YAYA ACİL KAÇIŞ YAPISI VE TBM DELME TÜNEL ETKİLEŞİMİ VE DEPREM HESABI

B.Alaylı[1], K.Elmalı[2] ve H.P.Tilgen[3]

[1] *İnşaat Yük. Müh., Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., Ankara*
[2] *İnşaat Yük. Müh., Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., Ankara*
[3] *İnşaat Yük. Müh., Yüksel Proje Uluslararası A.Ş., Ankara*
Email: kelmali@yukselproje.com.tr.

ÖZET:

Bu çalışmada, "İstanbul Otogar-Bağcılar-Olimpiyat Köyü-Başak Konutları 4 Raylı Toplu Taşıma Sistemi İnşaatı, Elektromekanik İşler Yapımı ve Araç Temini" işi kapsamında diyafram duvar tekniği kullanılarak tasarlanan acil kaçış yapısının, yakınındaki TBM tünellerle etkileşimi ve deprem durumu incelenmiştir. İki ayrı tüp olarak yapımı tamamlanmış olan TBM tünellerinin arasında yapımı planlanan yaya acil kaçış yapısının, tünellerin imalatlarının tamamlanmış olduğu ve bu tünellerin yaklaşık 3 metre yakınında kazı yapılacağı gözönünde bulundurulduğunda en önemli problem bu tünellerin kazıdan inşaat aşamasında etkilenmesi olarak belirlenmiştir. Kazı esnasında delme tünellerin deformasyonlardan etkilenmemesi için tedbirler alınmış ve kalıcı yük durumu için de depremli durum analizi yapılmıştır. Kazının yukarıdan aşağı (top-down) imalat yöntemi ile gerçekleştirilmesi öngörülmüş, ayrıca geçici yatay destekler de kullanılmıştır. Böylece diyafram duvarlarda yatay deformasyonlar minimize edilmiş, ancak yapının rijitliğinin artmasından dolayı yüksek deprem yüklerine maruz kalması kaçınılmaz olmuştur. Yapının ebatlarının küçük olması ve diyafram duvarların kesme perdesi olarak da kullanılması ile deprem yükleri kesme duvarlarına aktarılmış, sonuç olarak hem statik durum hem de depremli durum için yapının güvenli olması sağlanmıştır.

ANAHTAR KELİMELER : Deprem, Racking Analizi, TBM tünel etkileşimi, Diyafram duvar,

1. GİRİŞ

1.1. Sistem

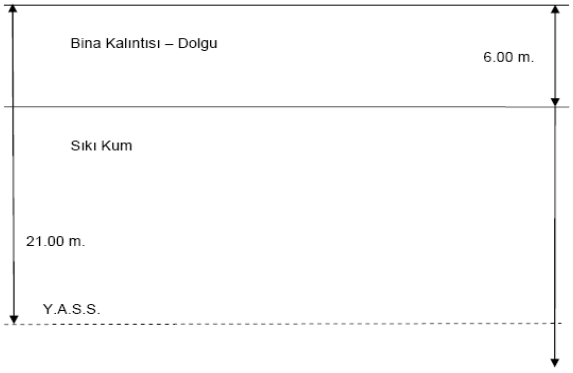
Acil kaçış yapısında kazı derinliği maksimum 21.90 m civarında olup, analizlerde açıklıklar ve tünel ile etkileşimi açısından en kritik durum olması sebebiyle ortada bulunan diyafram duvar panelinin analizleri gerçekleştirilmiştir. Acil kaçış yapısının kazısında, kazı top-down metodu ile gerçekleştirilecek olup, kazının imal edilecek olan sahanlık döşemeleri ve merdiven yapıları ile diyafram duvarın desteklenmesi düşünülmüştür. Diyaframları desteklemek amacı ile sahanlıklar arasında kullanılması planlanan kirişlere ek olarak ayrıca sonradan kırılmak üzere geçici kirişlerin de kullanılması öngörülmüştür. Ayrıca acil kaçış yapısının yanlarında bulunan mevcut TBM tünelleri modellenerek tünel – yapı etkileşimi incelenmiştir.

Yapıda merdivenler; sahanlıklar ve kirişler imal edildikten sonra kirişlerle arasında herhangi bir donatı geçisi bulunmayacak şekilde soğuk derzli olarak imal edilecektir. Ayrıca kirişler ve sahanlıklar diyafram duvarların imalatından sonra filiz ekilmek suretiyle diyafram duvara bağlanacaktır. Sap modelinde mesnetlenme koşulları bu şartları sağlayacak biçimde seçilmiş ve merdiven kısmında kirişlerle merdiven kısmı arasında boşluk bırakılarak yük aktarımı engellenmiştir.

Yanal Toprak ve Sursarj yüklemelerinde sukunetteki toprak basınçları dikkate alınmıştır. Aktif zemin basınçları daha küçük yük değerlerine sahip olduklarından emniyetli yönde kalınmıştır. Formüle göre hesap edilen yanal toprak itkisinin daha düşük değerde olduğu görülmüş, güvenli yönde kalmak ve hesap kolaylığı sağlamak amacıyla effektif kohezyon değerleri kullanılmamıştır.

1.2. Jeoteknik Parametreler

Bölgede idealize zemin profilinin belirlenmesinde sondaj verilerinden yararlanılmış olup,güvenli tarafta kalınarak elde edilen idealize zemin profili Şekil – 1' de özetlenmiştir. Yeraltı su seviyesi yüzeyden 21.0 m aşağıdadır.



Şekil 1. İdealize Zemin Profili

Bölge için belirlenen idealize zemin profilinde kullanılacak jeoteknik parametreler ilgili sondaj ve laboratuvar çalışmaları incelenerek belirlenmiş olup, aşağıda özetlenmiştir.

39.50-33.50 kotları arasında zemin değerleri;
Bina Kalıntısı - Dolgu
Birim hacim ağırlık: γ=1.8 t/m3

Efektif mukavemet parametreleri :
c=5 kPa ϕ= 230 E = 10000 kPa

$K_o=1-\sin\phi=1-\sin 23=0.609$ (1)

33.50 – 13.21 kotları arasında zemin değerleri;
Sıkı Kum
SPT N = 30 (ortalama) ; γ = 20 kN/m3
Efektif mukavemet parametreleri
SPT N = 30 (ortalama) ; $\varphi' = 32^o$
Ayrıca birimin ince taneli malzeme oranının yüksek olması sebebiyle kohezyonu
c' = 10 kPa olarak seçilmiştir. ϕ= 320

$K_o=1-\sin\phi=1-\sin 32=0.470$ (2)

$E = 1200 \times (N + 6)$ - (Çakıllı Kum ve Çakıl) (3)

$E = 1200 \times 36 = 43200$ kPa

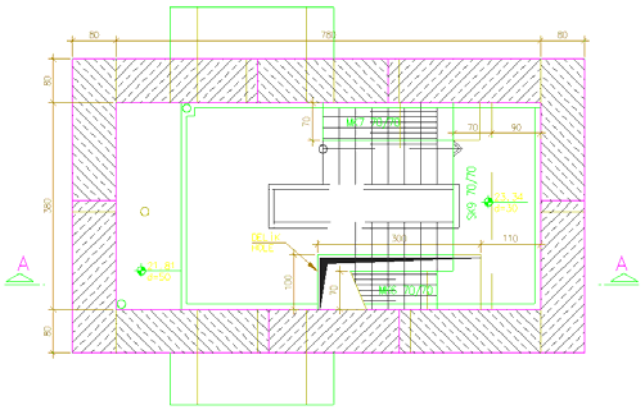
Güvenli tarafta kalınarak bu birim için deformasyon modülü E = 35000 kPa olarak seçilmiştir

Zemin yatak katsayısı yatay ve düşeyde 6000 t/m3 tür.

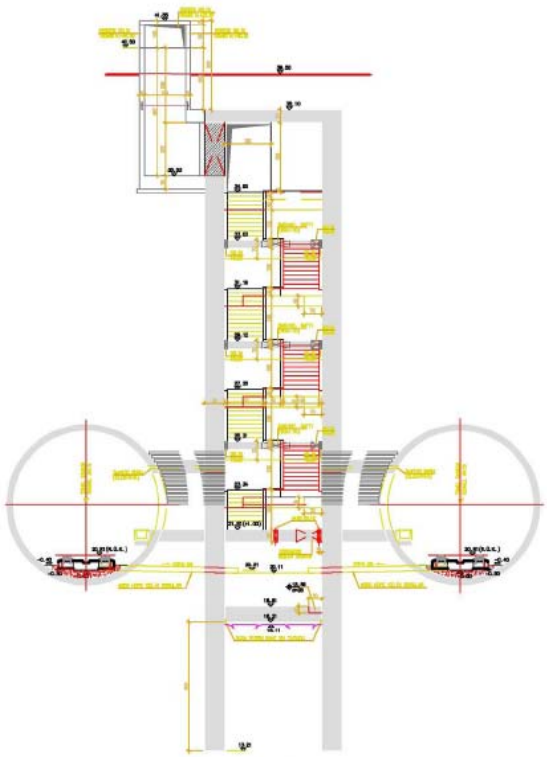
Yanal Toprak ve Sursarj yüklemelerinde sukunetteki toprak basınçları dikkate alınmıştır. Aktif zemin basınçları daha küçük yük değerlerine sahip olduklarından emniyetli yönde kalınmıştır.

1.3. Plan ve Kesitler

Alt başlık Yapıya ait plan ve kesit aşağıda verilmiştir.



Şekil 2. Plan



Şekil 3. Kesit A-A

1.4. İnşaat Yöntemi

Acil kaçış yapısının kazısında, kazı top-down metodu ile gerçekleştirilecek olup, kazının imal edilecek olan sahanlık döşemeleri ve merdiven yapıları ile diyafram duvarın desteklenmesi düşünülmüştür. Diyaframları desteklemek amacı ile sahanlıklar arasında kullanılması planlanan kirişlere ek olarak ayrıca sonradan kırılmak üzere geçici kirişlerin de kullanılması öngörülmüştür. Ayrıca acil kaçış yapısının yanlarında bulunan mevcut TBM tünelleri modellenerek tünel – yapı etkileşimi incelenmiştir.

1.5. TBM ile Etkileşim

Acil Kaçış Yapısına ait kazı iksa sistemi ile ilgili hesaplar ve TBM tünelleri – yapı etkileşimine ait analizler ve hesaplar gerçekleştirilmiştir. Analizler ve kesit tahkiki detayları sonucunda mevcut tünel kesit boyutlarının ve donatı miktarının yeterli olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

1.6. Diyafram Duvar

Diyafram duvar tekniği kullanılarak tasarlanan acil kaçış yapısının, yakınındaki TBM tünellerle etkileşimi ve deprem durumu incelenmiştir. İki ayrı tüp olarak yapımı tamamlanmış olan TBM tünellerinin arasında yapımı planlanan yaya acil kaçış yapısının, tünellerin imalatlarının tamamlanmış olduğu ve bu tünellerin yaklaşık 3 metre yakınında kazı yapılacağı gözönünde bulundurulduğunda en önemli problem bu tünellerin kazıdan inşaat aşamasında etkilenmesi olarak belirlenmiştir. Kazı esnasında delme tünellerin deformasyonlardan etkilenmemesi için tedbirler alınmış ve kalıcı yük durumu için de depremli durum analizi yapılmıştır. Kazının yukarıdan aşağı (top-down) imalat yöntemi ile gerçekleştirimesi öngörülmüş, ayrıca geçici yatay destekler de kullanılmıştır. Böylece diyafram duvarlarda yatay deformasyonlar minimize edilmiş, ancak yapının rijitliğinin artmasından dolayı yüksek deprem yüklerine maruz kalması kaçınılmaz olmuştur. Yapının ebatlarının küçük olması ve diyafram duvarların kesme perdesi olarak da kullanılması ile deprem yükleri kesme duvarlarına aktarılmış, sonuç olarak hem statik durum hem de depremli durum için yapının güvenli olması sağlanmıştır.

2. DEPREM HESABI YÖNTEMİ

2.1. Racking Analizi ve Deplasmanlar

Yer altı yapılarının deprem hesaplarında iki değişik deprem şiddeti gözönüne alınacaktır:
ODE "Kullanım Depremi", tesisin ömrü içerisinde en az bir kere olması beklenen bir depremdir. Bu deprem için karakteristik değerler aşağıda verilmiştir.

Tekerrür süresi	225 yıl
İvme Katsayısı	0.25g
Mercalli Şiddeti	7.25
Yer hızı (Vs)	10.9cm/s
Yüzeydeki zemin deformasyonu	10 cm

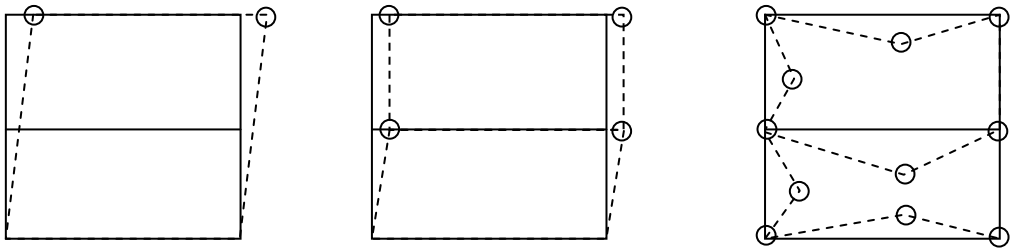
Sistem böyle bir deprem sırasında ve depremden sonra çok az veya hiç hasara uğramaksızın çalışmaya devam edebilmelidir. ODE depremi için bulunan enkesit kuvvetleri zati ağırlık, toprak basıncı gibi statik yüklerle kombine edilecektir. Analizlerde faktörsüz yükler kullanılacaktır.

MCE "Olabilecek en büyük Deprem", tesisin ömrü boyunca olma ihtimali küçük olan bir deprem olarak tanımlanmaktadır. Bu deprem için karakteristik değerler aşağıda verilmiştir.

Tekerrür süresi	1000 yıl
İvme Katsayısı	0.65g

Mercalli Şiddeti	8.50
Yer hızı (Vs)	25.9cm/s
Yüzeydeki zemin deformasyonu	20 cm

MCE deprem seviyesine göre tasarımın hedefi, hayat kaybını önlemektir. Bu depremde yapının mekanizmaya dönüşmeksizin plastik mafsallaşmasına izin verilmektedir. Kabul edilebilen ve edilemeyen plastik mafsallaşma halleri aşağıdaki şekilde gösterilmiştir.



İki plastik mafsallı Kabul edilebilir durum | Dört plastik mafsallı Kabul edilebilir durum | Bir elemanda üç mafsal Kabul edilemez durum

Şekil 4. Plastik Mafsallaşma Durumları

Plastik deformasyonun ortaya çıktığı bütün noktaların sünek olmasını sağlayacak detaylar titizlikle geliştirilmeli ve uygulanmalıdır. Yapının herhangi bir elemanında sünek olmayan bir davranışı önleyecek her türlü önlem alınmalıdır. Özetle yapının bir depreme başarı ile dayanması, hem tasarım hem de uygulama safhalarında, detaylara gereken dikkatin verilmesine bağlıdır. MCE depremi için bulunan enkesit kuvvetleri de zati ağırlık, toprak basıncı gibi statik yüklerle kombine edilecektir. Analizlerde faktörsüz yükler kullanılacaktır.

Raylı sistemin geçtiği güzergahta, ana kaya derinliği 75m, bu bölgede yer alan zemin için öngörülen efektif kayma dalgası hızları 300m/s ila 700m/s arasında değişmektedir. Güvenli yönde kalınarak efektif kayma dalgası hızı Cs=250m/sn olarak verilmiştir. Bu durumda periyod

$$T = 4 \times H / Cs = 4 \times 75 / 250 = 1.2sn \quad (4)$$

olarak hesaplanmaktadır.

Enine Deprem Analizi:

Deprem sırasında yumuşak zeminlerde ortaya çıkan deprem deformasyonları genellikle büyüktür. Diğer taraftan bu tip zeminlerde yer alan dikdörtgen kutu şeklindeki aç kapa yapılarının duvar ve döşemeleri, statik yükleri taşıyabilmek için genellikle kalın yapılmak zorundadır. Böyle bir yapının zemindeki deformasyonları aynen takip ettiği kabul edilirse hesaplarda gerçekçi olmayan mertebede enkesit kuvvetleri ortaya çıkmaktadır. Bu probleme uygun bir çözüm, zemin–yapı etkileşimini gözönüne alarak bulunabilir. Aşağıda çok sayıda dinamik sonlu eleman analizine dayanılarak geliştirilmiş bir tasarım prosedürü (Seismic Design of Tunnels Jaw-Nan (Joe) Wang, Ph.D., P.E. 1991) kısaca açıklanmaktadır. Özetle yapı deplasmanlarının bulunması amacı ile zemin deplasmanları “R” adı verilen ve büyük ölçüde zemin-yapı esneklik oranı “F” ye bağlı olan bir faktör ile çarpılmaktadır.

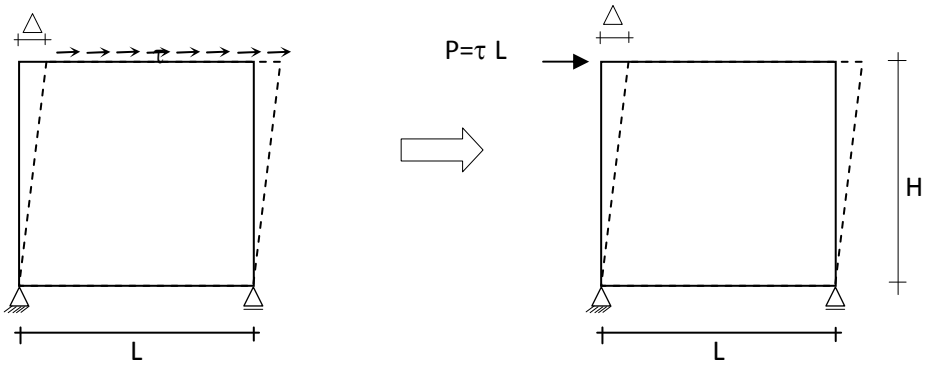
Zemindeki kayma deformasyonu aşağıdaki formül yardımı ile bulunabilir.

$$\Delta_{\text{free field}} = \gamma \cdot H \tag{5}$$

$$\gamma = V_s / C_s \tag{6}$$

burada; V_s = depremde yer hızı
C_s = efektif kayma dalgası ilerleme hızı

Esneklik (fleksibilite) oranı



Şekil 5. Yapıdaki Kayma Deformasyonu

Üst döşeme vasıtasıyla zeminden yapıya aktarılan kayma gerilmeleri ile oluşan yatay kuvvet altında yapıda ortaya çıkan kayma açısı;

$$\gamma_{st} = \frac{\Delta_{st}}{H} = \frac{P.\delta_{11}}{H} = \frac{\tau.L.\delta_{11}}{H} \tag{7}$$

Burada δ_{11} birim yatay kuvvet altında yapıdaki yatay deplasmanı göstermektedir. Zemindeki kayma açısı aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanabilir.

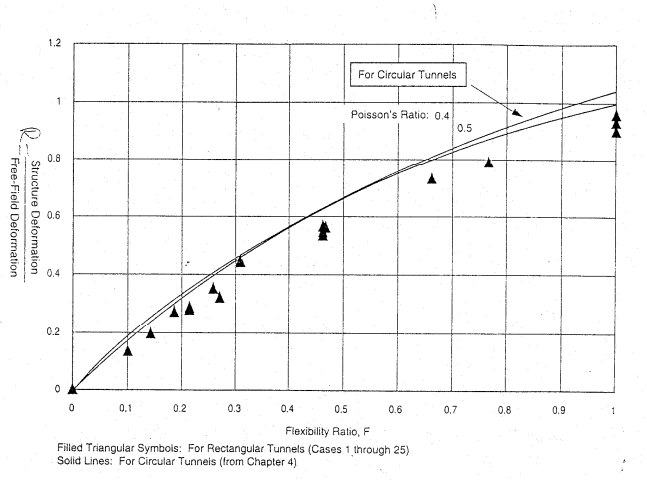
$$\gamma_{soil} = \tau / G \tag{8}$$

Bu durumda esneklik (fleksibilite) oranı aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanabilir.

$$F = \frac{\gamma_{st}}{\gamma_{soil}} = \frac{\tau \cdot L \cdot \delta_{11} / H}{\tau / G} = \frac{G \cdot L}{H} \tag{9}$$

Buna göre F=1.0 ise yapı, zeminde ortaya çıkan deformasyonlara uymakta, F<1.0 ise yapı zeminden daha az bir deplasman yapmaktadır.

"R" azaltma faktörü, aşağıdaki şekilden uygun esneklik "F" değeri girilerek okunabilir.

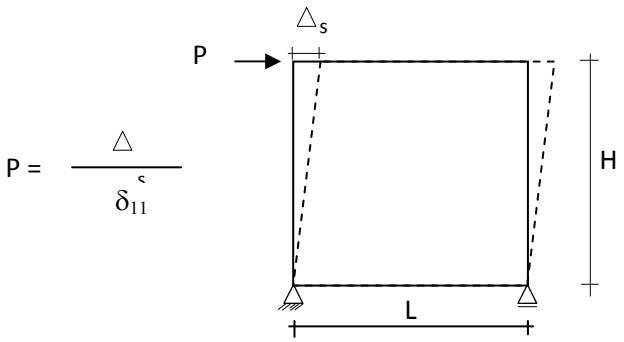


Şekil 6. Azaltma Faktörü – Esneklik Değeri Grafiği

Bu durumda yapı deformasyonu aşağıdaki şekilde hesaplanabilir.

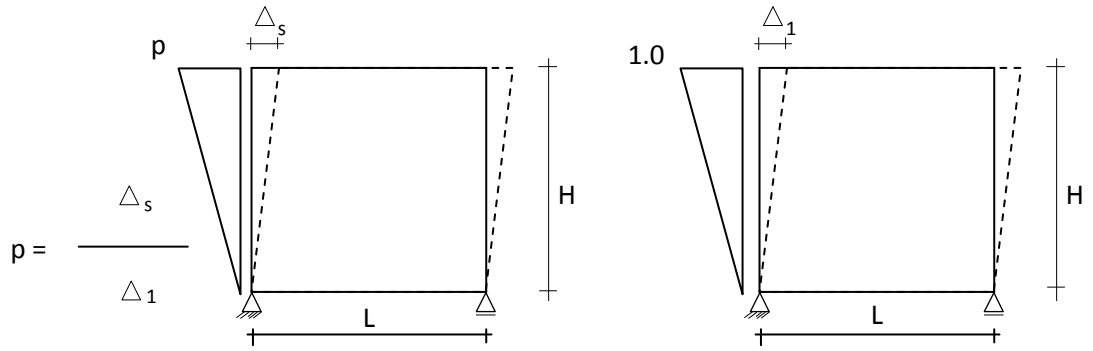
$$\Delta s = R \ \Delta \text{free field} \qquad (10)$$

Zeminle yapı arasındaki kuvvet dağılımı için iki ayrı kabul ile hesap yapılması önerilmektedir. Burada dikkat edilecek husus her iki kabulün de aynı yatay deplasman Δs' i vermesidir.



Şekil 7. Eşdeğer Tekil Yük Hesap Yöntemi

Zeminden yapıya aktarılan kuvvetlerin tavan hizasında tekil yük olarak alınması veya yapıya yatay deplasman verilmesi derin tünellerde ötelenmeyi meydana getiren ana etkinin tavan–duvar bağlantı noktalarında oluşan kayma kuvvetleri olması nedeni ile daha çok derin tünellerde uygulanan bir yöntemdir.



Şekil 8. Eşdeğer Ters Üçgen Yayılı Yük Hesap Yöntemi

Zeminle yapı arasında ters dönmüş bir üçgen şeklinde kuvvet dağılımı uygulanması sığ tünellerde toprak örtüsünün az olması ve dolayısı ile ötelenmeyi meydana getiren ana etkinin tavan-duvar bağlantı noktasında oluşan kayma kuvvetleri yerine zemin basınçlarından kaynaklanması nedeni ile daha çok sığ tünellerde uygulanan bir yöntemdir. Aç-kapa tipi yapılar için bu yöntem daha uygundur.

Ötelenme sonucunda elde edilen zorlanmalar ölü yükler, hareketli yükler ve sukunet zemin basıncı altında yapıda elde edilen zorlanmalar ile kombine edilerek deprem yüklemesi adı verilen yükleme elde edilmiş olacaktır. Analizlerde faktörsüz yükler kullanılacaktır.

Boyuna Deprem Analizi:

Tünel boyuna yönde zeminde ilerleyen deprem dalgaları sebebiyle eksenel ve eğilme deformasyonlarına maruz kalmaktadır.

Bu deformasyonların maksimum değeri aşağıdaki formül yardımı ile hesaplanabilir.

$$\varepsilon max = \frac{Vs}{Cs} \; Sin\theta \; Cos\theta + \frac{As \; R}{Cs^{2}} \; Cos^{3}\theta \quad (\theta=45° \text{ için}) \qquad (11)$$

Burada;
θ = Deprem dalgasının tünel eksenine göre geliş açısı
R = Tünel yarıçapı
As= etkin yer ivmesi (MCE)
Vs = depremde yer hızı (MCE)
Cs = efektif kayma dalgası ilerleme hızı

2.2. Deprem Modeli ve Deprem Yükleri

SAP 2000 modelindeki deprem hesabında yapıya döşeme seviyelerinde deplasman verilerek analiz yapılmıştır. Modele verilen deplasmana karşı gelen yük değerlerinin elde edilebilmesi için yapının deplasman yönünde tutulması gerekmektedir. Bu nedenle yapıya X-SAĞ, X-SOL, Y-SAĞ, Y-SOL olmak üzere 4 yönde deplasman verilerek model bu yükler altında analiz edilmiştir. Elde edilen deprem yükleri modelde ilgili depremli yük kombinasyonunda kullanılmıştır.

X-SAĞ yüklemesinde yapıya (-) X yönünde deplasman verilip, kat seviyelerinde X yönünde tutulup;

X-SOL yüklemesinde yapıya (+) X yönünde deplasman verilip, kat seviyelerinde X yönünde tutulup;
Y-SAĞ yüklemesinde yapıya (+) Y yönünde deplasman verilip, kat seviyelerinde Y yönünde tutulup;
Y-SOL yüklemesinde yapıya (-) Y yönünde deplasman verilip, kat seviyelerinde Y yönünde tutulup;

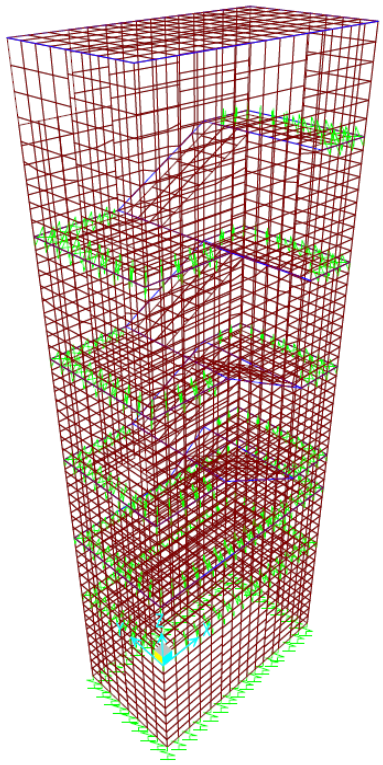
reaksiyon kuvvetleri elde edilmiştir. Sistem geometrisi aşağıda Şekil 9'da görülmektedir.

Deprem anında oluşacak deplasman yapıya kat seviyelerinde ve her katta etkitilecektir. Yapının zeminle aynı oranda deplasman yaptığı varsayılacaktır.Yapının bulunduğu bölgede 50 yılda olma olasılığı % 10 olan deprem için;
Maksimum yer hızı Vs = 62 cm/s
Zemin kayma dalgası hızı Cs=300 m/s olarak alınmıştır.

Buna gore tan γmax = Vs / Cs =0.002066667 olarak belirlenmiştir. Buna göre $\Delta = \gamma$. H formülüyle kat seviyeleri için modele girilecek olan deplasman değerleri yapının bütün yönleri için hesaplanmıştır.

3. DEPREM ANALİZ SONUÇLARI

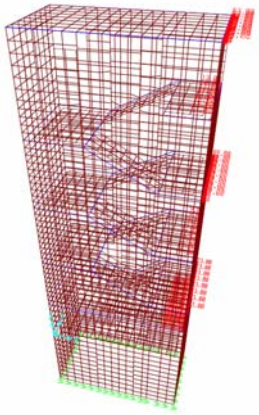
Elde edilen değerler Tablo 1'de görülmektedir. Modele etki ettirilen deplasmanlar sonucu oluşan reaksiyon kuvvetleri ise Şekil 10 da görülmektedir.



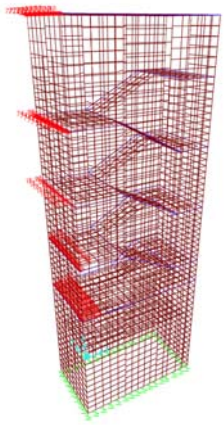
Şekil 9. Sistem geometrisi

Tablo 1. Kat seviyeleri için hesaplanan deplasmanlar

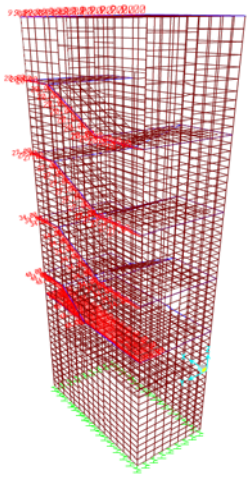
DEP-YSOL		DEP-XSOL		DEP-XSAG		DEP-YSAG	
H	Δ	H	Δ	H	Δ	H	Δ
19.19	0.0397	19.19	0.0397	19.19	0.0397	19.19	0.0397
				16.19	0.0335		
15.26	0.0315						
		14.32	0.0296				
						13.39	0.0277
				12.45	0.0257		
11.43	0.0236						
		10.41	0.0215				
						9.48	0.0196
				8.54	0.0176		
7.52	0.0155						
		6.50	0.0134				
						5.57	0.0115
				4.63	0.0096		
3.82	0.0079						
3.00	0.0062	3.00	0.0062	3.00	0.0062	3.00	0.0062



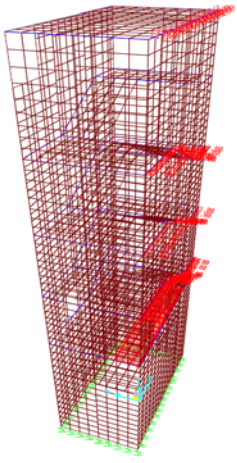
DEP-XSAG



DEP-XSOL



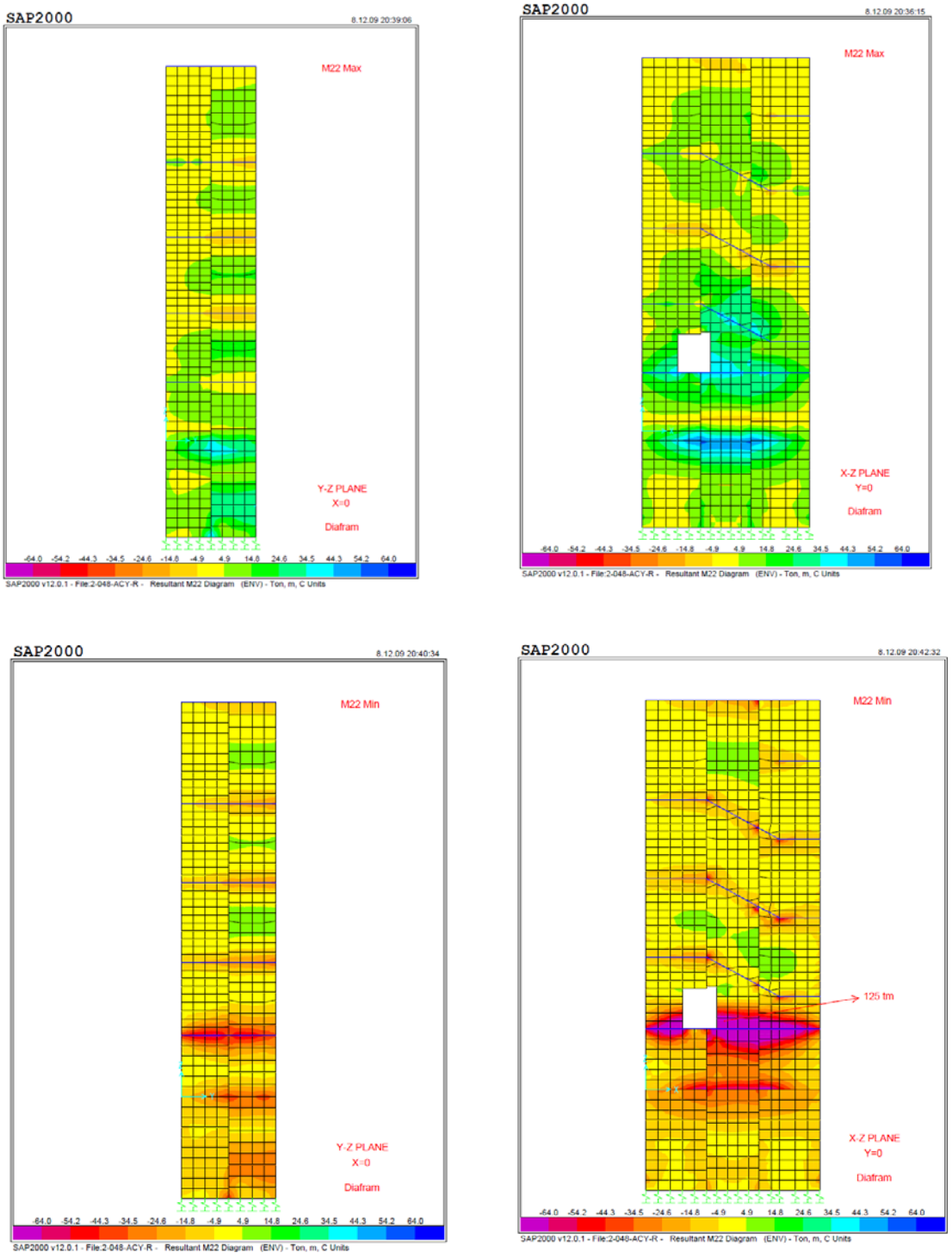
DEP-YSOL



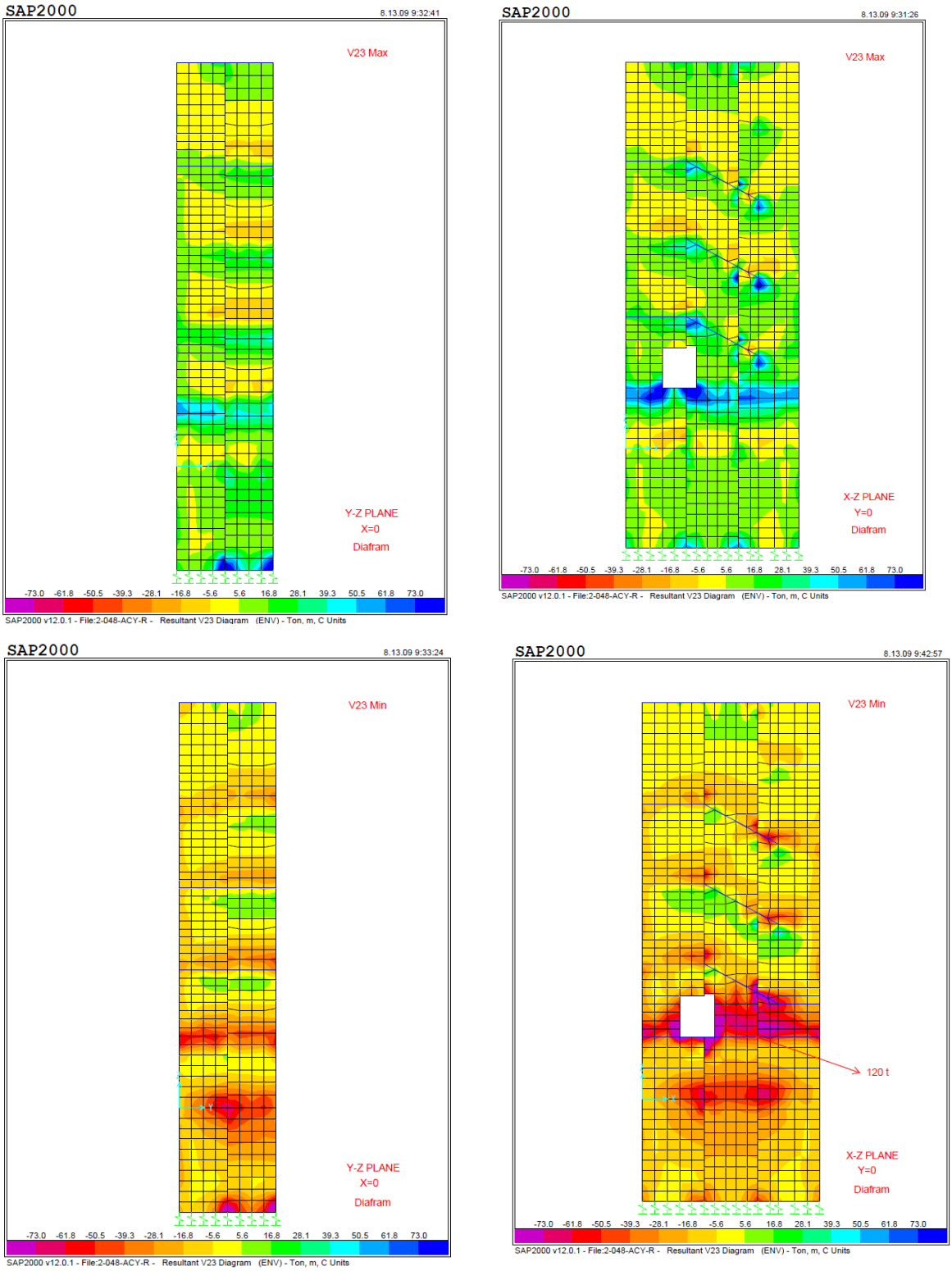
DEP-YSAĞ

Şekil 10. Deplasmanlar Sonucu Oluşan Reaksiyon Kuvvetleri

Şekil 10 da verilen reaksiyon kuvvetleri ilgili depremli yük kombinasyonlarında kullanılarak aşağıdaki Şekil 11'de verilen moment diyagramları ve Şekil 12 de verilen kesme diyagramları elde edilmiştir.

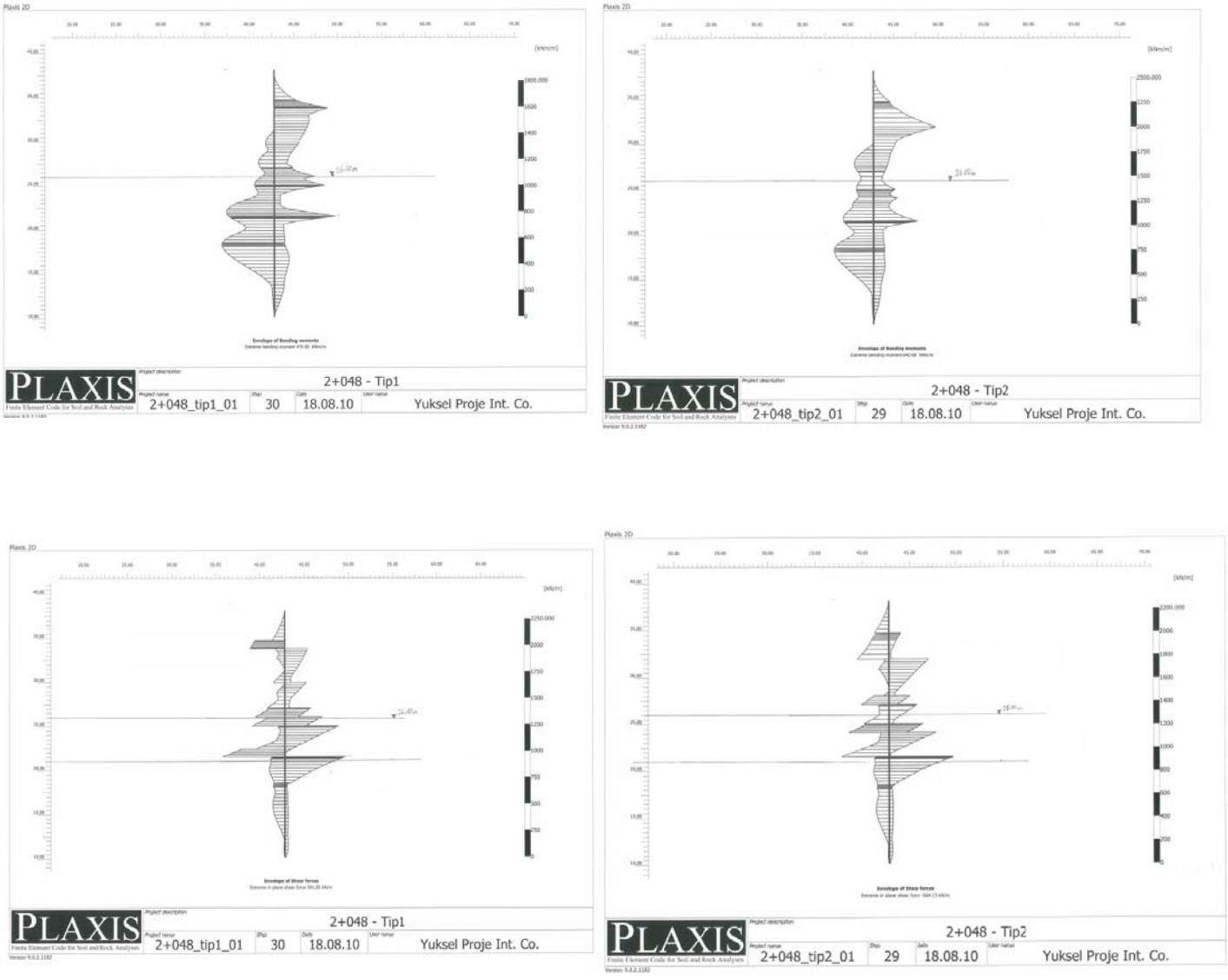


Şekil 11. Moment Diyagramları



Şekil 12. Kesme Diyagramları

Elde edilen sonuçlar aşağıda Şekil 13'de verilen Plaxis programı kullanılarak elde edilen diyafram duvar kesme kuvveti, moment diyagramları ile süperpoze edilerek kesit tahkikleri tamamlanmıştır.



Şekil 12. Plaxis Programı Verileri (Moment ve Kesme Diyagramları)

4. SONUÇ

Zemin deformasyonlarının yapıda oluşturduğu deformasyonlar zemin – yapı rijitlik oranlarına göre hesaplanmış ve deformasyonların yapı elemalarında oluşturduğu kesit zorlanmaları hesaplanmıştır.

Yapımı tamamlanmış TBM tünellerine en az etkiyi verecek sistem seçimi, deprem yüklerinin güvenli bir şekilde karşılanması için büyük avantaj sağlanmıştır.

Kazı esnasında delme tünellerin deformasyonlardan etkilenmemesi için tedbirler alınmış ve kalıcı yük durumu için de diyafram duvar için depremli durum analizi yapılmıştır. Kazının yukarıdan aşağı (top-down) imalat yöntemi ile gerçekleştirimesi öngörülmüş, ayrıca geçici yatay destekler de kullanılmıştır. Böylece diyafram duvarlarda yatay deformasyonlar minimize edilmiş, ancak yapının rijitliğinin artmasından dolayı yüksek deprem yüklerine maruz kalması kaçınılmaz olmuştur. Yapının ebatlarının küçük olması ve diyafram duvarların kesme perdesi olarak da kullanılması ile deprem yükleri kesme duvarlarına aktarılmış, sonuç olarak hem statik durum hem de depremli durum için yapının güvenli olması sağlanmıştır. Benzer şekilde tüneller için yapılan analizlerde oluşan deformasyonların izin verilen değerlerin altında olduğu görülmüş ve kazının yapıda problem yaratmayacağı görüşüne varılmışır. Ayrıca kazı aşamaları için yapılan tünel kesit tahkiki sonuçlarına gore mevcut tünel kesitinin ve donatı miktarının yeterli olduğu sonucuna ulaşılmışır.

KAYNAKLAR

Jaw-Nan (Joe) (1991). Wang Seismic Design of Tunnels.

Alaylı, B. ve Elmalı, K. (2009). Acil Kaçış Yapısı, Statik Betonarme Hesap Raporu

Kuruoğlu, Ö. (2009). Acil Kaçış Yapısı Kazı İksa ve TBM Tünel Etkileşim Hesap Raporu