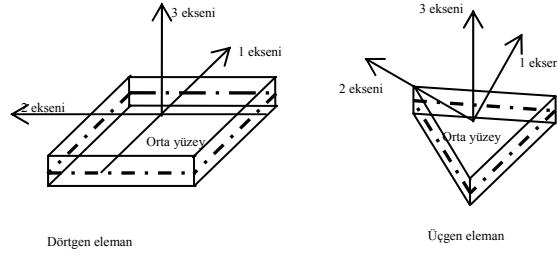
Şekil 3.8. (1-3) Düzleminde etkiyen iç kuvvetler (Doran, B. ve Alacalı, S., 2004)



Şekil 3.9. (1-2) Düzleminde Etkiyen İç Kuvvetler (Doran, B. ve Alacalı, S., 2004)

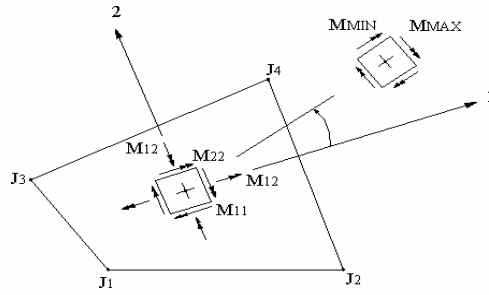
3.3.5 Yüzeysel Elemanlar için Gerilme ve İç Kuvvetler ve Pozitif Yönleri

Yüzeysel elemanlarda (Shell veya Area elemanı) genelde 3 eksen, 1-2 düzleminde yer alan yüzeyin dış normali doğrultusundadır (Şekil 3.10). Şekil 3.11 ve 3.12’de söz konusu düzlemlerde tanımlı olan iç kuvvetler, gerilmeler ve pozitif yönleri verilmiştir.



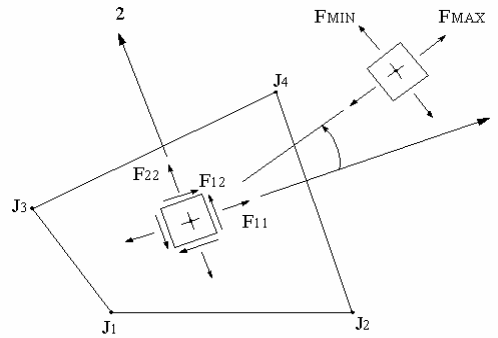
Şekil 3.10. Eleman tipleri (Doran, B. ve Alacalı, S., 2004)

i) Birim uzunluk için eğilme ve burulma momentleri



Şekil 3.11. Alan elemanları için tanımlı iç kuvvetler (Doran, B. ve Alacalı, S., 2004)

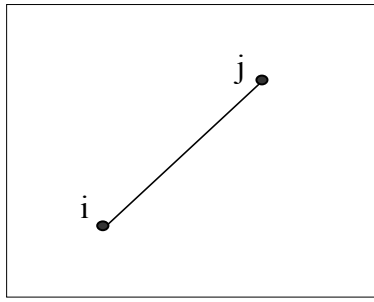
ii) Membran Kuvvetleri



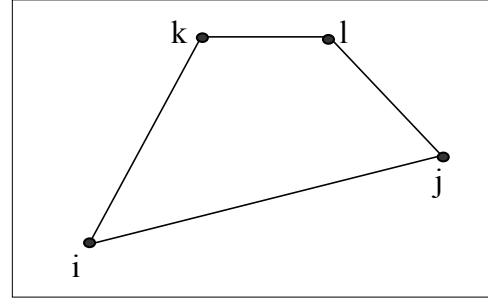
Şekil 3.12. Alan elemanları için tanımlı gerilmeler (Doran, B. ve Alacalı, S., 2004)

3.4 Yapısal Modelleme

Bölüm 3.1’de oldukça detaylı olarak anlatıldığı gibi örnek yapı projesine uyulmamış ve yerinde taşıyıcı sistem de değiştirilerek farklı imal edilmiştir. Projesinde ve yerinde oldukça önemli yapısal farklılıklar içeren yapı sistemi için mevcut durum dikkate alınarak modelleme yapılmıştır. Ayrıca zemin-yapı etkileşimini daha iyi belirleyebilmek ve etkin tüm parametreleri dikkate alabilmek açısından, yapıya ait temel sistemi modelde üst yapı ile beraber dikkate alınmıştır. Nümerik modellerde döşeme elemanlar alan elemanları, diğer taşıyıcılar ise çubuk elemanlar yardımıyla modellenmiştir. Şekil 3.13’ de iki farklı eleman için kullanılan sonlu eleman tipleri görülmektedir.



(a) Çubuk eleman

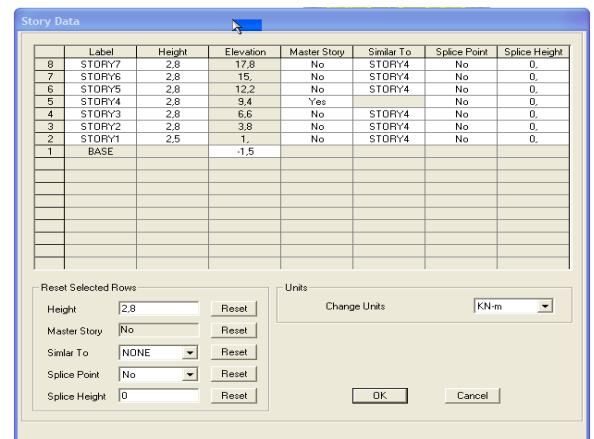
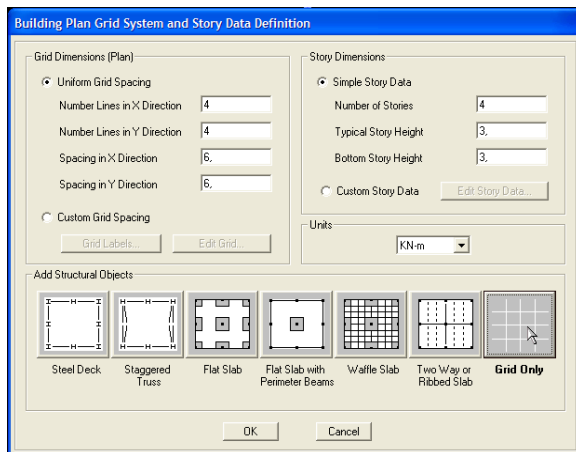


(b) Alan elemanı

Şekil 3.13. Sonlu eleman tipleri

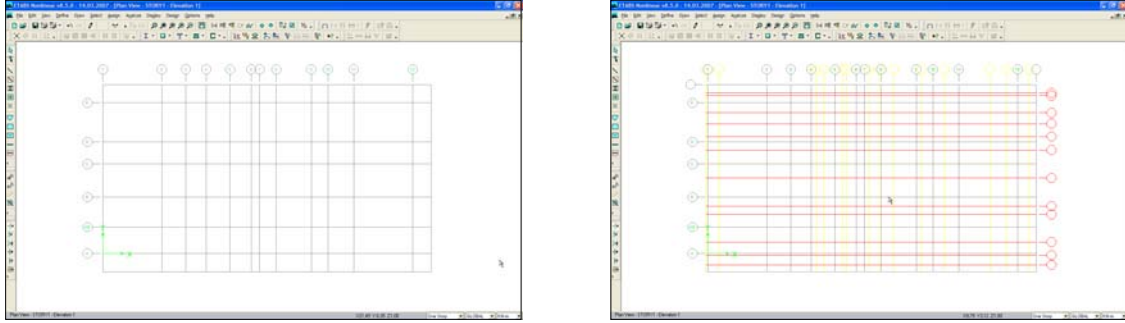
Aşağıdaki pragraflarda yapı sisteminin ETABS programında adım adım modellenmesi anlatılmıştır:

Izgara Ataması : Öncelikle yapının geometrik olarak tanımlanabilmesi için mevcut akslar belirlenerek tanımlanmıştır (Şekil 3.14).

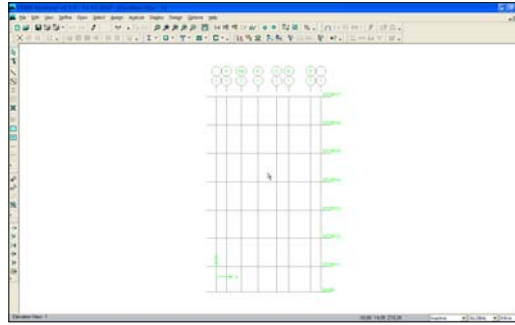


Şekil 3.14. Izgaraların atanması

Böylece geometrinin oluşturulmasında gerekecek tüm akslar planda ve elevasyonda tarif edilmiştir (Şekil 3.15, 3.16).



Şekil 3.15. Plan



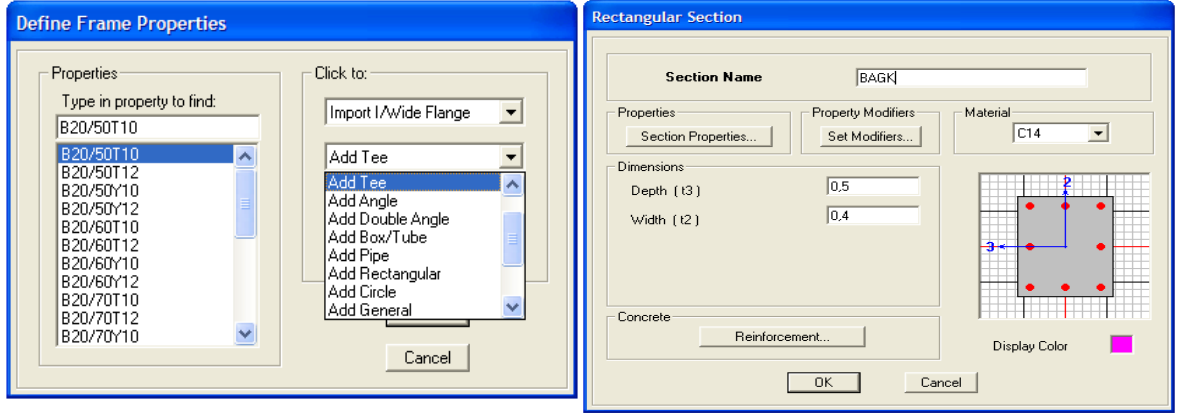
Şekil 3.16. Elevasyon

Malzeme Sınıfının Programa Tanıtılması : Koordinatların belirlenmesinden sonra yapıda kullanılmış olan malzeme bilgileri tanımlanmıştır (Şekil 3.17) .

Material Property Data	
Material Name	C14
Type of Material	☒ Isotropic ☐ Orthotropic
Display Color	Color:
Type of Design	Design: Concrete
Analysis Property Data	
Mass per unit Volume	2.4517
Weight per unit Volume	24.5166
Modulus of Elasticity	26150000
Poisson's Ratio	0.2
Coeff of Thermal Expansion	9.900E-06
Shear Modulus	10895833.3
Design Property Data (ACI 318-99)	
Specified Conc Comp Strength, f_c	137293.103
Bending Reinf. Yield Stress, f_y	215746.304
Shear Reinf. Yield Stress, f_{ys}	215746.304
☐ Lightweight Concrete Shear Strength Reduc. Factor: 	
OK Cancel	

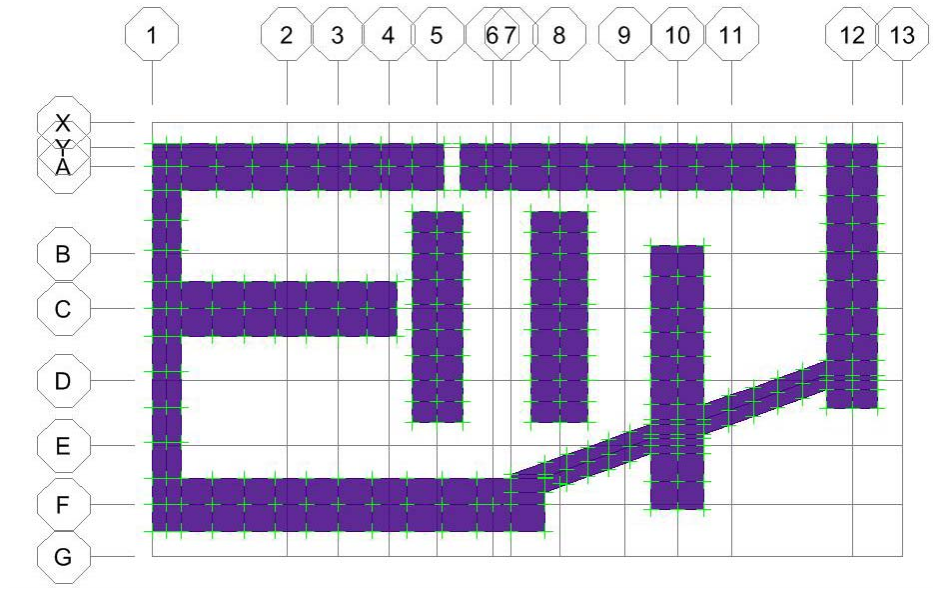
Şekil 3.17. Malzeme girdileri

Kesit Tanımlamaları : Malzeme tanımlamasından sonra yapıda kullanılan kolon, kiriş, perde, döşeme ve temel bağ kirişleri gibi tüm taşıyıcı sistem elemanlarının kesitleri ayrı ayrı tarif edilmiştir (Şekil 3.18).



Şekil 3.18. Kesit özellikleri

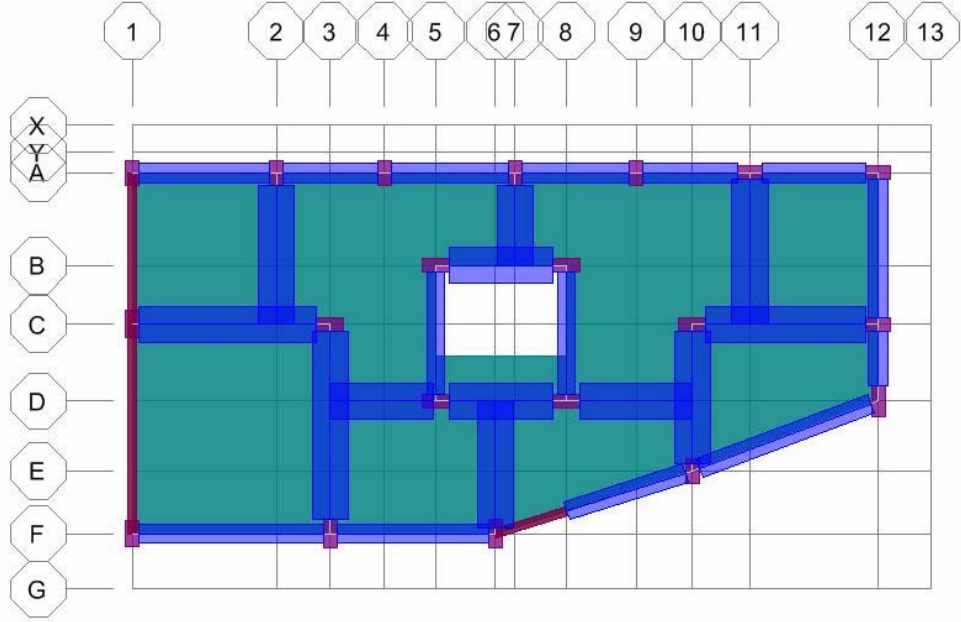
Temel Sisteminin Modellenmesi: Temel sisteminin geometrik modeli bağ kirişleri de dahil olmak üzere oluşturulmuştur (Şekil 3.19).



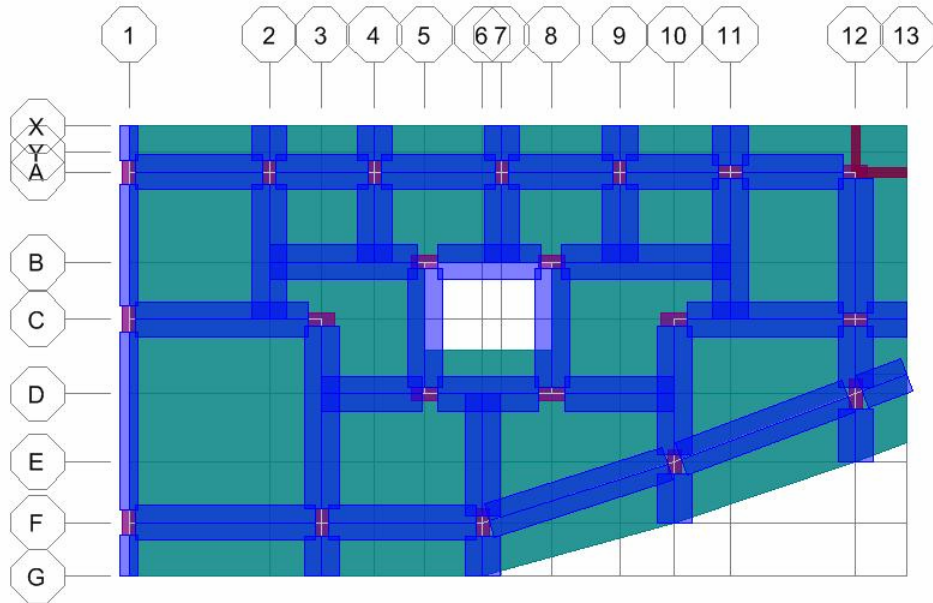
Şekil 3.19. Temel modeli

Kat Tabliyelerinin Modellenmesi: Temel modeli oluşturulduktan sonra kat tabliyeleri bodrum kat ve normal kat için oluşturulmuş, normal kat modeli çoğaltılarak tabliyelerin modellenmesi

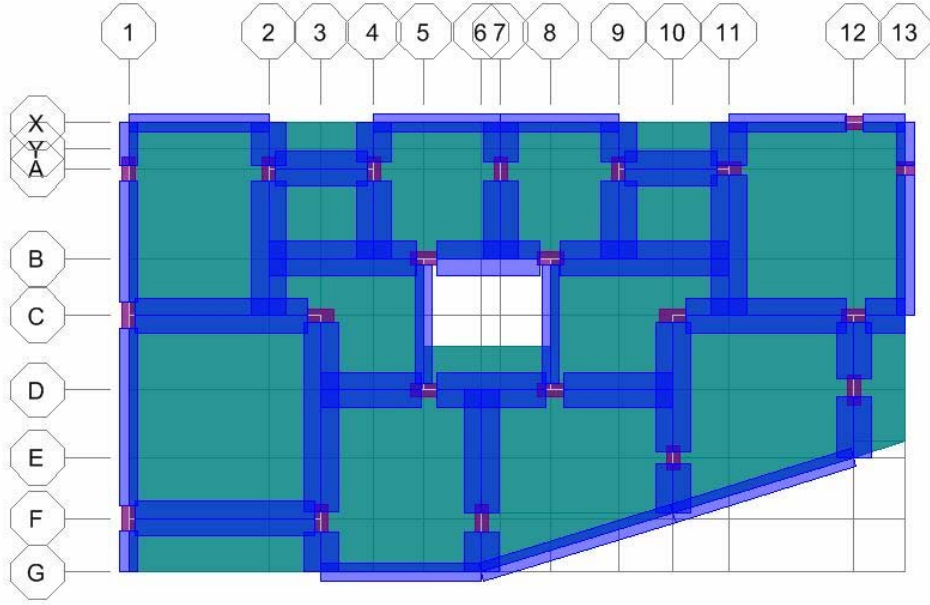
tamamlanmıştır (Şekil 3.20-3.21).



Şekil 3.20. Bodrum kat planı



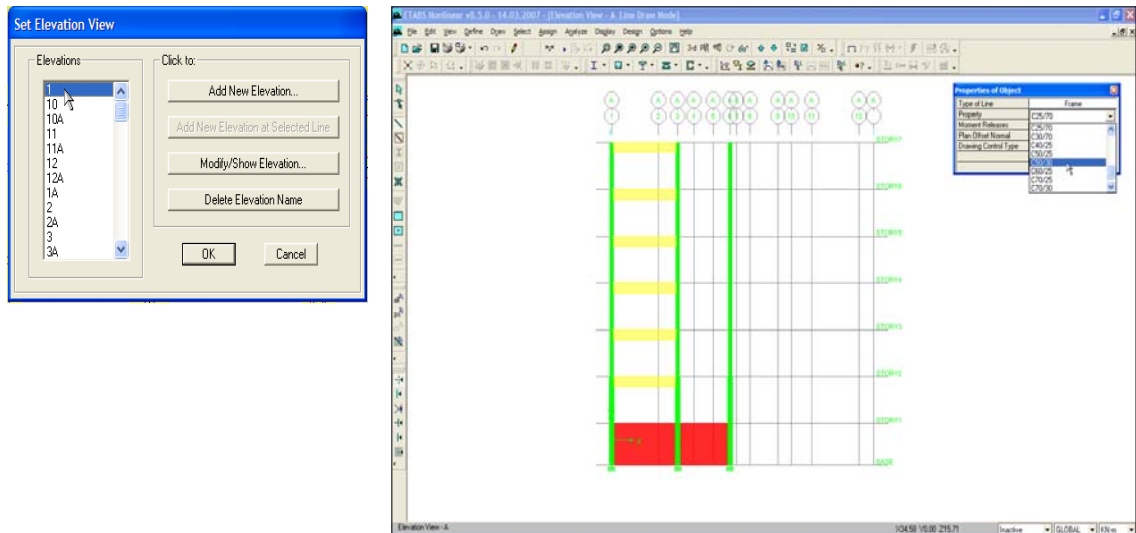
(a) Zemin kat planı



(b) Normal kat planı

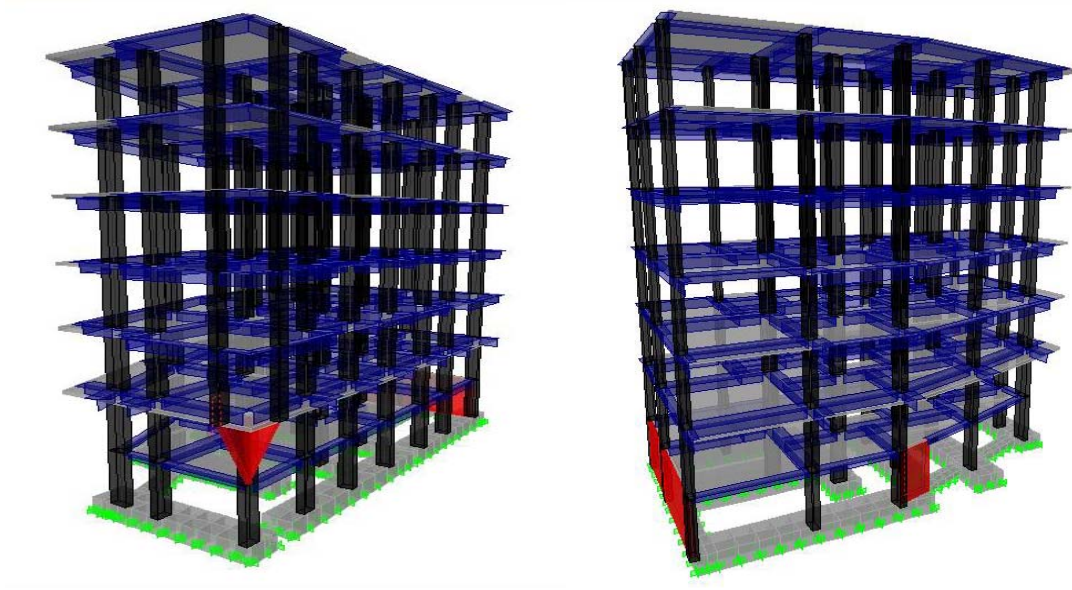
Şekil 3.21. Kat planları

Düşey Taşıyıcıların Modellenmesi: Tüm düşey taşıyıcılar elevasyonda ayrı ayrı çizilerek modelleme işlemi tamamlanmıştır (Şekil 3.22).



Şekil 3.22. Elevasyon ve düşey taşıyıcılar

Sonuç olarak mevcut durumdaki bina modeli 3 Boyutlu (3D) olarak oluşturulmuş ve analiz safhasına hazır hale getirilmiştir (Şekil 3.23).



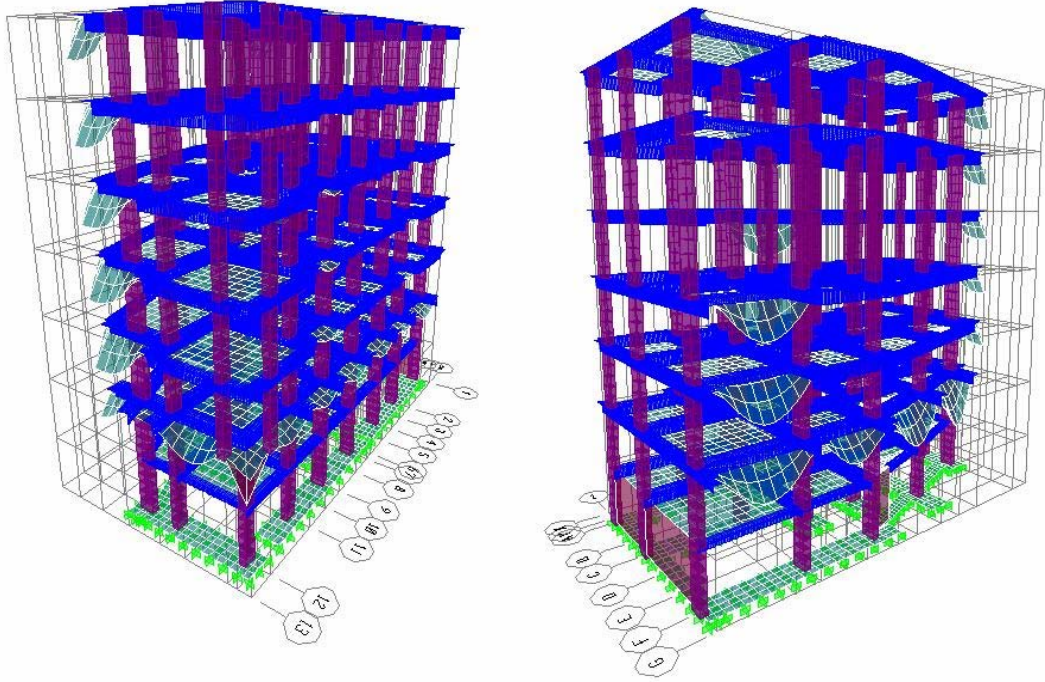
Şekil 3.23. Mevcut duruma ait 3D model

Farklı yük birleşimleri için tüm analizler yapı sistemi tabanda ankastre olacak şekilde mesnet şartı gözetilerek gerçekleştirilmiş ve temel sistemine ait sonlu eleman ağına rastlayan düğüm noktalarındaki tepki kuvvetleri bulunarak 3D zemin modeline aktarılmak üzere tablolştırılmıştır (Çizelge 3.3). Ayrıca yapı sisteminin deformasyonlu hali Şekil 3.24’de, temel plağındaki gerilmeler ise Şekil 3.25-3.27’de verilmiştir.

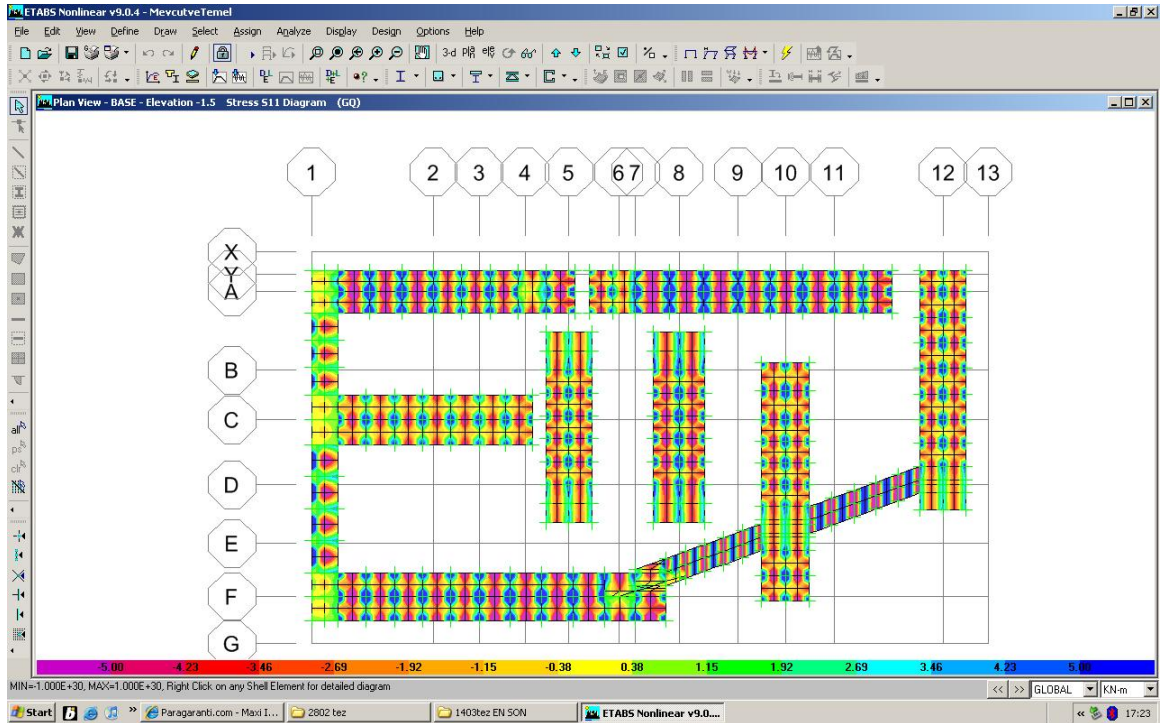
Çizelge 3.3 Temel reaksiyonları

Nokta	X (m)	Y (m)	FZ (kN)
1	0	9,21	356,18
2	3,2	9,21	533,94
3	5,6	9,21	445,34
4	8,5	9,21	427,20
5	11,2	9,21	458,33
6	13,72	9,21	530,33
7	16,57	9,21	510,21
8	6,75	7,16	481,40
9	9,65	7,16	498,19
10	16,57	5,86	508,87
11	12,44	5,86	632,27
12	4,4	5,86	714,60
13	0	5,86	671,67
14	6,75	4,16	581,25
15	9,65	4,16	575,73
16	16,57	4,16	610,25
17	12,44	2,62	693,52
18	8,06	1,23	590,22
19	4,4	1,23	812,37

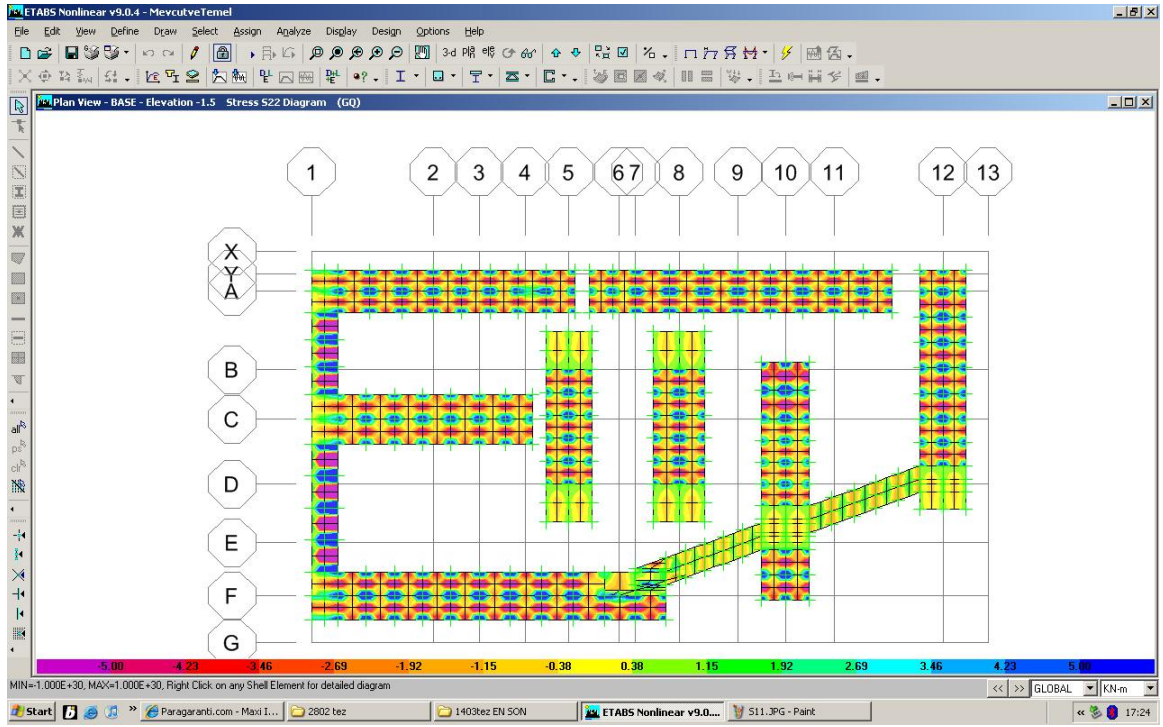
Nokta	X (m)	Y (m)	FZ (kN)
20	0	1,23	537,10
22	9,65	1,735	177,88
116	0	8,66	0,81
120	0	9,76	0,98
121	0	5,21	1,23
125	0	6,51	1,19
126	0	0,605	1,10
130	0	1,855	0,91
131	9,31	1,23	2,96
132	8,5	1,23	4,80
145	9,31	1,524	0,23
204	8,5	1,524	1,65
396	0	7,227	0,52
398	0	7,943	0,52
400	0	2,694	0,60
402	0	3,533	0,60
404	0	4,371	0,60



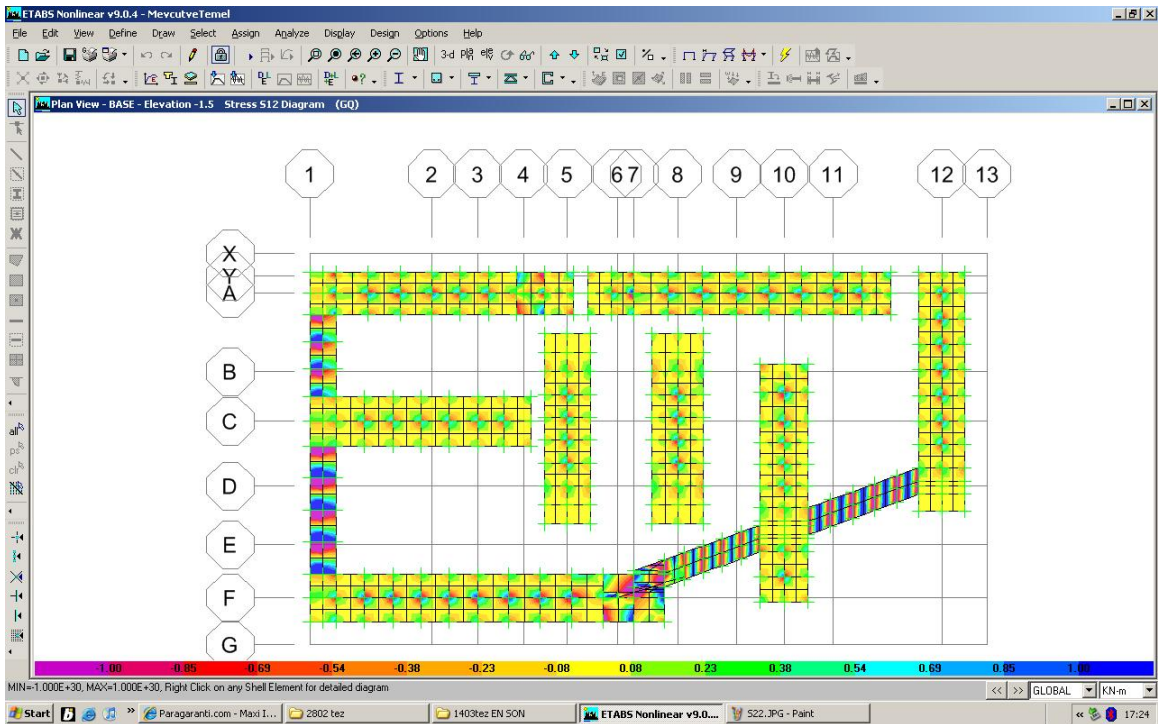
Şekil 3.24. Mevcut duruma ait deformasyonlu durum



Şekil 3.25. Temel plağı S11 gerilme diyagramı



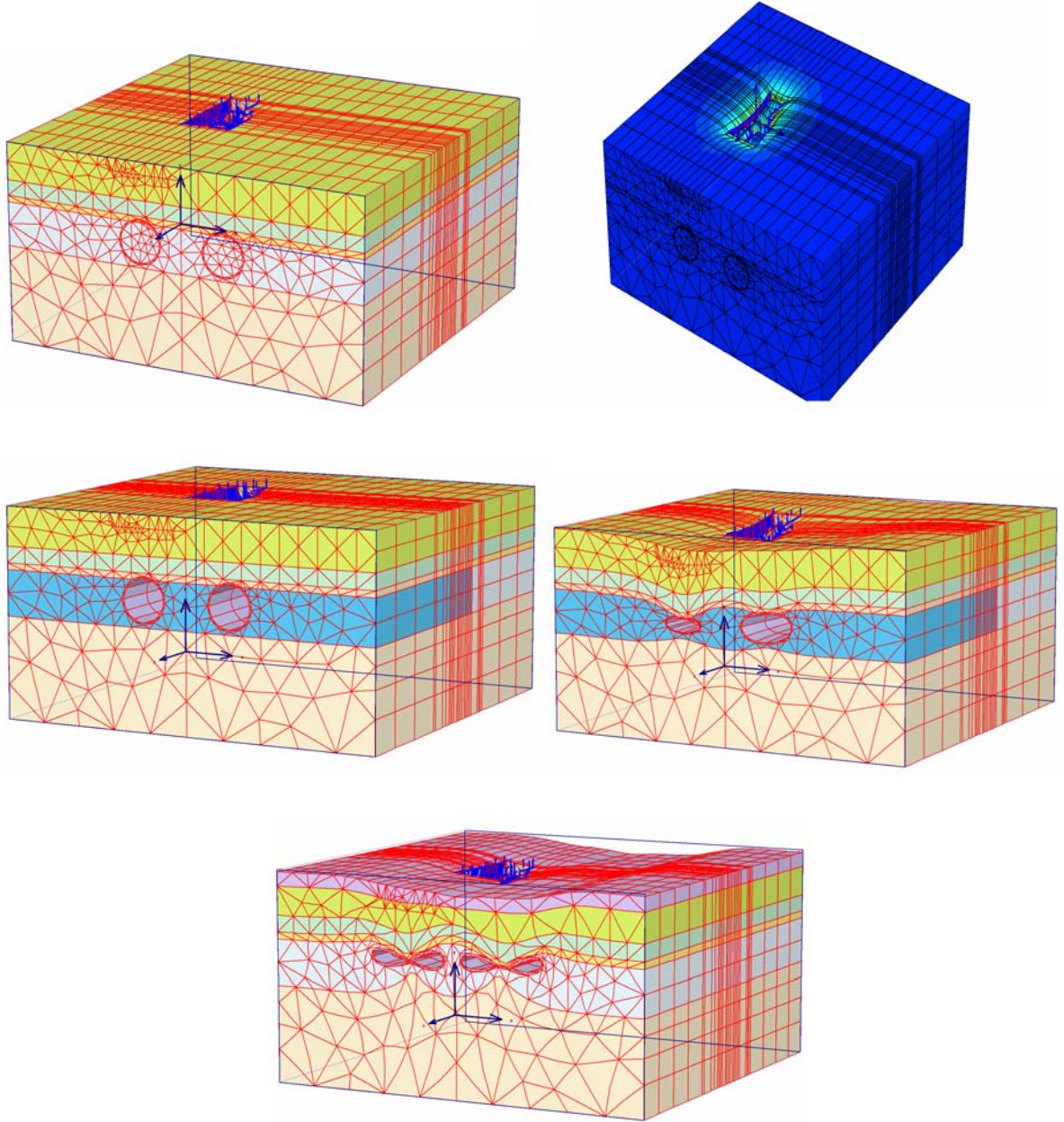
Şekil 3.26. Temel plağı S22 gerilme diyagramı



Şekil 3.27. Temel plağı S12 gerilme diyagramı

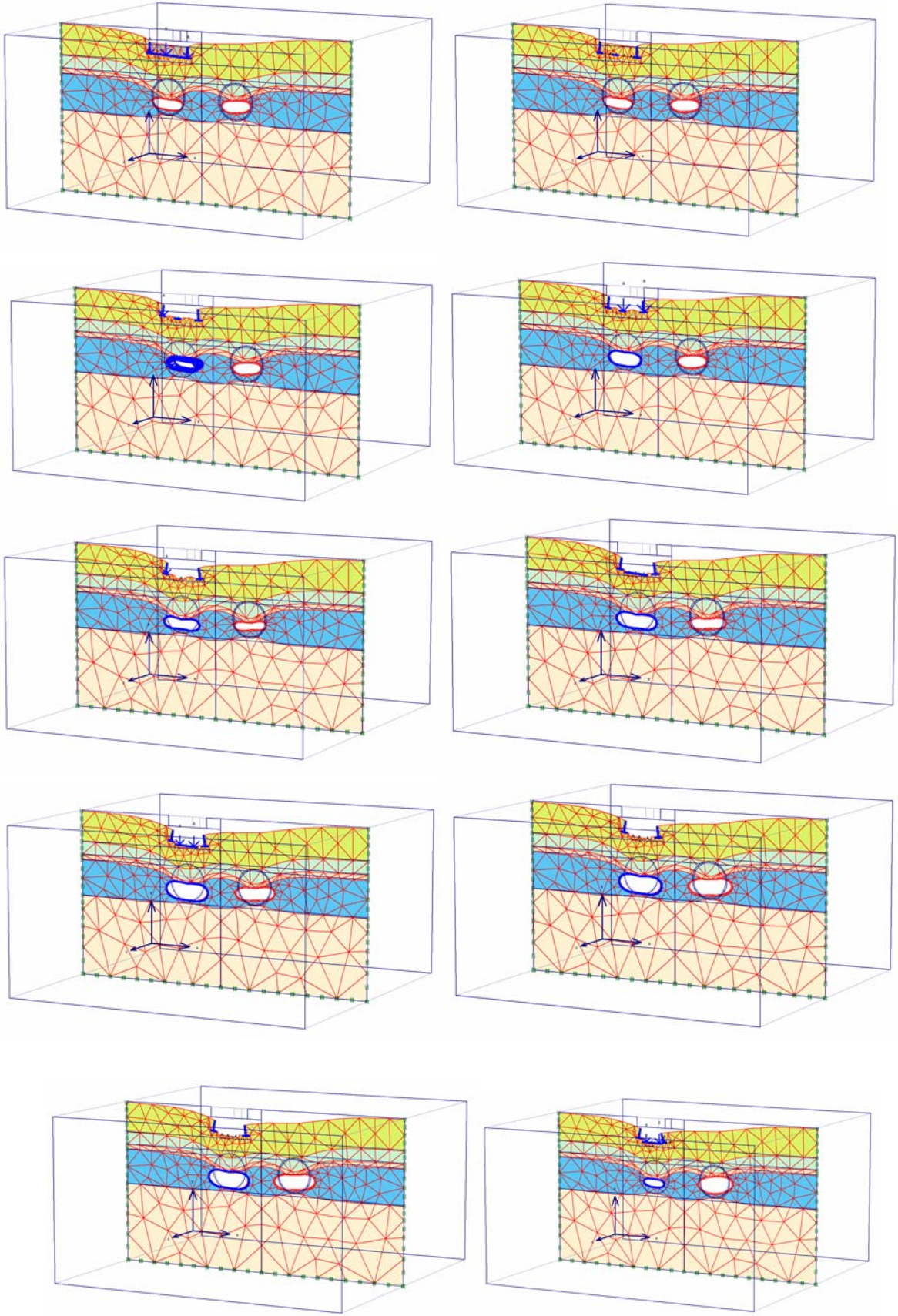
3.4.1 Zemin Oturmalarının Belirlenmesi

Bölüm 3.2’de anlatıldığı gibi 3 boyutlu zemin modeli Plaxis 3D Tunnel programı yardımıyla hazırlanmış ve yapı analizi sonucu bulunan temel sistemine ait reaksiyon kuvvetleri dolayısıyla yapı ağırlığı da modelde dikkate alınarak deformasyon analizleri gerçekleştirilmiştir (Şekil 3.28).

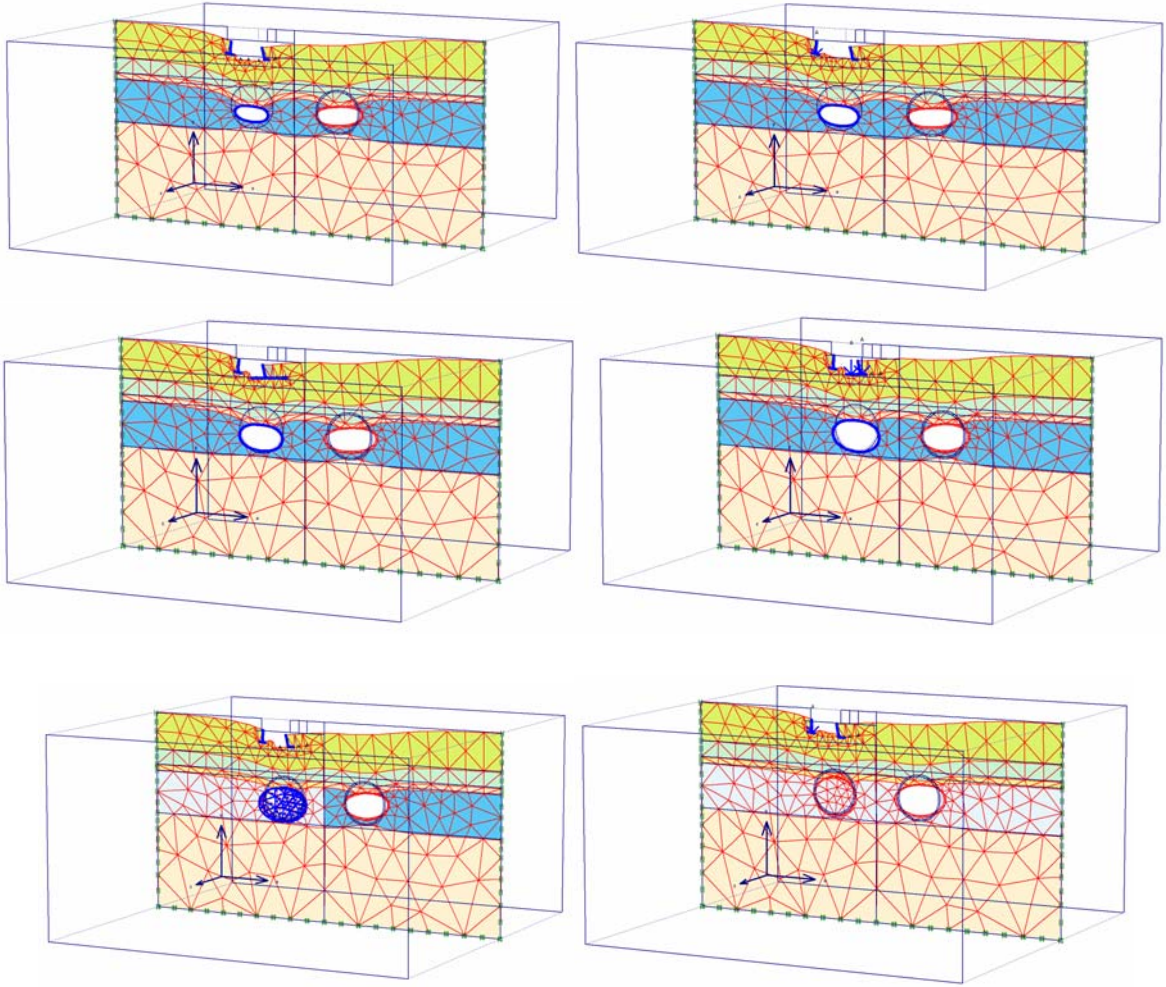


Şekil 3.28 3D zemin-yapı modeli ve deformasyon durumu(devam)

Şekil 3.29’da ise farklı kesitlere ait ve tünel kazısının farklı evreleri için deformasyon durumları görülmektedir.

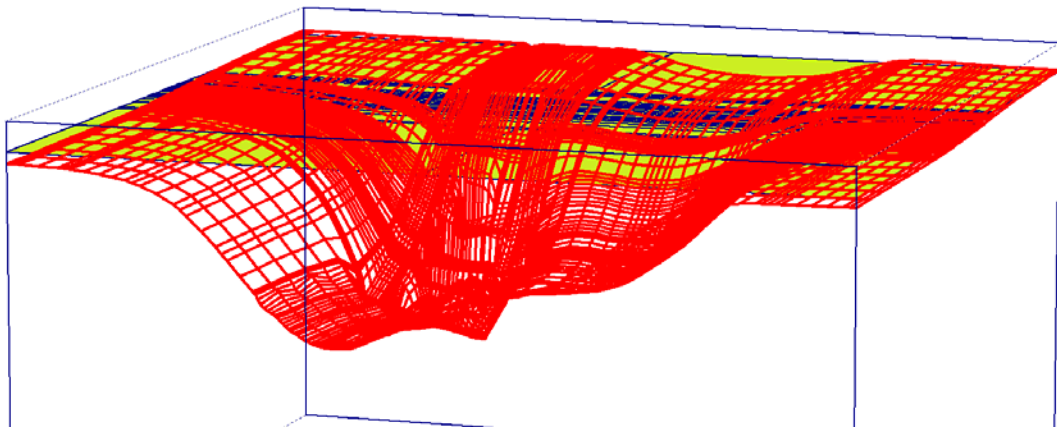


Şekil 3.29 Farklı kesit ve aşamalar için deformasyon durumları



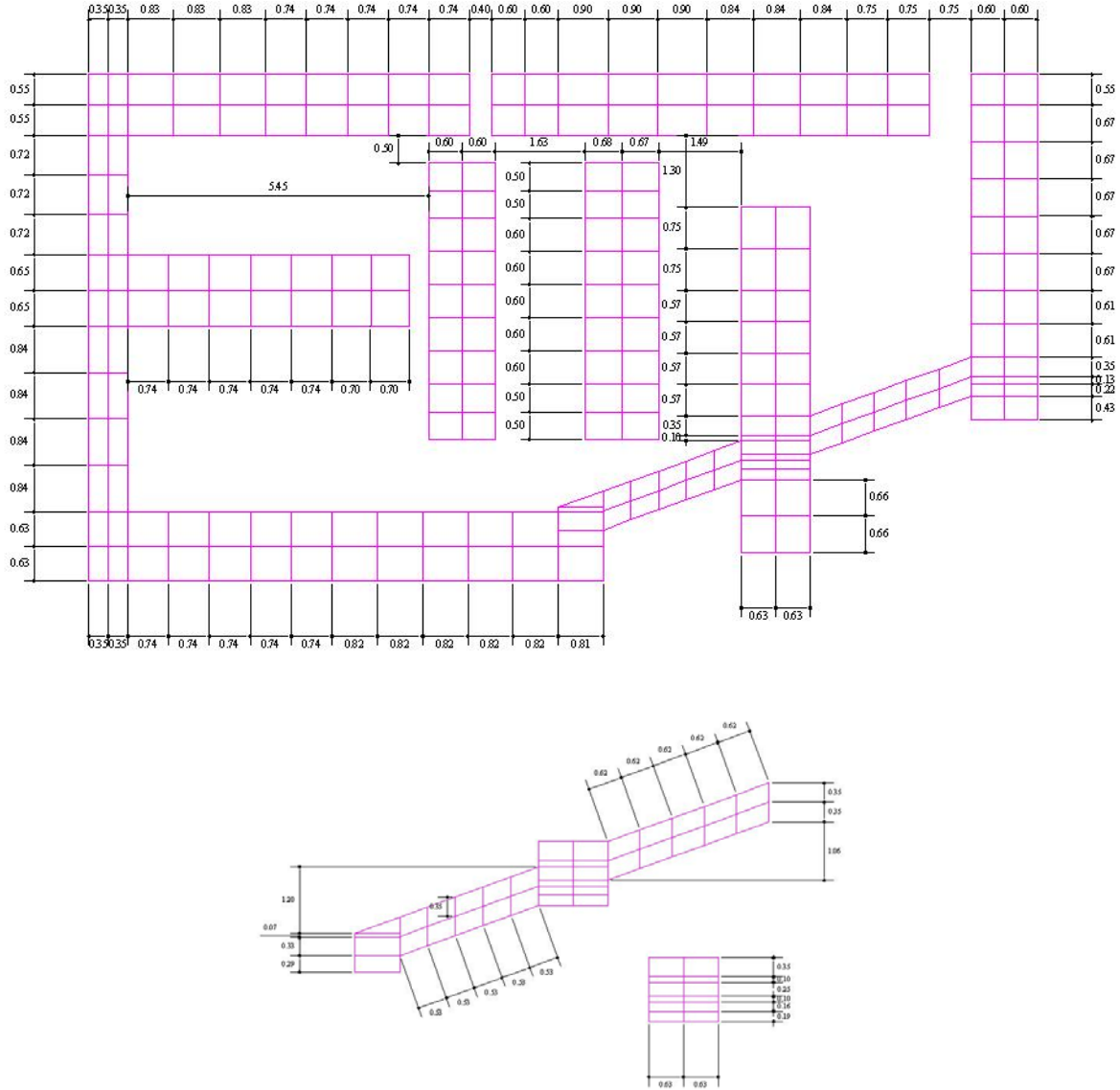
Şekil 3.29. Devamı

Yapı ağırlığı ve tünel açılması durumunda zemine ait deformasyon yüzeyi Şekil 3.30'da verilmiştir.



Şekil 3.30 Oturma yüzeyi

Oturma yüzeyinden yararlanarak, yapının temel plağı sonlu eleman düğüm noktalarına (Şekil 3.31) rastlayan oturma miktarlarını belirlemek mümkündür.



Şekil 3.31 Temel plağı sonlu eleman ağı

Bölgede gerçekleştirilen tünel kazısı ve yapı ağırlığından ileri gelen söz konusu oturmaları üst yapıda dikkate alabilmek için bundan sonraki analizlerde yer değıştirme yükleri tanımlanacak ve yapıya ilave bir yük olarak etki ettirilecektir. Yapı temeline ait sonlu eleman düğüm noktalarına ait yer değıştirmeler Çizelge 3.4’de verilmiştir. Plaxis 3D Tunnel programı ile elde edilen yer değıştirmelerin ait olduğu noktaların koordinatları; sistem eksenlerinin lokasyonu, Etabs programından farklı olduğu için, her iki program için de bu değerler ayrı ayrı gösterilmiştir.

Çizelge 3.4. Taban düğüm noktalarına ait yer değiştirmeler

Plaxis 3D Tunnel programı			
DN	X	Z	Uy
1	19,550	-20,000	-0,01903
2	19,550	-23,200	-0,02113
3	19,550	-25,600	-0,02254
4	19,550	-28,500	-0,02340
5	19,550	-31,200	-0,02369
6	19,550	-33,720	-0,02323
7	19,550	-36,570	-0,02145
8	21,600	-26,750	-0,03158
9	21,600	-29,650	-0,02999
10	22,900	-36,570	-0,02329
11	22,900	-32,440	-0,02986
12	22,900	-24,400	-0,02357
13	22,900	-20,000	-0,01953
14	24,600	-26,750	-0,02559
15	24,600	-29,650	-0,02732
16	24,600	-36,570	-0,02401
17	26,140	-32,440	-0,01999
18	27,530	-28,060	-0,02429
19	27,530	-24,400	-0,02228
20	27,530	-20,000	-0,01964
22	27,025	-29,650	-0,01973
116	20,100	-20,000	-0,01909
117	20,100	-20,700	-0,01919
118	19,550	-20,700	-0,01948
119	19,000	-20,700	-0,01926
120	19,000	-20,000	-0,01900
121	23,550	-20,000	-0,01956
122	23,550	-20,700	-0,02011
123	22,900	-20,700	-0,01987
124	22,250	-20,700	-0,01962
125	22,250	-20,000	-0,01946
126	28,155	-20,000	-0,01387
127	28,155	-20,700	-0,01514
128	27,530	-20,700	-0,01920
129	26,905	-20,700	-0,02011
130	26,905	-20,000	-0,01997
131	27,530	-29,310	-0,01751
132	27,530	-28,500	-0,02431

Etabs programı			
DN	X	Y	Uz
1	0,000	9,210	-0,01903
2	3,200	9,210	-0,02113
3	5,600	9,210	-0,02254
4	8,500	9,210	-0,02340
5	11,200	9,210	-0,02369
6	13,720	9,210	-0,02323
7	16,570	9,210	-0,02145
8	6,750	7,160	-0,03158
9	9,650	7,160	-0,02999
10	16,570	5,860	-0,02329
11	12,440	5,860	-0,02986
12	4,400	5,860	-0,02357
13	0,000	5,860	-0,01953
14	6,750	4,160	-0,02559
15	9,650	4,160	-0,02732
16	16,570	4,160	-0,02401
17	12,440	2,620	-0,01999
18	8,060	1,230	-0,02429
19	4,400	1,230	-0,02228
20	0,000	1,230	-0,01964
22	9,650	1,735	-0,01973
116	0,000	8,660	-0,01909
117	0,700	8,660	-0,01919
118	0,700	9,210	-0,01948
119	0,700	9,760	-0,01926
120	0,000	9,760	-0,01900
121	0,000	5,210	-0,01956
122	0,700	5,210	-0,02011
123	0,700	5,860	-0,01987
124	0,700	6,510	-0,01962
125	0,000	6,510	-0,01946
126	0,000	0,605	-0,01387
127	0,700	0,605	-0,01514
128	0,700	1,230	-0,01920
129	0,700	1,855	-0,02011
130	0,000	1,855	-0,01997
131	9,310	1,230	-0,01751
132	8,500	1,230	-0,02431

Çizelge 3.4. Devamı

Plaxis 3D Tunnel programı			
DN	X	Z	Uy
133	28,155	-28,500	-0,01776
134	28,155	-29,310	-0,01561
135	19,000	-36,570	-0,02162
136	19,000	-35,970	-0,02215
137	19,550	-35,970	-0,02224
138	19,550	-37,170	-0,02187
139	19,000	-37,170	-0,02159
140	26,536	-29,310	-0,02708
141	26,354	-29,811	-0,02762
142	26,704	-29,811	-0,02060
143	26,886	-29,310	-0,02194
144	27,054	-29,811	-0,01965
145	27,236	-29,310	-0,02105
146	26,172	-30,312	-0,02746
147	26,522	-30,312	-0,02746
148	26,872	-30,312	-0,02055
149	25,990	-30,813	-0,02836
150	26,340	-30,813	-0,02723
151	26,690	-30,813	-0,02019
152	25,808	-31,314	-0,02823
153	26,158	-31,314	-0,02700
154	26,508	-31,314	-0,02273
155	25,626	-31,815	-0,02815
156	25,976	-31,815	-0,02734
157	26,326	-31,815	-0,02650
158	25,173	-33,065	-0,02713
159	24,962	-33,646	-0,02727
160	25,312	-33,646	-0,02678
161	25,523	-33,065	-0,02247
162	25,662	-33,646	-0,02175
163	25,873	-33,065	-0,02047
164	24,751	-34,227	-0,02705
165	25,101	-34,227	-0,02647
166	25,451	-34,227	-0,02132
167	24,540	-34,808	-0,02603
168	24,890	-34,808	-0,02603
169	25,240	-34,808	-0,02543
170	24,329	-35,389	-0,02527

Etabs programı			
DN	X	Y	Uz
133	8,500	0,605	-0,01776
134	9,310	0,605	-0,01561
135	16,570	9,760	-0,02162
136	15,970	9,760	-0,02215
137	15,970	9,210	-0,02224
138	17,170	9,210	-0,02187
139	17,170	9,760	-0,02159
140	9,310	2,224	-0,02708
141	9,811	2,406	-0,02762
142	9,811	2,056	-0,02060
143	9,310	1,874	-0,02194
144	9,811	1,706	-0,01965
145	9,310	1,524	-0,02105
146	10,312	2,588	-0,02746
147	10,312	2,238	-0,02746
148	10,312	1,888	-0,02055
149	10,813	2,770	-0,02836
150	10,813	2,420	-0,02723
151	10,813	2,070	-0,02019
152	11,314	2,952	-0,02823
153	11,314	2,602	-0,02700
154	11,314	2,252	-0,02273
155	11,815	3,134	-0,02815
156	11,815	2,784	-0,02734
157	11,815	2,434	-0,02650
158	13,065	3,587	-0,02713
159	13,646	3,798	-0,02727
160	13,646	3,448	-0,02678
161	13,065	3,237	-0,02247
162	13,646	3,098	-0,02175
163	13,065	2,887	-0,02047
164	14,227	4,009	-0,02705
165	14,227	3,659	-0,02647
166	14,227	3,309	-0,02132
167	14,808	4,220	-0,02603
168	14,808	3,870	-0,02603
169	14,808	3,520	-0,02543
170	15,389	4,431	-0,02527

Çizelge 3.4. Devamı

Plaxis 3D Tunnel programı			
DN	X	Z	Uy
171	24,679	-35,389	-0,02603
172	25,029	-35,389	-0,02543
173	24,118	-35,970	-0,02441
174	24,468	-35,970	-0,02468
175	24,818	-35,970	-0,02497
176	26,326	-32,440	-0,01999
177	26,140	-31,815	-0,02650
178	25,976	-32,440	-0,02314
179	25,173	-32,440	-0,02789
180	25,523	-32,440	-0,02419
181	25,626	-32,440	-0,02419
182	25,523	-31,815	-0,02815
183	25,173	-31,815	-0,02792
184	25,873	-31,815	-0,02734
185	25,873	-32,440	-0,02314
186	25,626	-33,065	-0,02247
187	25,976	-33,065	-0,02047
188	25,250	-35,970	-0,02101
189	25,250	-36,570	-0,02319
190	24,818	-36,570	-0,02401
191	24,600	-35,970	-0,02497
192	24,118	-36,570	-0,02418
193	24,468	-36,570	-0,02401
194	25,250	-37,170	-0,01855
195	24,818	-37,170	-0,02340
196	24,600	-37,170	-0,02372
197	24,468	-37,170	-0,02387
198	24,118	-37,170	-0,02372
199	26,905	-28,500	-0,02654
200	26,905	-29,310	-0,02194
202	26,830	-28,500	-0,02654
203	26,830	-29,310	-0,02194
204	27,236	-28,500	-0,02487
205	20,100	-23,200	-0,01136
206	20,100	-23,940	-0,01052
207	19,550	-23,940	-0,02134
208	20,100	-24,680	-0,01147

Etabs programı			
DN	X	Y	Uz
171	15,389	4,081	-0,02603
172	15,389	3,731	-0,02543
173	15,970	4,642	-0,02441
174	15,970	4,292	-0,02468
175	15,970	3,942	-0,02497
176	12,440	2,434	-0,01999
177	11,815	2,620	-0,02650
178	12,440	2,784	-0,02314
179	12,440	3,587	-0,02789
180	12,440	3,237	-0,02419
181	12,440	3,134	-0,02419
182	11,815	3,237	-0,02815
183	11,815	3,587	-0,02792
184	11,815	2,887	-0,02734
185	12,440	2,887	-0,02314
186	13,065	3,134	-0,02247
187	13,065	2,784	-0,02047
188	15,970	3,510	-0,02101
189	16,570	3,510	-0,02319
190	16,570	3,942	-0,02401
191	15,970	4,160	-0,02497
192	16,570	4,642	-0,02418
193	16,570	4,292	-0,02401
194	17,170	3,510	-0,01855
195	17,170	3,942	-0,02340
196	17,170	4,160	-0,02372
197	17,170	4,292	-0,02387
198	17,170	4,642	-0,02372
199	8,500	1,855	-0,02654
200	9,310	1,855	-0,02194
202	8,500	1,930	-0,02654
203	9,310	1,930	-0,02194
204	8,500	1,524	-0,02487
205	3,200	8,660	-0,01136
206	3,940	8,660	-0,01052
207	3,940	9,210	-0,02134
208	4,680	8,660	-0,01147

Çizelge 3.4. Devamı

Plaxis 3D Tunnel programı			
DN	X	Z	Uy
209	19,550	-24,680	-0,02188
210	20,100	-25,420	-0,01452
211	19,550	-25,420	-0,02254
212	20,100	-26,160	-0,01907
213	19,550	-26,160	-0,02283
214	20,100	-26,900	-0,02030
215	19,550	-26,900	-0,02215
216	19,000	-23,200	-0,02077
217	19,000	-23,940	-0,02088
218	19,000	-24,680	-0,02134
219	19,000	-25,420	-0,02177
220	19,000	-26,160	-0,02200
221	19,000	-26,900	-0,02175
222	23,550	-24,400	-0,01019
223	22,900	-23,660	-0,02184
224	23,550	-23,660	-0,00832
225	22,900	-22,920	-0,02052
226	23,550	-22,920	-0,00517
227	22,900	-22,180	-0,02052
228	23,550	-22,180	-0,00517
229	22,900	-21,440	-0,02052
230	23,550	-21,440	-0,00517
231	22,250	-24,400	-0,02420
232	22,250	-23,660	-0,02209
233	22,250	-22,920	-0,02039
234	22,250	-22,180	-0,02039
235	22,250	-21,440	-0,02039
236	28,155	-24,400	-0,01729
237	27,530	-23,660	-0,02136
238	28,155	-23,660	-0,01663
239	27,530	-22,920	-0,01985
240	28,155	-22,920	-0,01594
241	27,530	-22,180	-0,01985
242	28,155	-22,180	-0,01594
243	27,530	-21,440	-0,01985
244	28,155	-21,440	-0,01594
245	28,155	-25,220	-0,01751
246	27,530	-25,220	-0,02258

Etabs programı			
DN	X	Y	Uz
209	4,680	9,210	-0,02188
210	5,420	8,660	-0,01452
211	5,420	9,210	-0,02254
212	6,160	8,660	-0,01907
213	6,160	9,210	-0,02283
214	6,900	8,660	-0,02030
215	6,900	9,210	-0,02215
216	3,200	9,760	-0,02077
217	3,940	9,760	-0,02088
218	4,680	9,760	-0,02134
219	5,420	9,760	-0,02177
220	6,160	9,760	-0,02200
221	6,900	9,760	-0,02175
222	4,400	5,210	-0,01019
223	3,660	5,860	-0,02184
224	3,660	5,210	-0,00832
225	2,920	5,860	-0,02052
226	2,920	5,210	-0,00517
227	2,180	5,860	-0,02052
228	2,180	5,210	-0,00517
229	1,440	5,860	-0,02052
230	1,440	5,210	-0,00517
231	4,400	6,510	-0,02420
232	3,660	6,510	-0,02209
233	2,920	6,510	-0,02039
234	2,180	6,510	-0,02039
235	1,440	6,510	-0,02039
236	4,400	0,605	-0,01729
237	3,660	1,230	-0,02136
238	3,660	0,605	-0,01663
239	2,920	1,230	-0,01985
240	2,920	0,605	-0,01594
241	2,180	1,230	-0,01985
242	2,180	0,605	-0,01594
243	1,440	1,230	-0,01985
244	1,440	0,605	-0,01594
245	5,220	0,605	-0,01751
246	5,220	1,230	-0,02258

Çizelge 3.4. Devamı

Plaxis 3D Tunnel programı			
DN	X	Z	Uy
247	28,155	-26,040	-0,01786
248	27,530	-26,040	-0,02285
249	28,155	-26,860	-0,01808
250	27,530	-26,860	-0,02252
251	28,155	-27,680	-0,01844
252	27,530	-27,680	-0,02372
253	26,905	-24,400	-0,02164
254	26,905	-23,660	-0,02210
255	26,905	-22,920	-0,02102
256	26,905	-22,180	-0,02102
257	26,905	-21,440	-0,02102
258	26,905	-25,220	-0,02209
259	26,905	-26,040	-0,02271
260	26,905	-26,860	-0,02364
261	26,905	-27,680	-0,02397
262	19,550	-22,367	-0,02033
263	20,100	-22,367	-0,00991
264	19,550	-21,533	-0,02033
265	20,100	-21,533	-0,00991
266	19,000	-22,367	-0,02005
267	19,000	-21,533	-0,02005
268	20,100	-33,720	-0,01140
269	19,550	-32,880	-0,02350
270	20,100	-32,880	-0,01166
271	19,550	-32,040	-0,02358
272	20,100	-32,040	-0,01207
273	20,100	-31,200	-0,01322
274	19,000	-33,720	-0,02281
275	19,000	-32,880	-0,02277
276	19,000	-32,040	-0,02281
277	19,000	-31,200	-0,02289
278	19,550	-29,400	-0,02354
279	19,000	-29,400	-0,02262
280	19,000	-28,500	-0,02254
281	19,550	-30,300	-0,02374
282	19,000	-30,300	-0,02283
283	20,100	-30,300	-0,01835
284	20,100	-29,400	-0,02033

Etabs programı			
DN	X	Y	Uz
247	6,040	0,605	-0,01786
248	6,040	1,230	-0,02285
249	6,860	0,605	-0,01808
250	6,860	1,230	-0,02252
251	7,680	0,605	-0,01844
252	7,680	1,230	-0,02372
253	4,400	1,855	-0,02164
254	3,660	1,855	-0,02210
255	2,920	1,855	-0,02102
256	2,180	1,855	-0,02102
257	1,440	1,855	-0,02102
258	5,220	1,855	-0,02209
259	6,040	1,855	-0,02271
260	6,860	1,855	-0,02364
261	7,680	1,855	-0,02397
262	2,367	9,210	-0,02033
263	2,367	8,660	-0,00991
264	1,533	9,210	-0,02033
265	1,533	8,660	-0,00991
266	2,367	9,760	-0,02005
267	1,533	9,760	-0,02005
268	13,720	8,660	-0,01140
269	12,880	9,210	-0,02350
270	12,880	8,660	-0,01166
271	12,040	9,210	-0,02358
272	12,040	8,660	-0,01207
273	11,200	8,660	-0,01322
274	13,720	9,760	-0,02281
275	12,880	9,760	-0,02277
276	12,040	9,760	-0,02281
277	11,200	9,760	-0,02289
278	9,400	9,210	-0,02354
279	9,400	9,760	-0,02262
280	8,500	9,760	-0,02254
281	10,300	9,210	-0,02374
282	10,300	9,760	-0,02283
283	10,300	8,660	-0,01835
284	9,400	8,660	-0,02033

Çizelge 3.4. Devamı

Plaxis 3D Tunnel programı			
DN	X	Z	Uy
285	20,100	-28,500	-0,01555
286	24,000	-26,750	-0,02692
287	24,000	-26,150	-0,02662
288	24,600	-26,150	-0,02544
289	23,400	-26,750	-0,02784
290	23,400	-26,150	-0,02777
291	22,800	-26,750	-0,02959
292	22,800	-26,150	-0,02967
293	22,200	-26,750	-0,03071
294	22,200	-26,150	-0,03106
295	21,600	-26,150	-0,03165
296	22,200	-27,350	-0,03085
297	21,600	-27,350	-0,03153
298	22,800	-27,350	-0,02947
299	23,400	-27,350	-0,02771
300	24,000	-27,350	-0,02663
301	24,600	-27,350	-0,02550
302	24,000	-29,650	-0,02810
303	24,000	-28,975	-0,02812
304	24,600	-28,975	-0,02735
305	23,400	-29,650	-0,02842
306	23,400	-28,975	-0,02851
307	22,800	-29,650	-0,02917
308	22,800	-28,975	-0,02916
309	22,200	-29,650	-0,02954
310	22,200	-28,975	-0,02971
311	21,600	-28,975	-0,02966
312	22,200	-30,325	-0,02807
313	21,600	-30,325	-0,02826
314	22,800	-30,325	-0,02740
315	23,400	-30,325	-0,02665
316	24,000	-30,325	-0,02623
317	24,600	-30,325	-0,02565
318	22,230	-36,570	-0,01454
319	22,230	-35,970	-0,01550
320	22,900	-35,970	-0,02383
321	21,560	-36,570	-0,01266
322	21,560	-35,970	-0,01079

Etabs programı			
DN	X	Y	Uz
285	8,500	8,660	-0,01555
286	6,750	4,760	-0,02692
287	6,150	4,760	-0,02662
288	6,150	4,160	-0,02544
289	6,750	5,360	-0,02784
290	6,150	5,360	-0,02777
291	6,750	5,960	-0,02959
292	6,150	5,960	-0,02967
293	6,750	6,560	-0,03071
294	6,150	6,560	-0,03106
295	6,150	7,160	-0,03165
296	7,350	6,560	-0,03085
297	7,350	7,160	-0,03153
298	7,350	5,960	-0,02947
299	7,350	5,360	-0,02771
300	7,350	4,760	-0,02663
301	7,350	4,160	-0,02550
302	9,650	4,760	-0,02810
303	8,975	4,760	-0,02812
304	8,975	4,160	-0,02735
305	9,650	5,360	-0,02842
306	8,975	5,360	-0,02851
307	9,650	5,960	-0,02917
308	8,975	5,960	-0,02916
309	9,650	6,560	-0,02954
310	8,975	6,560	-0,02971
311	8,975	7,160	-0,02966
312	10,325	6,560	-0,02807
313	10,325	7,160	-0,02826
314	10,325	5,960	-0,02740
315	10,325	5,360	-0,02665
316	10,325	4,760	-0,02623
317	10,325	4,160	-0,02565
318	16,570	6,530	-0,01454
319	15,970	6,530	-0,01550
320	15,970	5,860	-0,02383
321	16,570	7,200	-0,01266
322	15,970	7,200	-0,01079

Çizelge 3.4. Devamı

Plaxis 3D Tunnel programı			
DN	X	Z	Uy
323	20,890	-36,570	-0,01098
324	20,890	-35,970	-0,00883
325	20,220	-36,570	-0,01413
326	20,220	-35,970	-0,01153
327	20,220	-37,170	-0,02200
328	20,890	-37,170	-0,02240
329	21,560	-37,170	-0,02256
330	22,230	-37,170	-0,02285
331	22,900	-37,170	-0,02330
332	25,600	-26,750	-0,01128
333	25,100	-26,750	-0,02328
334	25,100	-26,150	-0,02312
335	25,600	-26,150	-0,00936
336	25,100	-27,350	-0,02357
337	25,600	-27,350	-0,01249
338	21,100	-26,750	-0,03391
339	21,100	-26,150	-0,03349
340	20,600	-26,750	-0,03481
341	20,600	-26,150	-0,03444
342	21,100	-27,350	-0,03328
343	20,600	-27,350	-0,03430
344	25,600	-29,650	-0,02855
345	25,100	-29,650	-0,02649
346	25,100	-28,975	-0,02561
347	25,600	-28,975	-0,02713
348	25,100	-30,325	-0,02529
349	25,600	-30,325	-0,02867
350	21,100	-29,650	-0,03150
351	21,100	-28,975	-0,03096
352	20,600	-29,650	-0,03202
353	20,600	-28,975	-0,03050
354	21,100	-30,325	-0,02939
355	20,600	-30,325	-0,02999
356	24,604	-33,065	-0,02704
357	24,604	-32,440	-0,02780
358	24,036	-33,065	-0,02710
359	24,036	-32,440	-0,02805
360	23,468	-33,065	-0,02684

Etabs programı			
DN	X	Y	Uz
323	16,570	7,870	-0,01098
324	15,970	7,870	-0,00883
325	16,570	8,540	-0,01413
326	15,970	8,540	-0,01153
327	17,170	8,540	-0,02200
328	17,170	7,870	-0,02240
329	17,170	7,200	-0,02256
330	17,170	6,530	-0,02285
331	17,170	5,860	-0,02330
332	6,750	3,160	-0,01128
333	6,750	3,660	-0,02328
334	6,150	3,660	-0,02312
335	6,150	3,160	-0,00936
336	7,350	3,660	-0,02357
337	7,350	3,160	-0,01249
338	6,750	7,660	-0,03391
339	6,150	7,660	-0,03349
340	6,750	8,160	-0,03481
341	6,150	8,160	-0,03444
342	7,350	7,660	-0,03328
343	7,350	8,160	-0,03430
344	9,650	3,160	-0,02855
345	9,650	3,660	-0,02649
346	8,975	3,660	-0,02561
347	8,975	3,160	-0,02713
348	10,325	3,660	-0,02529
349	10,325	3,160	-0,02867
350	9,650	7,660	-0,03150
351	8,975	7,660	-0,03096
352	9,650	8,160	-0,03202
353	8,975	8,160	-0,03050
354	10,325	7,660	-0,02939
355	10,325	8,160	-0,02999
356	13,065	4,156	-0,02704
357	12,440	4,156	-0,02780
358	13,065	4,724	-0,02710
359	12,440	4,724	-0,02805
360	13,065	5,292	-0,02684

Çizelge 3.4. Devamı

Plaxis 3D Tunnel programı			
DN	X	Z	Uy
361	23,468	-32,440	-0,02885
362	22,900	-33,065	-0,02611
363	24,604	-31,815	-0,02776
364	24,036	-31,815	-0,02802
365	23,468	-31,815	-0,02845
366	22,900	-31,815	-0,02929
367	23,509	-36,570	-0,02418
368	23,509	-35,970	-0,02382
369	23,509	-37,170	-0,02353
370	22,150	-32,440	-0,03228
371	22,150	-31,815	-0,03151
372	21,400	-32,440	-0,01696
373	21,400	-31,815	-0,03018
374	22,150	-33,065	-0,02488
375	21,400	-33,065	-0,01472
376	26,983	-31,815	-0,01801
377	26,983	-32,440	-0,01642
378	27,640	-31,815	-0,01408
379	27,640	-32,440	-0,01272
380	26,326	-33,065	-0,01821
381	26,983	-33,065	-0,01532
382	27,640	-33,065	-0,01227
383	20,100	-34,470	-0,00984
384	19,550	-34,470	-0,02271
385	20,100	-35,220	-0,00984
386	19,550	-35,220	-0,02271
387	19,000	-34,470	-0,02240
388	19,000	-35,220	-0,02240
389	19,550	-27,300	-0,02311
390	19,550	-27,900	-0,02338
391	19,000	-27,900	-0,02249
392	19,000	-27,300	-0,02224
393	20,100	-27,900	-0,01559
394	20,100	-27,300	-0,01872
395	21,533	-20,700	-0,01932
396	21,533	-20,000	-0,01935
397	20,817	-20,700	-0,01964
398	20,817	-20,000	-0,01924

Etabs programı			
DN	X	Y	Uz
361	12,440	5,292	-0,02885
362	13,065	5,860	-0,02611
363	11,815	4,156	-0,02776
364	11,815	4,724	-0,02802
365	11,815	5,292	-0,02845
366	11,815	5,860	-0,02929
367	16,570	5,251	-0,02418
368	15,970	5,251	-0,02382
369	17,170	5,251	-0,02353
370	12,440	6,610	-0,03228
371	11,815	6,610	-0,03151
372	12,440	7,360	-0,01696
373	11,815	7,360	-0,03018
374	13,065	6,610	-0,02488
375	13,065	7,360	-0,01472
376	11,815	1,777	-0,01801
377	12,440	1,777	-0,01642
378	11,815	1,120	-0,01408
379	12,440	1,120	-0,01272
380	13,065	2,434	-0,01821
381	13,065	1,777	-0,01532
382	13,065	1,120	-0,01227
383	14,470	8,660	-0,00984
384	14,470	9,210	-0,02271
385	15,220	8,660	-0,00984
386	15,220	9,210	-0,02271
387	14,470	9,760	-0,02240
388	15,220	9,760	-0,02240
389	7,300	9,210	-0,02311
390	7,900	9,210	-0,02338
391	7,900	9,760	-0,02249
392	7,300	9,760	-0,02224
393	7,900	8,660	-0,01559
394	7,300	8,660	-0,01872
395	0,700	7,227	-0,01932
396	0,000	7,227	-0,01935
397	0,700	7,943	-0,01964
398	0,000	7,943	-0,01924

Çizelge 3.4. Devamı

Plaxis 3D Tunnel programı			
DN	X	Z	Uy
399	26,066	-20,700	-0,02051
400	26,066	-20,000	-0,01983
401	25,227	-20,700	-0,02026
402	25,227	-20,000	-0,01972
403	24,389	-20,700	-0,02003
404	24,389	-20,000	-0,01961
405	23,550	-25,100	-0,00876
406	22,900	-25,100	-0,02515
407	23,550	-25,800	-0,01438
408	22,900	-25,800	-0,02204
409	22,250	-25,100	-0,02487
410	22,250	-25,800	-0,02368
411	26,140	-33,065	-0,02047
460	20,100	-20,350	-0,01887
461	19,550	-20,350	-0,01881
462	19,000	-20,350	-0,01869
463	23,550	-20,350	-0,01917
464	22,900	-20,350	-0,01935
465	22,250	-20,350	-0,01925
466	28,155	-20,350	-0,01465
467	27,530	-20,350	-0,01877
468	26,905	-20,350	-0,01993
469	21,533	-20,350	-0,01910
470	20,817	-20,350	-0,01877
471	26,066	-20,350	-0,01977
472	25,227	-20,350	-0,01977
473	24,389	-20,350	-0,01963

Etabs programı			
DN	X	Y	Uz
399	0,700	2,694	-0,02051
400	0,000	2,694	-0,01983
401	0,700	3,533	-0,02026
402	0,000	3,533	-0,01972
403	0,700	4,371	-0,02003
404	0,000	4,371	-0,01961
405	5,100	5,210	-0,00876
406	5,100	5,860	-0,02515
407	5,800	5,210	-0,01438
408	5,800	5,860	-0,02204
409	5,100	6,510	-0,02487
410	5,800	6,510	-0,02368
411	13,065	2,620	-0,02047
460	0,350	8,660	-0,01887
461	0,350	9,210	-0,01881
462	0,350	9,760	-0,01869
463	0,350	5,210	-0,01917
464	0,350	5,860	-0,01935
465	0,350	6,510	-0,01925
466	0,350	0,605	-0,01465
467	0,350	1,230	-0,01877
468	0,350	1,855	-0,01993
469	0,350	7,227	-0,01910
470	0,350	7,943	-0,01877
471	0,350	2,694	-0,01977
472	0,350	3,533	-0,01977
473	0,350	4,371	-0,01963

4. DEĞERLENDİRME ve İRDELEMELER

Bu tez kapsamında zemin-yapı etkileşimi problemini incelemek amacıyla belirlenmiş örnek olarak ele alınan, İstanbul ili, Esenler ilçesi, Fevzi Çakmak mahallesi, 29. sokak 4 pafta-3141 parsel no ile tapuya kayıtlı bulunan yapı, bölgede gerçekleştirilen tünel kazı çalışmaları sırasında bazı yapısal deformasyonlar meydana geldiği için boşaltılarak mühürlenmiştir. Onaylı projelerine de uygun olarak imal edilmemiş olan ve bu sebeple kusurlu sayılabilecek yapıda, tünel kazı işlemi nedeniyle meydana gelen ilave etkileri (yer değiştirme ve/veya gerilme) belirleyebilmek amacıyla 3 boyutlu zemin ve yapısal analizler gerçekleştirilmiştir. İleriki bölümlerde, bina yüzeyine yerleştirilen prizmalar yardımı ve yerden alınan topoğrafik ölçümler ile belirlenen yapıdaki hareketler, nümerik analiz sonuçları ile karşılaştırılmıştır. Ayrıca, tünel açılması sırasında yapıda meydana gelebilecek hasar durumları araştırılmıştır.

4.1 Yer Değiştirmeler

Bölüm 3’de oldukça detaylı olarak anlatıldığı gibi projesinde ve yerinde oldukça önemli yapısal farklılıklar içeren örnek yapı mevcut durum dikkate alınarak ETABS programı ile modellenmiş, zemindeki oturmalar da dikkate alınarak yapısal çözümlemeler gerçekleştirilmiştir. Çizelge 4.1’de yapı ağırlığı-tünel kazısı sonucu hesaplanan yer değiştirmeler, Şekil 4.1’de ise bina yüzeyine yerleştirilen prizmaların lokasyonları görülmektedir.

Çizelge 4.1 Yer değiştirmeler(Zemin kat)

Kat no	Nokta	UZ (m)	Kat no	Nokta	UZ (m)
ZEMİN	1	-0,0194	ZEMİN	18	-0,0241
ZEMİN	2	-0,0221	ZEMİN	19	-0,0233
ZEMİN	3	-0,0237	ZEMİN	20	-0,0201
ZEMİN	4	-0,0247	ZEMİN	24	-0,0238
ZEMİN	5	-0,0247	ZEMİN	25	-0,0297
ZEMİN	6	-0,024	ZEMİN	26	-0,0245
ZEMİN	7	-0,0221	ZEMİN	27	-0,0254
ZEMİN	8	-0,0302	ZEMİN	28	-0,028
ZEMİN	9	-0,0294	ZEMİN	29	-0,0269
ZEMİN	10	-0,0242	ZEMİN	30	-0,0219
ZEMİN	11	-0,0291	ZEMİN	31	-0,0218
ZEMİN	12	-0,0244	ZEMİN	32	-0,0193
ZEMİN	13	-0,0199	ZEMİN	33	-0,0218
ZEMİN	14	-0,0263	ZEMİN	34	-0,0228
ZEMİN	15	-0,0275	ZEMİN	35	-0,024
ZEMİN	16	-0,0245	ZEMİN	36	-0,0241
ZEMİN	17	-0,0222	ZEMİN	37	-0,0234

Çizelge 4.1 Devamı (Kat 1)

Kat no	Nokta	UZ (m)	Kat no	Nokta	UZ (m)
KAT1	1	-0,0196	KAT1	30	-0,0221
KAT1	2	-0,0225	KAT1	31	-0,022
KAT1	3	-0,0241	KAT1	32	-0,0194
KAT1	4	-0,0252	KAT1	33	-0,0222
KAT1	5	-0,0251	KAT1	34	-0,0235
KAT1	6	-0,0244	KAT1	35	-0,0246
KAT1	8	-0,0296	KAT1	36	-0,0246
KAT1	9	-0,0292	KAT1	37	-0,0237
KAT1	10	-0,0245	KAT1	38	-0,0218
KAT1	11	-0,0289	KAT1	39	-0,0243
KAT1	12	-0,0247	KAT1	40	-0,0239
KAT1	13	-0,0202	KAT1	41	-0,0246
KAT1	14	-0,0266	KAT1	42	-0,0249
KAT1	15	-0,0276	KAT1	44	-0,0229
KAT1	16	-0,0247	KAT1	45	-0,0206
KAT1	17	-0,023	KAT1	46	-0,0236
KAT1	18	-0,0245	KAT1	47	-0,0266
KAT1	19	-0,0237	KAT1	48	-0,0285
KAT1	20	-0,0204	KAT1	49	-0,0282
KAT1	22	0	KAT1	55	-0,0276
KAT1	24	-0,0241	KAT1	56	-0,0283
KAT1	25	-0,0293	KAT1	57	-0,0277
KAT1	26	-0,0248	KAT1	58	-0,0259
KAT1	27	-0,0257	KAT1	59	-0,0245
KAT1	28	-0,028	KAT1	60	0
KAT1	29	-0,0271	KAT1	76	-0,0248

Çizelge 4.1 Devamı (Kat 2)

Kat no	Nokta	UZ (m)	Kat no	Nokta	UZ (m)
KAT2	1	-0,0197	KAT2	30	-0,0223
KAT2	2	-0,0228	KAT2	31	-0,0222
KAT2	3	-0,0244	KAT2	32	-0,0196
KAT2	4	-0,0256	KAT2	33	-0,0225
KAT2	5	-0,0254	KAT2	34	-0,0239
KAT2	6	-0,0247	KAT2	35	-0,0251
KAT2	8	-0,0293	KAT2	36	-0,0249
KAT2	9	-0,0291	KAT2	37	-0,024
KAT2	10	-0,0248	KAT2	38	-0,022
KAT2	11	-0,0287	KAT2	39	-0,0246
KAT2	12	-0,025	KAT2	40	-0,0242
KAT2	13	-0,0205	KAT2	41	-0,0249
KAT2	14	-0,0267	KAT2	42	-0,0251
KAT2	15	-0,0277	KAT2	44	-0,0236
KAT2	16	-0,0248	KAT2	45	-0,0208
KAT2	17	-0,0236	KAT2	46	-0,0239
KAT2	18	-0,0247	KAT2	47	-0,0267
KAT2	19	-0,024	KAT2	48	-0,0285
KAT2	20	-0,0206	KAT2	49	-0,028
KAT2	22	0	KAT2	55	-0,0276
KAT2	24	-0,0243	KAT2	56	-0,0283
KAT2	25	-0,0291	KAT2	57	-0,0277
KAT2	26	-0,0251	KAT2	58	-0,026
KAT2	27	-0,026	KAT2	59	-0,0248
KAT2	28	-0,0279	KAT2	60	0
KAT2	29	-0,0272			

Çizelge 4.1 Devamı (Kat 3)

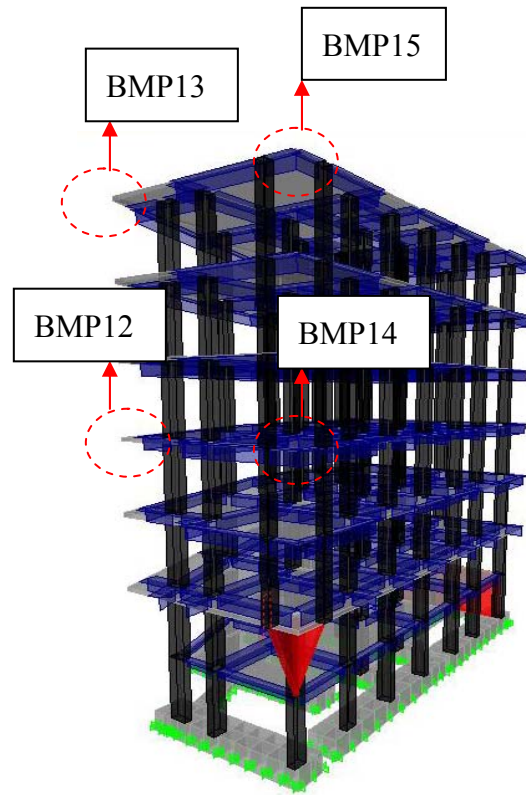
Kat no	Nokta	UZ (m)	Kat no	Nokta	UZ (m)
KAT3	1	-0,0199	KAT3	30	-0,0225
KAT3	2	-0,023	KAT3	31	-0,0224
KAT3	3	-0,0247	KAT3	32	-0,0197
KAT3	4	-0,0259	KAT3	33	-0,0227
KAT3	5	-0,0256	KAT3	34	-0,0242
KAT3	6	-0,0249	KAT3	35	-0,0254
KAT3	8	-0,029	KAT3	36	-0,0251
KAT3	9	-0,029	KAT3	37	-0,0242
KAT3	10	-0,025	KAT3	38	-0,0221
KAT3	11	-0,0286	KAT3	39	-0,0248
KAT3	12	-0,0252	KAT3	40	-0,0244
KAT3	13	-0,0207	KAT3	41	-0,0251
KAT3	14	-0,0269	KAT3	42	-0,0252
KAT3	15	-0,0278	KAT3	44	-0,0241
KAT3	16	-0,025	KAT3	45	-0,021
KAT3	17	-0,0241	KAT3	46	-0,0241
KAT3	18	-0,0249	KAT3	47	-0,0268
KAT3	19	-0,0242	KAT3	48	-0,0284
KAT3	20	-0,0207	KAT3	49	-0,0279
KAT3	22	0	KAT3	55	-0,0276
KAT3	24	-0,0245	KAT3	56	-0,0283
KAT3	25	-0,029	KAT3	57	-0,0277
KAT3	26	-0,0253	KAT3	58	-0,026
KAT3	27	-0,0262	KAT3	59	-0,025
KAT3	28	-0,0279	KAT3	60	0
KAT3	29	-0,0273			

Çizelge 4.1 Devamı (Kat 4)

Kat no	Nokta	UZ (m)	Kat no	Nokta	UZ (m)
KAT4	1	-0,0199	KAT4	30	-0,0226
KAT4	2	-0,0232	KAT4	31	-0,0224
KAT4	3	-0,0248	KAT4	32	-0,0198
KAT4	4	-0,026	KAT4	33	-0,0229
KAT4	5	-0,0257	KAT4	34	-0,0244
KAT4	6	-0,025	KAT4	35	-0,0257
KAT4	8	-0,0289	KAT4	36	-0,0254
KAT4	9	-0,029	KAT4	37	-0,0244
KAT4	10	-0,0251	KAT4	38	-0,0222
KAT4	11	-0,0285	KAT4	39	-0,025
KAT4	12	-0,0253	KAT4	40	-0,0246
KAT4	13	-0,0208	KAT4	41	-0,0253
KAT4	14	-0,027	KAT4	42	-0,0253
KAT4	15	-0,0278	KAT4	44	-0,0244
KAT4	16	-0,0251	KAT4	45	-0,0211
KAT4	17	-0,0244	KAT4	46	-0,0242
KAT4	18	-0,0251	KAT4	47	-0,0269
KAT4	19	-0,0244	KAT4	48	-0,0284
KAT4	20	-0,0208	KAT4	49	-0,0278
KAT4	22	0	KAT4	55	-0,0276
KAT4	24	-0,0247	KAT4	56	-0,0283
KAT4	25	-0,0289	KAT4	57	-0,0277
KAT4	26	-0,0255	KAT4	58	-0,026
KAT4	27	-0,0263	KAT4	59	-0,0251
KAT4	28	-0,0279	KAT4	60	0
KAT4	29	-0,0274	KAT4	76	-0,0252

Çizelge 4.1 Devamı (Kat 5)

Kat no	Nokta	UZ (m)	Kat no	Nokta	UZ (m)
KAT5	1	-0,02	KAT5	30	-0,0226
KAT5	2	-0,0232	KAT5	31	-0,0225
KAT5	3	-0,0249	KAT5	32	-0,0198
KAT5	4	-0,0261	KAT5	33	-0,0229
KAT5	5	-0,0258	KAT5	34	-0,0242
KAT5	6	-0,0251	KAT5	35	-0,0254
KAT5	8	-0,0288	KAT5	36	-0,0251
KAT5	9	-0,0289	KAT5	37	-0,0242
KAT5	10	-0,0252	KAT5	38	-0,0221
KAT5	11	-0,0285	KAT5	39	-0,0248
KAT5	12	-0,0254	KAT5	40	-0,0245
KAT5	13	-0,0208	KAT5	41	-0,0251
KAT5	14	-0,027	KAT5	42	-0,0253
KAT5	15	-0,0278	KAT5	44	-0,0243
KAT5	16	-0,0251	KAT5	45	-0,0211
KAT5	17	-0,0245	KAT5	46	-0,0243
KAT5	18	-0,0251	KAT5	47	-0,027
KAT5	19	-0,0244	KAT5	48	-0,0285
KAT5	20	-0,0209	KAT5	49	-0,0277
KAT5	22	0	KAT5	55	-0,0277
KAT5	24	-0,0248	KAT5	56	-0,0284
KAT5	25	-0,0289	KAT5	57	-0,0279
KAT5	26	-0,0256	KAT5	58	-0,0261
KAT5	27	-0,0264	KAT5	59	-0,0252
KAT5	28	-0,0279	KAT5	60	0
KAT5	29	-0,0275	KAT5	76	-0,0253



Şekil 4.1. Bina yüzeyine yerleştirilen prizmaların lokasyonları

Bina yüzeyine yerleştirilen prizmalar; BMP12-BMP14 ve BMP13-BMP15 yardımıyla alınan yüzey okumaları Bölüm 3.2.1, Tablo 3.2’de verilmiştir. Bu yer değiştirmeler ile gerçekleştirilen analizler sonucu elde edilen yer değiştirmeler karşılaştırmalı olarak Çizelge 4.2’de görülmektedir.

Çizelge 4.2. Yüzey okumaları ile analiz sonuçlarının karşılaştırılması

Yer	BMP12	Analiz	BMP13	Analiz	BMP14	Analiz	BMP15	Analiz
değiştirm	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)	(mm)
UZ	28	28,7	29	29,3	33	28,5	33	28,9

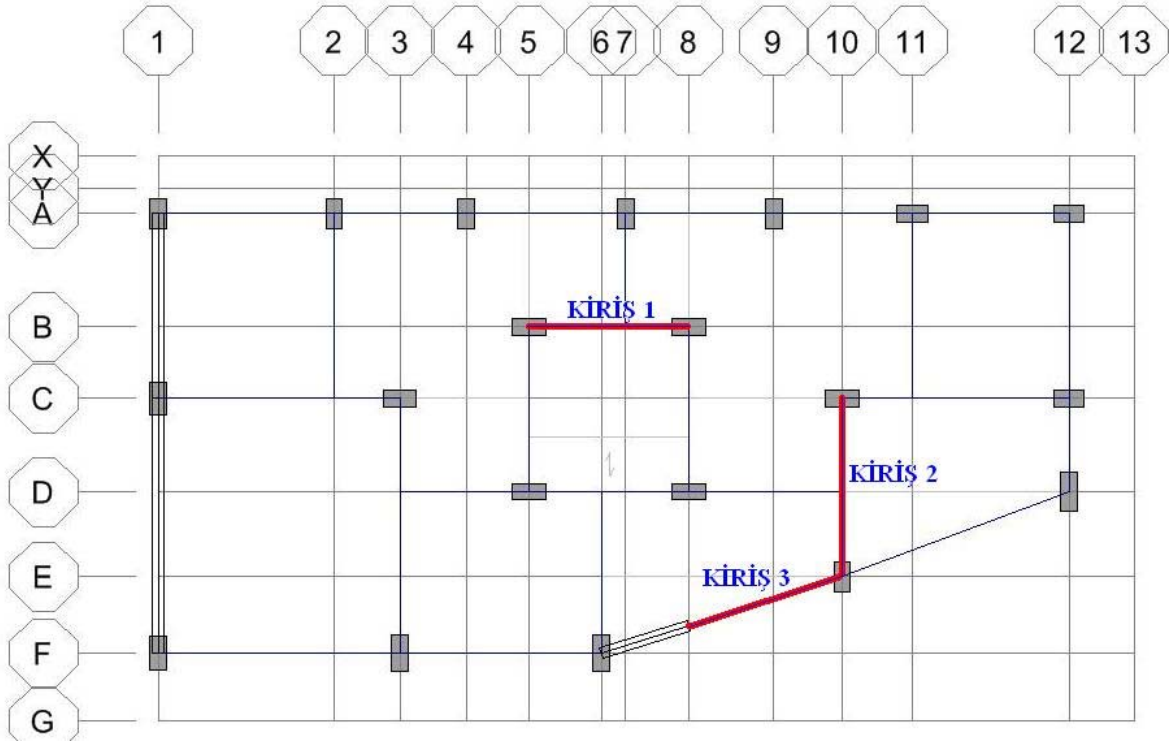
Tablo 4.2’den de anlaşılacağı gibi, zemin-yapı etkileşimini bir şekilde ifade eden nümerik modelin doğru oluşturulmuş olduğunu göstermektedir. Bu bağlamda, zemin ve yapı modellerinin ayrı ayrı oluşturularak, yapı ağırlığı etkisinde zemin modelinin çözümü ile elde edilen, tünel kazısı sonucu meydana gelen oturmaların yapıya yer değiştirme yükü olarak etki ettirilmesi ve yapı modelinin bu yükler altında çözümlenerek tünel kazısı nedeniyle yapıda meydana gelebilecek ilave zorlanmaların hesabı mümkündür.

4.2 Yapısal Analizde Hasar Görmesi Beklenen Taşıyıcı Elemanlar

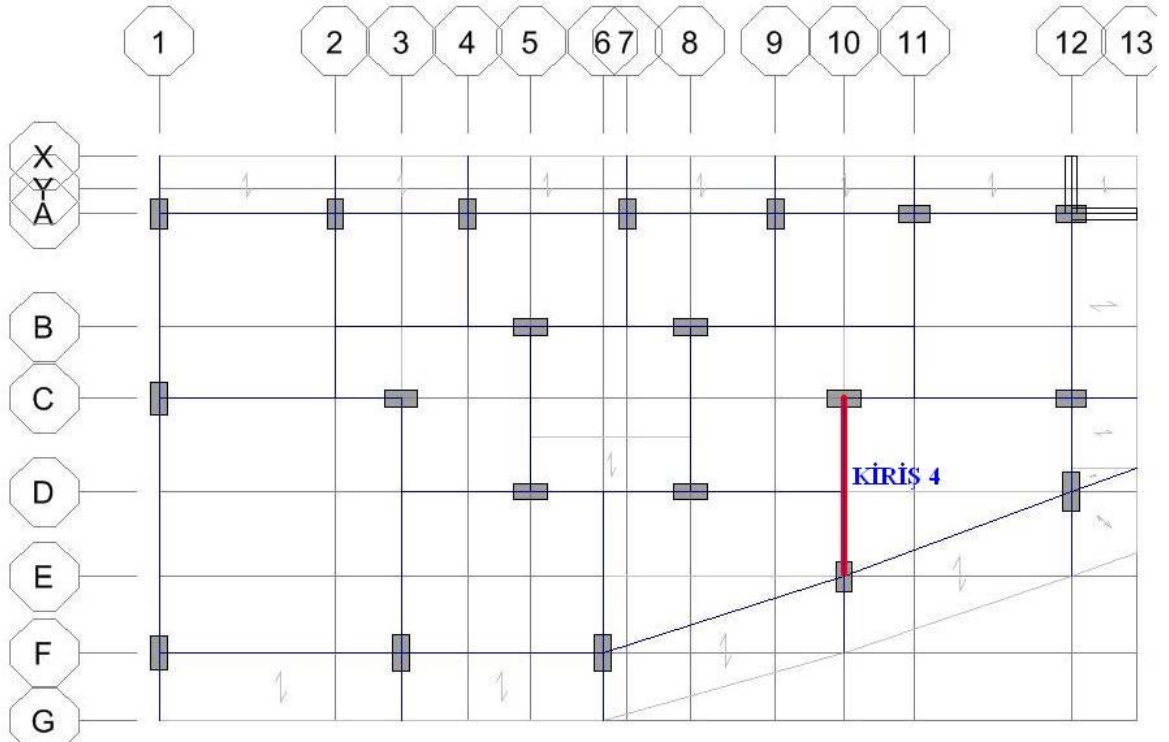
Yapıda, tünel açılmadan önce, sadece kendi ağırlığı dikkate alındığında beklendiği üzere hiçbir eleman taşıma kapasitesine ulaşmamaktadır. Ancak tünel açıldıktan sonra, ilave gerilmeler nedeniyle düşey ve yatay taşıyıcı elemanlar eğilme ve/veya kesme nedeniyle taşıma gücüne ulaşmaktadır.

4.2.1 Yatay taşıyıcılar

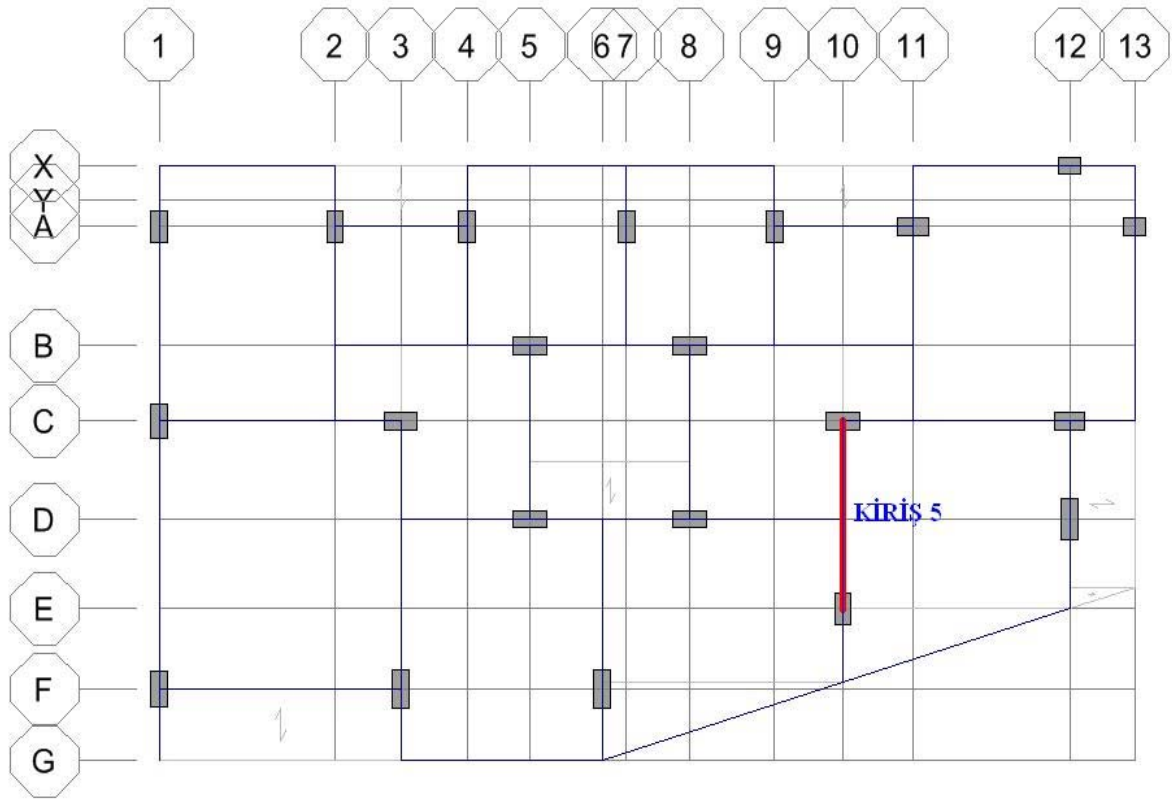
Bodrum Kat tavanındaki KİRİŞ 1 ve KİRİŞ 3 olarak adlandırılan elemanlarda kesme kuvvetine karşı kesit yetersizliği, Bodrum Kat tavanındaki KİRİŞ 2, Zemin Kat tavanındaki KİRİŞ 4 ve 1. Kat tavanındaki KİRİŞ 5 no’lu elemanlarda ise eğilmeden dolayı kesit yetersizliği görülmüştür (Şekil 4.2-4.4).



Şekil 4.2 Bodrum kat kirişleri



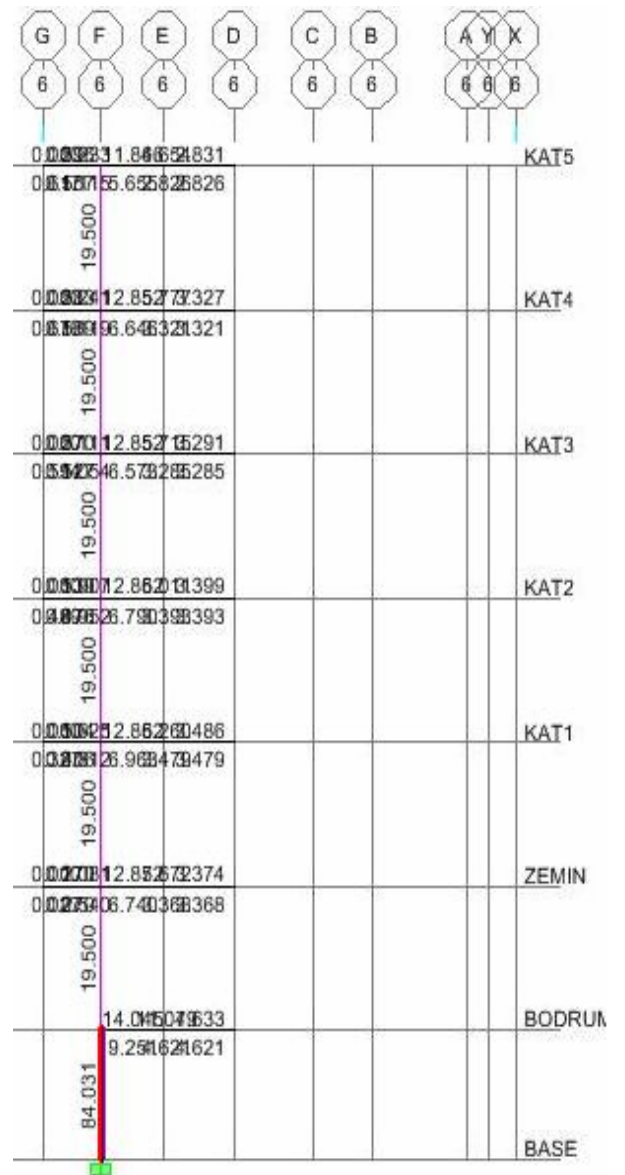
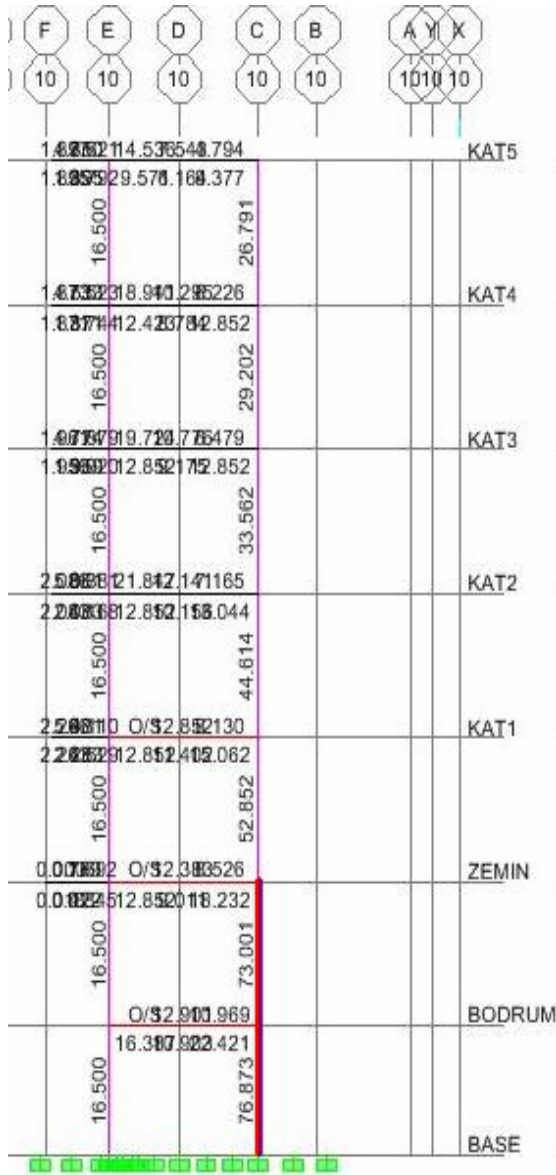
Şekil 4.3 Zemin kat kirişleri



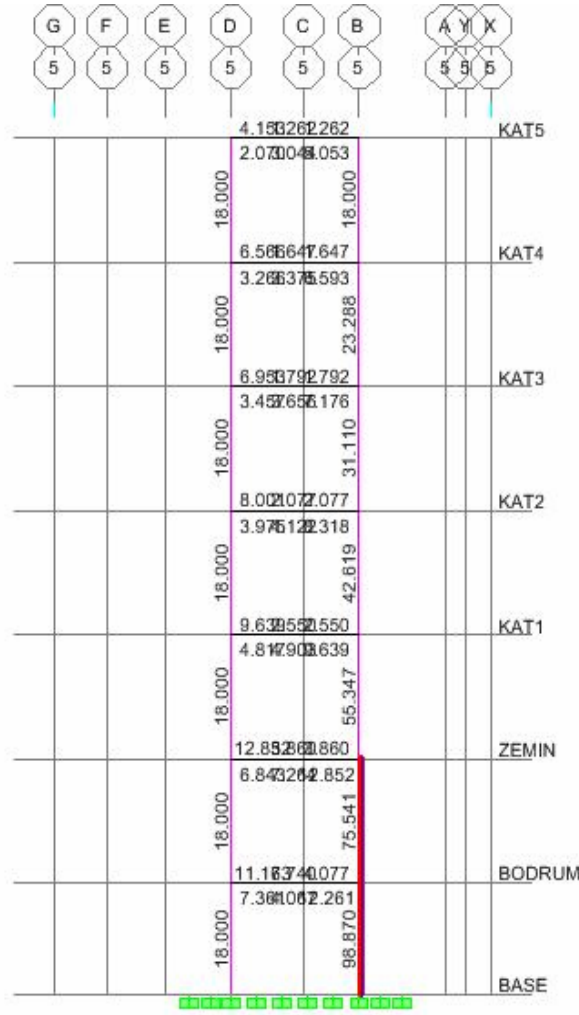
Şekil 4.4. 1.kat kirişleri

4.2.2 Düşey taşıyıcılar

B5 ve C10 akslarının belirlediği kolonda Bodrum Kat ve Zemin Katta, F6 aksına rastlayan kolonda sadece Bodrum Katta “kesit yetersizliği” ortaya çıkmaktadır. Bu elemanlar her ne kadar ETABS’ın kullandığı ACI 318-99 standartlarına göre kesit bakımından uygun gibi gözükse de, TS500/2000 standartlarına göre bu elemanlarda maksimum donatı sınırı aşılmaktadır. C10 ve B5 aksındaki 60/30 (cm/cm), F6 aksındaki 30/65 (cm/cm) boyutlarındaki kolonlarda $\rho_{\max} > 0,04$ olduğundan kesit yetersizliği problemi ile karşılaşılmaktadır (Şekil 4.5).



Şekil 4.5. Düşey taşıyıcılar



Şekil 4.5 Devamı

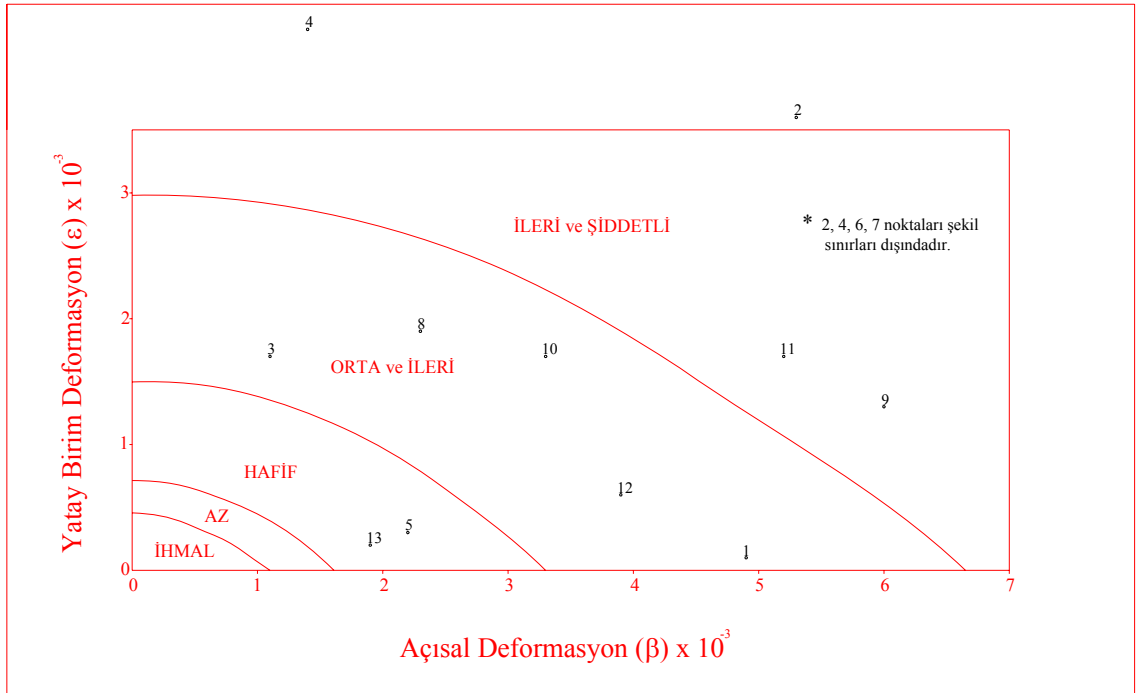
4.3 Yapının Tümü için Beklenen Hasar Durumu

Hasar tahmininde, Bölüm 1’de de anlatıldığı üzere genellikle deformasyon değerleri ve çatlak seviyeleri temel parametreleri olarak dikkate alınır. Oturmalara bağlı olarak yapılarda tünel açılması nedeni ile oluşan hasarların sayısal olarak belirlenmesi oldukça güçtür ve bu nedenle gözlemlenebilir veriler ve ölçülebilir çatlaklar dikkate alınır. Araştırmacılar tarafından önerilen ve günümüzde de kullanılmakta olan hasar tahmin yönteminde, iki nokta arası doğrunu parçasının dönme değeri olarak tanımlanabilecek “ β ” *açısız deformasyon* parametreleri ile çatlama durumunu ifade eden “ ε_{crit} ” *limit çekme deformasyonu* değerlerine bağlı grafikler kullanılmaktadır. Bu çalışmada temel seviyesinde düşey taşıyıcılara rastlayan düğüm noktaları dikkate alınarak ε - β değerleri hesaplanmış (Tablo 4.3) ve grafiğe işlenmek suretiyle örnek yapı için hasar dağılımları belirlenmiştir (Şekil 4.6). Şekil 4.6’ da yatay birim deformasyonlar ile açısız deformasyonların dağılımları incelendiğinde binada hasar

oluşumunda düşey deformasyonların yatay deformasyonlara oranla daha etkin olduğu, beklenen hasar seviyesinin daha çok “orta hasar” sınıfı olarak dikkate alınabileceği görülmektedir.

Çizelge 4.3. ε - β değerleri

Aks	Z	X (Uz,max)	Uz,max	X (Uz,min)	Uz,min	ΔX	ΔUz	β	ε
1	20,00	26,91	0,01997	28,15	0,01387	1,24	0,00610	0,0049	0,0001
2	23,20	27,03	0,02251	28,15	0,01663	1,12	0,00588	0,0053	0,0036
3	24,40	21,82	0,02435	28,15	0,01729	6,33	0,00706	0,0011	0,0017
4	25,60	22,11	0,02628	28,15	0,01772	6,04	0,00856	0,0014	0,0043
5	26,75	20,59	0,03481	28,15	0,01808	7,56	0,01673	0,0022	0,0003
6	28,06	27,03	0,02612	28,15	0,01835	1,12	0,00777	0,0069	0,0052
7	28,50	25,60	0,02884	28,15	0,01776	2,55	0,01108	0,0043	0,0045
8	29,65	20,59	0,03202	28,15	0,01490	7,56	0,01712	0,0023	0,0019
9	31,20	25,60	0,02823	28,15	0,01292	2,55	0,01531	0,0060	0,0013
10	32,44	21,82	0,03264	28,15	0,01155	6,33	0,02109	0,0033	0,0017
11	33,72	24,89	0,02705	28,15	0,01019	3,26	0,01686	0,0052	0,0017
12	36,57	23,97	0,02418	28,15	0,00794	4,18	0,01624	0,0039	0,0006
13	37,75	23,01	0,01673	28,15	0,00679	5,14	0,00994	0,0019	0,0002



Şekil 4.6 Örnek yapı için hasar dağılımları

5. SONUÇLAR

Bu çalışmada, İstanbul ili, Esenler ilçesinde gerçekleştirilen tünel kazı çalışmaları sırasında örnek olarak belirlenmiş kusurlu bir yapıda oturma analizleri ile elde edilen deformasyonlar, aletsel yüzey okumaları ile karşılaştırılmıştır. Nümerik model hazırlanırken öncelikle zemin modeli oluşturulmuş ve yapı yükleri dikkate alınarak zeminde meydana gelen oturma yüzeyi Plaxis 3D Tunnel programı ile belirlenmiştir. Daha sonra oturma analizlerinden hareketle yapı temelinde, temel plağı sonlu eleman ağına rastlayan noktalardaki oturmalar üst yapıya yer değiştirme yükü şeklinde etki ettirilmiştir. Zemin-üstyapı ilişkisini temsil eden model bu şekilde oluşturulduktan sonra üst yapı analizlerinde ETABS programı ile yapıdaki yer değiştirmeler hesaplanmış ve aletsel okumalarla karşılaştırılmıştır. Üst yapıda oluşan yer değiştirme nedeniyle yapıdaki hasar durumu belirlenmiş ve yapının hasar tespiti yapılmıştır.

1. Zemin ve yapı modellerinin ayrı ayrı oluşturularak, yapı ağırlığı etkisinde zemin modelinin çözümü ile elde edilen, tünel kazısı sonucu meydana gelen oturmaların yapıya yer değiştirme yükü olarak etki ettirilmesi ve yapı modelinin bu yükler altında çözümlenerek tünel kazısı nedeniyle yapıda meydana gelebilecek ilave zorlanmaların hesabı mümkündür (Çizelge 4.2).
2. İlave zorlanmalar dikkate alınarak gerçekleştirilen yapısal analizler sonucu, B5 ve C10 akslarının belirlediği kolonda Bodrum Kat ve Zemin Katta, F6 aksına rastlayan kolonda sadece Bodrum Katta “kesit yetersizliği” ortaya çıkmaktadır. Bu elemanlar her ne kadar ETABS programındaki ACI 318-99 standartlarına göre kesit bakımından uygun gibi gözükse de, TS500/2000 standartlarına göre bu elemanlarda maksimum donatı sınırı aşılmaktadır.
3. Yapının geneli için tahmini hasar seviyesini belirleyebilmek amacıyla, temel seviyesinde düşey taşıyıcılara rastlayan düğüm noktaları dikkate alınarak ϵ - β değerleri hesaplanmış (Tablo 4.3) ve grafiğe işlenmek suretiyle örnek yapı için hasar dağılımları belirlenmiştir (Şekil 4.6). Şekil 4.6’ da yatay birim deformasyonlar ile açısal deformasyonların dağılımları incelendiğinde binada hasar oluşumunda düşey deformasyonların yatay deformasyonlara oranla daha etkin olduğu, beklenen hasar seviyesinin daha çok “orta hasar” sınıfı olarak dikkate alınabileceği görülmektedir.

KAYNAKLAR

- Adenbrooke, D. And Potts, T., (1996), "Twin Tunnel Construction – Ground Movements and Lining Behaviour", in R. Mair and R. Taylor, *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Vol., Balkema, Rotterdam, 441-446.
- Akagi, H., Komiya, K., (1996), "Finite Element Simulation of Shield Tunneling Process in Soft Ground", in R. Mair and R. Taylor, *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Vol., Balkema, Rotterdam, 447-452.
- Astley, R., (1992), "Finite Elements in Solids and Structures", An Introduction, Chapman & Hall, London.
- Attawell, P., (1978), "Ground Movements Caused by Tunneling in Soil", in J. Geddes, *Large Ground Movements and Structures*, Pentech Press, London, 812-948.
- Attawell, P., Woodman, J. (1982), "Predicting the Dynamics of Ground Settlement and Its Derivates Caused by Tunneling in Soil", *Ground Engineering*, 13-22.
- Attawell, P., Yates, J. ve Shelby, A. (1986), "Soil Movements Induced by Tunneling and Their Effects on Pipelines and Structures", Blacky & Son Ltd., Glasgow.
- Augrade, C. E., (1997), "Numerical Modelling of Tunelling Processes for Assessment of Damage to Buildings", Ph.D thesis, Oxford University.
- Bakker, K., Van Scheldt, W., ve Plekkenpol, J., (1996), "Predictions and a Monitoring Scheme With Respect to the Boring of the Second Heinenoord Tunnel", in R. Mair and R. Taylor, *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*, Balkema, Rotterdam, Vol. 459-464.
- Boscardin, M., Cording, E., (1989), "Building Response to Excavation Induced Settlement", *ASCE Journal of Geotech. Eng.* 115: 1-21.
- Burland, J. ve Wroth, C., (1975), "Settlement of Buildings and Associated Damage", *Building Research Establishment current paper CP*, 33-75.
- Burland, J., Broms, B. ve De Mello, V., (1977), "Behaviour of Foundations and Structures", *State-of-the-art volume*, Proc. 9th ISSMFE, 495-546.
- Chow, L., (1994), "The Prediction of Surface Settlements due to Tunneling in Soft Ground", MSc Thesis, University of Oxford.
- Cook, R., (1981), "Consepts and Applications of Finite Element Analysis", John Wiley & Sons, Chichester.
- Davis, E., Gunn, M., Mair, R., and Seneviratne, H., (1980), "The Stability of Underground Openings in Cohesive Material", *Geotechnique*.
- Doran, B. ve Alacalı, S. N., (2004), *Yapısal Analiz Programı Sap2000 Bilgi Aktarımı ve Kullanımı*, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- Dulacska, E., (1992), "Soil Settlement Effects on Buildings", Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

- Einstein, H., Schwartz, C., (1979), "Simplified Methods for Tunnel Design", ASCE Journal of Geotech. Eng. 105(GT4): 499-518.
- El-Nahhas, F., El-Kadi, F. ve Ahmed, A., (1992), "Interaction of Tunnel Linings and Soft Ground, Tunneling and Underground Space Technology 7(3): 27-31.
- Flügge, W., (1966), "Stresses in Shells", Springer-Verlag Inc., New York.
- Geddes, J., (1992), "Discussion of the Session VII", in J. Geddes, Proc. 4th Int. Conf. Ground Movements and Structures, Pentech Press, London, 825-826.
- Ghaboussi, J., Hansmire, W., Parker, H. And Kim, K., (1983), "Finite Element Simulation of Tunneling over Subways", ASCE Journal of Geotech. Eng. 109(3): 318-334.
- Gioda, G., ve De Donato, O., (1979), "Elastic-Plastic Analysis of Geotechnical Problems by Mathematical Programming", Int. J. Numer. Anal. Meth. Geomech. 3: 381-401.
- Gunn, M. (1993), "The Prediction of Surface Settlement Profiles due to Tunneling", Predictive Soil Mechanics (Proc. Wroth Mem. Symp.), Tomas Telford, London, 304-317.
- Hellings, J., (1994), "Limiting the Damage to Historic Buildings due to Tunneling: Experience at the Mansion House, London, Proc. Tunneling 94, Elsevier, 253-277.
- Hirst, C., (1994), "A Study, Using Finite Elements into Building Damage and Ground Movements due to Tunneling", Fourth year undergraduate Project, Oxford University.
- Institution of Structural Engineers, (1989), "Tunnels and Underground Openings", Soil Structure Interaction, ISE, London.
- Ito, T. ve Hisatake, M., (1982), "Observed and Computed Settlements in a Case of Soft Ground Tunneling", in Z. Eisenstein, Proc. 4th Int. Symp. Num. Meth. Geomech., Edmonton, Balkema, Rotterdam, 551-559.
- Kerisel, J., (1975), "Old Structures in Relation to Soil Conditions", Geotechnique 25(3): 433-483.
- Lee, K., ve Rowe, R., (1989), "Deformations Caused by Surface Loading and Tunneling: The Role of Elastic Anisotropy", Geotechnique 39(1): 125-140
- Lee, K., Rowe, R. ve Lo, K., (1992), "Subsidence Owing to Tunneling, 1. Estimating The Gap Parameter", Canadian Geotechnical Journal 29: 929-940.
- Mair, R., Taylor, R., (1993), "Prediction of Clay Behaviour Around Tunnels Using Plasticity Solutions", Predictive Soil Mechanics (Proc. Wroth Mem. Symp.), Tomas Telford, London, 449-463.
- Mair, R., Taylor, R., Burland, J. (1996), "Prediction of Ground Movements and Assessment of Risk of Building Damage due to Bored Tunneling", in R. Mair and R. Taylor, Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground, Balkema, Rotterdam, 713-718.
- Mair, R. (1993), "Developments in Geotechnical Engineering Research: Applications to Tunnels and Deep Excavations", Proc. I.C.E 97 (1), 27-41.

Mensah-Dwumah, F., (1982), "Finite Element Modelling of Brick Masonry Building Behaviour in Response to Deformations Induced by Soft-Ground Tunneling", Ph.D thesis, Stanford University.

New, B. ve O'Reilly, M. (1992), "Tunneling Induced Ground Movements: Predicting Their Magnitude and Effects", in J. Geddes, Proc. 4th Int. Conf. Ground Movements and Structures, Pentech Press, London, 671-697.

Oteo, C. ve Sagaseta, C., (1982), "Prediction of Settlements due to Underground Openings", Proc. Int. Symp. Num. Mod. Geomech. Zurich, Balkema, 653-659.

Peck, R. (1969), "Deep Excavations and Tunneling in Soft Ground", State-of-the-art Volume, 7th ICSMFE, 226-290.

Pender, M., (1980), "Elastic Solutions for Circular Tunnel", Geotechnique 30:216-222

Polshin, D. ve Tolkar, R., (1957), "Maximum Allowable Non-Uniform Settlement of Structures", Proc. 4th ICSMFE, Vol. 1, 402-405.

Poulos, H., Davis, E., (1980), "Elastic Solutions for Rock Mechanics", John Wiley & Sons, New York.

Rankin, W. (1988), "Ground Movements Resulting from Urban Tunneling: Prediction and Effects", Proc. 23rd conf. Of the Eng. Group of the Geological Society, London: Geological Society, 79-92.

Romo, M. ve Resendez, D., (1982), "Observed and Computed Settlements in a Case of Soft Ground Tunneling", in Z. Eisenstein, Proc. 4th Int. Conf. Num. Meth. Geomech. Edmonton, Balkema, Rotterdam, 597-609.

Sagaseta, C., (1987), "Analysis of Undrained Soil Deformation due to Ground Loss", Geotechnique 37(3): 301-320.

Skempton, A. ve McDonald, D., (1956), "Allowable Settlement of Buildings", Proc. I.C.E. 5, 727-784.

Sloan, S. ve Assadi, A., (1992), "Stability of Tunnels in Soft Ground", Predictive Soil Mechanics (Proc. Wroth Mem. Symp.), Tomas Telford, 644-663.

Swoboda, G., Mertz, W. ve Schmidt, A., (1989), "Three Dimensional Numerical Models to Simulate Tunnel Excavation", Proc. 3rd Int. Symp. Num. Meth. Geomech. (NUMOG III), Elsevier Applied Science, 536-548.

Timoschenko, S., (1957), "Strenght of Materials-Part 1", D. Van Nostrand Co. Inc., London.

Ward, W. ve Pender, M. (1981), "Tunneling in Soft Ground-General Report", Proc. 10th ICSMFE, 261-275.

Yıldırım, S., (2006), Otogar-Bağcılar Raylı Toplu Taşıma Sistemi Km 0+850 ile Km 0+950 Arası Tünel Yapımında Ölçülen Zemin Hareketlerinin Değerlendirilmesi Hakkında Rapor, YTÜ.

Yıldırım, S., (2004), Zemin İncelenmesi ve Temel Tasarımı, Birsan Yayınevi, İstanbul.

**ÖZGEÇMİŞ**

Doğum tarihi 19.05.1983

Doğum yeri İzmir

Lise 1998-2001 Antalya Anadolu Lisesi

Lisans 2001-2005 Yıldız Teknik Üniversitesi Mühendislik Fakültesi
İnşaat Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2005-2007 Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
İnşaat Mühendisliği Anabilim Dalı Yapı Programı