MARMARAY PROJESİ VE BOĞAZ GEÇİŞİ KISMINDA DEPREM ETKİLERİNİN ANALİZİ VE TASARIM ESASLARI

M. Ozturk

İnşaat Mühendisi, Marmaray Projesi, Yuksel Proje Uluslararası A.Ş, İstanbul, Türkiye

ÖZET:

Bu bildiride, Marmaray Projesi ve bu projede uygulanan deprem tasarım yöntemi ve önlemleri ele alınmıştır. Marmaray Projesi, Avrupa ve Asya'yı İstanbul Boğazı'nın altından geçen bir batırma tünelle birbirine bağlayan dünyanın en büyük demiryolu ulaşım projelerinden biridir. Proje, şehrin her iki yakasındaki mevcut demiryollarının yenilenmesi (CR3), 13.5 km'lik Boğaz Geçiş Hattı'nın İnşaatı (BC1) ve bu sistemde çalışacak yeni araçların temin edilmesinden (CR2) oluşan 3 aşamalı bir projedir. Tamamen yeraltında inşa edilen Boğaz Geçişi Kısmı (BC1), Marmaray Denizinden geçen ve tarihte bugüne kadar büyük depremler üretmiş (M>7) aktif Marmara Fay Hattına yaklaşık 16 km mesafede bulunmaktadır. Bu nedenle, BC1 güzergahı ciddi deprem risklerinin dikkate alınmasını gerektiren bir konumda yeralır. Boğaz Geçiş güzergahını etkileyecek fay segmentlerinin uzun süredir hareketsiz ve sessiz kalmış olmasından dolayı, projenin servis ömrü boyunca bu bölgede büyük ölçekli bir depremin görülme olasılığı yüksektir. Bu nedenle, demiryolu yapılarının sismik tasarımında yaygın olarak kullanılan performansa dayalı iki seviyeli tasarım depremi yerine, projenin önemi ve bulunduğu konumu da dikkate alınarak, tek seviyeli bir tasarım depremi öngörülmüştür. Marmaray tünelleri ve hat yapıları böyle bir depreme maruz kaldığında, yapıda fonksiyon kaybı ya da can kaybına sebebiyet verecek hasarlar oluşmamalı ve demiryolu sistemi deprem sonrasında sadece bir kaç günlük inceleme ve hat düzeltmeleri dışında işletilebilir durumda kalmalıdır.

ANAHTAR KELİMELER: Marmaray, Deprem, Batırma Tünel, Demiryolu.

1. GİRİŞ

İstanbul'un Anadolu ve Avrupa yakası arasında kesintisiz, modern ve yüksek kapasiteli bir demiryolu ulaşımı sağlacak olan Marmaray Projesi Gebze'den Halkalı'ya kadar uzanan 76 km'lik bir güzergaha hizmet edecektir. Projeye ait güzergah planı Şekil 1'de görülmektedir.

Marmaray Projesi, Halkalı-Yedikule ve Haydarpaşa-Gebze arasındaki mevcut yüzeysel demiryolu hatlarının yenilenmesi (CR3), yeni Boğaz Geçiş Hattı'nın İnşaatı (BC1) ve bu sistemde çalışacak yeni araçların temin edilmesinden (CR2) oluşan 3 aşamalı bir projedir.

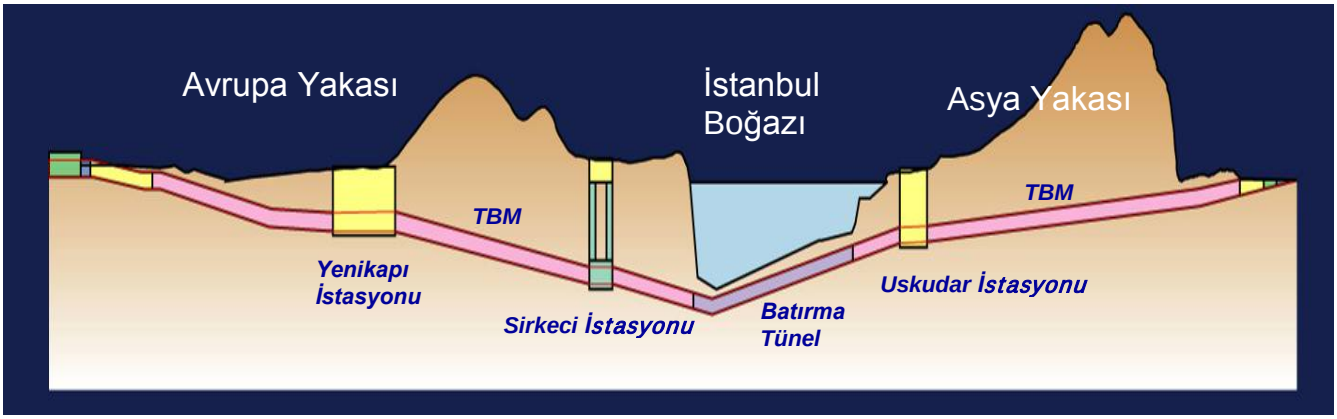
Proje kapsamında, Boğazın altında 1.4 km uzunluğunda bir batırma tünel, batırma tüneli yüzeydeki hatlara bağlayan delme tüneller (TBM & NATM), 3 yeraltı istasyonu, 37 hemzemin istasyon, 165 köprü, 63 menfez, gare sahaları, atölyeler, bakım ve işletme tesisleri inşa edilecektir.

Şekil 1'de beyaz hat olarak gösterilen ve batırma tüneli de kapsayan Boğaz Geçişi, tamamen tünellerden oluşan yaklaşık 13.5 km'lik yeni bir hattır. İstanbul Boğazı'nın altında yapılan batırma tünel, dünyada bugüne kadar bu teknikle inşa edilmiş en derin tüneldir. En derin noktası deniz seviyesinin yaklaşık 58 m altındadır. Her iki

yakadaki mevcut hatları birbirine bağlayacak olan Boğaz Geçişi kısmında 4 yeni İstasyon inşa edilmektedir (Kazlıçeşme, Yenikapı, Sirkeci ve Üsküdar).

Şekil 1. Marmaray Projesi Güzergah Planı

Boğaz Geçişi kısmı'nı oluşturan tünel ve istasyonların şematik profili Şekil 2'de verilmiştir.



Şekil 2. Boğaz Geçişi Şematik Profili

Tüneller, Kuzey Anadolu Fay Sisteminin uzantısı olan Marmara Fay Hattı'na yakın bir konumda yeralmaktadır. Gerek tünel güzergahının aktif fay sistemine bu kadar yakın olması, gerekse Boğazdaki kritik zemin koşulları, dünyanın en derin batırma tünelinin tasarımını ve inşaatını daha da zor bir iş haline getirmektedir.

2. ZEMİN ARAŞTIRMALARI

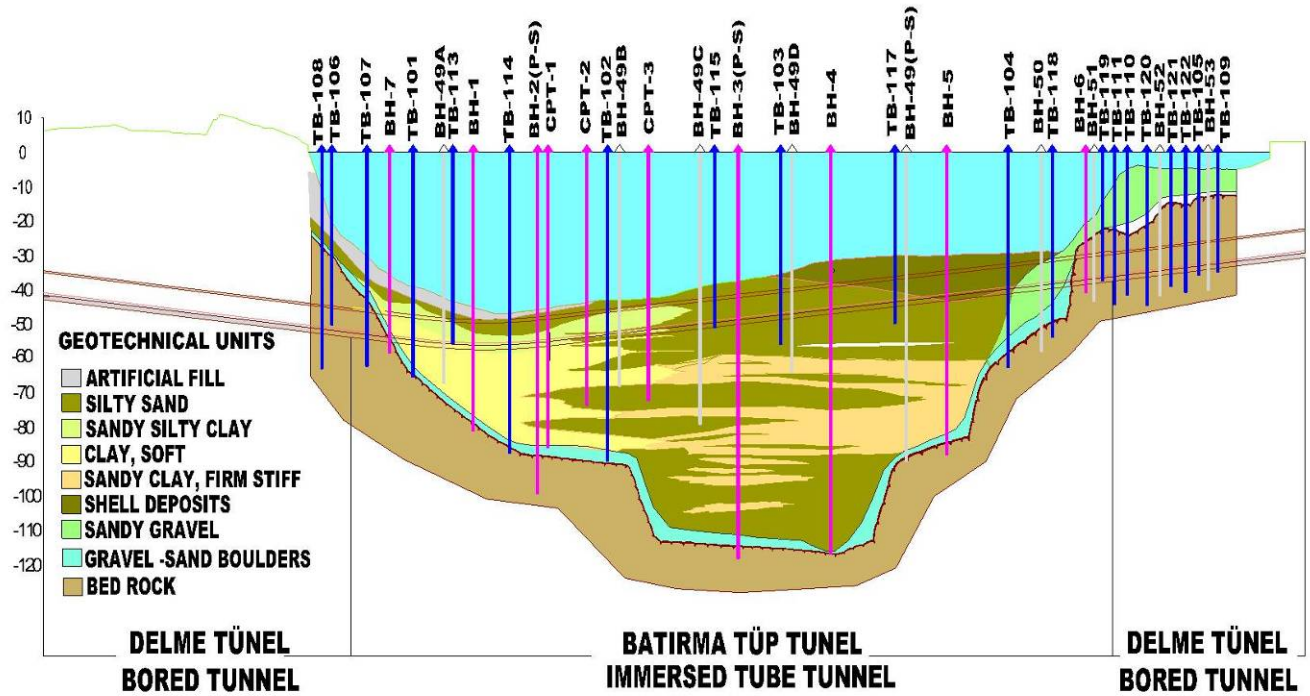
İnşaat aşamasına gelinceye kadar geçen dönemde, Boğazda 3 aşamalı zemin araştırması gerçekleştirilmiştir. Bunlardan ilki 1985-1987 yıllarında ön proje aşamasında gerçekletirilen sondajlardır. Bu aşamada boğazda 20 adet (772 m) sondaj gerçekleştirilmiştir. Boğazdaki deniz sondajları zamanın teknolojisi kullanılarak katamaran tipi duba üzerinden SPT deneyleri ile yapılmıştır.

İhaleye hazırlıklarında kullanmak ve teklif veren firmalara doğru ve yeterli bilgiler sağlamak amacıyla 2002-2003 yıllarında ikinci aşama araştırmalar gerçekleştirlmiştir. Daha gelişmiş teknikler kullanılarak gerçeklen bu araştırmalar kapsamında 7 noktada (350 m) sondaj, 85 m derine kadar inen sürekli Koni Penetrasyon Testleri (CPT) (her 3 metrede bir örselenmiş-örselenmemiş numune ve kayadan karot alınması dahil), deniz tabanından 10 m kaya içine kadar P-S logging test, labotatuvar testleri ve jeofizik sismik yansıma ve batimetrik incelemeler gerçekleştirilmiştir.

İhale sonrasında, seçilen yüklenici tarafından detaylı tasarımın yapılması için gerekli ilave zemin araştırmaları gerçekleştirlmiştir.

Denizde ve karada gerçekleştirilen bu üç aşamalı zemin araştırmalarının amacı, proje güzergahı üzerindeki zemin/kaya sınırlarının ve davranışlarının tespit edilmesi, kaya ve zemin tabakalarının jeoteknik ve kütle parametrelerinin tanımlanması, projenin işletim süresince karşılaşma olasılığı çok yüksek Marmara Depremi'nde zeminlerin davranışlarının ve olası sıvılaşma zonlarının belirlenmesi, denizde ve karada inşa edilecek yapıların deprem anında ve statik durumdaki davranışlarının irdelenmesi, delme tünellerin tasarımında kullanılacak statik ve dinamik parametrelerin belirlenmesi ve yeraltı su durumu kaya/zemin permeabilitelerinin tespit edilmesidir.

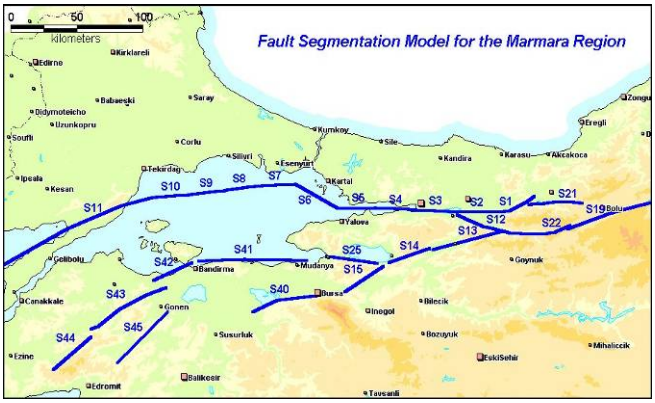
Bu kapsamlı zemin araştırmaları sonunda elde edilen batırma tünel güzergahının yorumlanmış jeolojik profili Şekil 3'te verilmiştir.



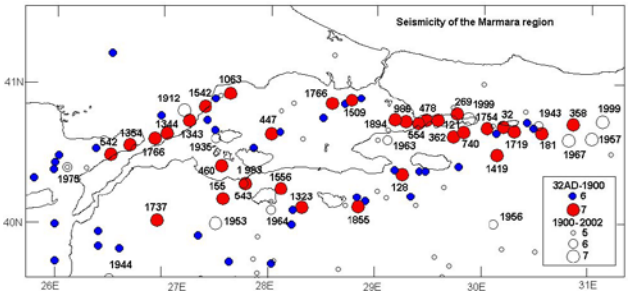
Şekil 3. Batırma Tünel Güzergahı Jeolojik Profili

3. DEPREM ŞARTLARI

Uzun dönemli deprem kayıtları ve GPS ölçümleri'ne göre Marmara Denizi'nden geçen fay hattı Marmaray Projesini etkileyecek en önemli deprem kaynağıdır (bakınız Şekil 4). Bu nedenle Boğaz Geçiş tünellerinin deprem tasarımında bu fay sistemi belirleyici olmuştur.



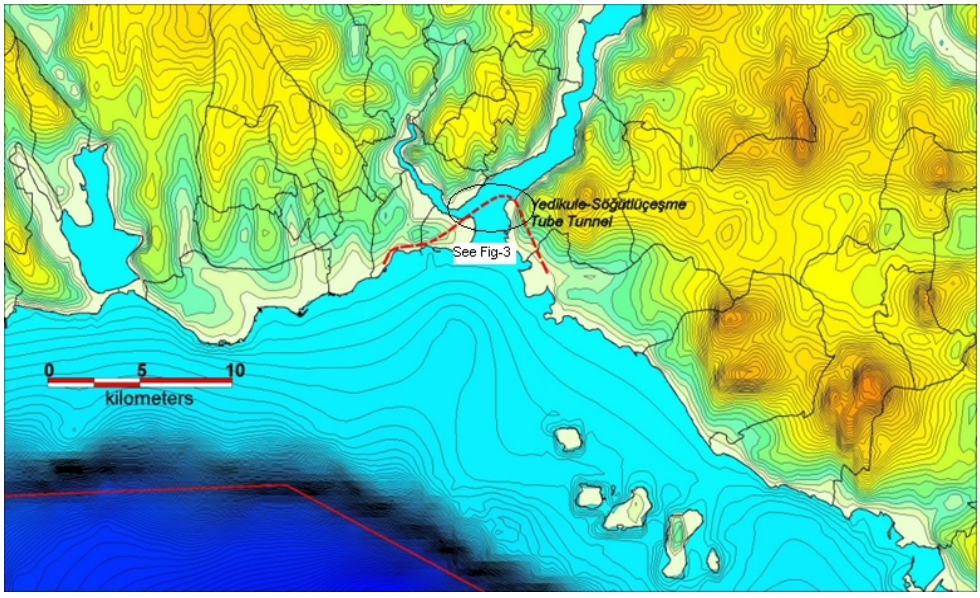
Şekil 4. Marmaray Bölgesi Fay Segmentasyon Modeli



Şekil 5 Marmaray Bölgesi Depremleri (M>5)

Marmara Bölgesi'nde meydana gelen ve büyüklüğü 5.0'ın üzerinde kaydedilen tarihi depremler Şekil 5'te görülmektedir. Bu bölgede, 1500'lü yıllardan günümüze kadar olan süreçte M > 7.0 olan belli sayıda büyük deprem meydana gelmiştir. Kaydedilen depremlerin dağılımının değerlendirmesi sonucunda bu büyük depremler Şekil 4'te verilen fay segmentasyon modeline dönüştürülmüştür.

Boğaz Geçiş hattı, Marmaray Fay Hattına 13~20 km mesafede yer almaktadır. (bakınız Şekil 6).



Şekil 6. Marmaray Boğaz Geçişi Güzergahı ve Marmara Fay Sistemi Yerleşimi

Marmaray Projesi için 2002 yılında Prof. Dr Mustafa Erdik tarafından bir deprem tehlike değerlendirilmesi gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamın projede uygulanacak tasarım depremi ve depreme dayanıklı tasarım yöntemi belirlenmiştir. Bu çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir.

Depreme dayanıklı tasarım için CALTRANS (1999) kriterleri dikkate alınmıştır. Bu kriterlere göre depreme dayanıklı yapı tasarımında, normal koşullarda, iki seviyeli yer hareketi göz önüne alınmaktadır:

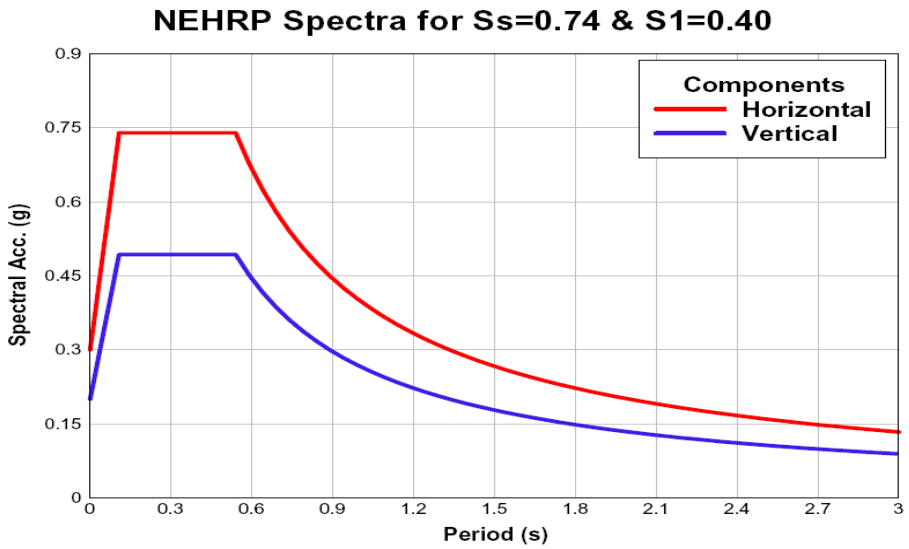
Fonksiyon Değerlendirme Yer Hareketi: Bu yer hareketi yapıyı ömrü boyunca bir ya da iki kez etkileme olasılığı yüksek olan bir depremi tariflemektedir.

Güvenlik Değerlendirme Yer Hareketi: Bu yer hareketi yapı güvenliğini değerlendirmek için kulanılan ve uzun bir tekrarlama periodu (yaklaşık 1000-2000 yıl) olan depremi tariflemektedir.

BC1 tünel güzergahındaki yapıların bulundukları bölge nedeniyle Güvenlik Değerlendirme Depremi'ne maruz kalma olasılığının, yapının servis ömrü boyunca bir iki kez karşılaşabileceği Fonksiyon Değerlendirme Depremi'ne maruz kalma olasılığına yaklaşması nedeniyle iki aşamalı tasarım depremi yönteminden vazgeçilmiştir. Bunun yerine, projenin önemi ve bulunduğu konum da dikkate alınarak, Temel Tasarım Depremi (DBE) olarak tanımlanan tek seviyeli bir tasarım depremi öngörülmüştür.

Hem olasılıksal ve deterministik yaklaşım kullanılarak yapılan tehlike değerlendirme analizleri, hem de diğer teknik değerlendirmeler ışığında DBE, Marmaray Denizi'nde batırma tünel güzergahına 16 km mesafede, S3~S8 fay segmanları üzerinde meydana gelecek Mw=7.5 (moment magnitude) büyüklüğünde bir deprem olarak tanımlanmıştır.

Tanımlanan DBE yer hareketi parametreleri ve tünel yapılarının fay hattı'na olan mesafesi hesaba katılarak "Tasarım Anakaya Tepki Spektrumları" belirlenmiştir. Deprem kaynağına 16 km mesafede bulunan batırma tünel bölgesi için belirlenen Anakaya Spektral İvme Değerleri Şekil 7'de gösterilmiştir.



Şekil 7. Tasarım Anakaya Tepki Spektrumu (R= 16 km)

DBE'ye maruz kalacak tünel yapılarında şu yapısal performans kriterleri aranmıştır;

(a) Oluşan hasarlar kolay izlenebilir ve tamir edilebilir olmalı, yapıda fonksiyon kaybı ya da can kaybıyla sonuçlanmamalıdır.

(b) Batırma tünel elemanları ve birleşimleri su geçirimsizliğini korumalıdır.

(c) Yapılar deprem sonrasında sadece bir kaç günlük inceleme ve hat düzeltmeleri dışında işletilebilir durumda kalmalıdır.

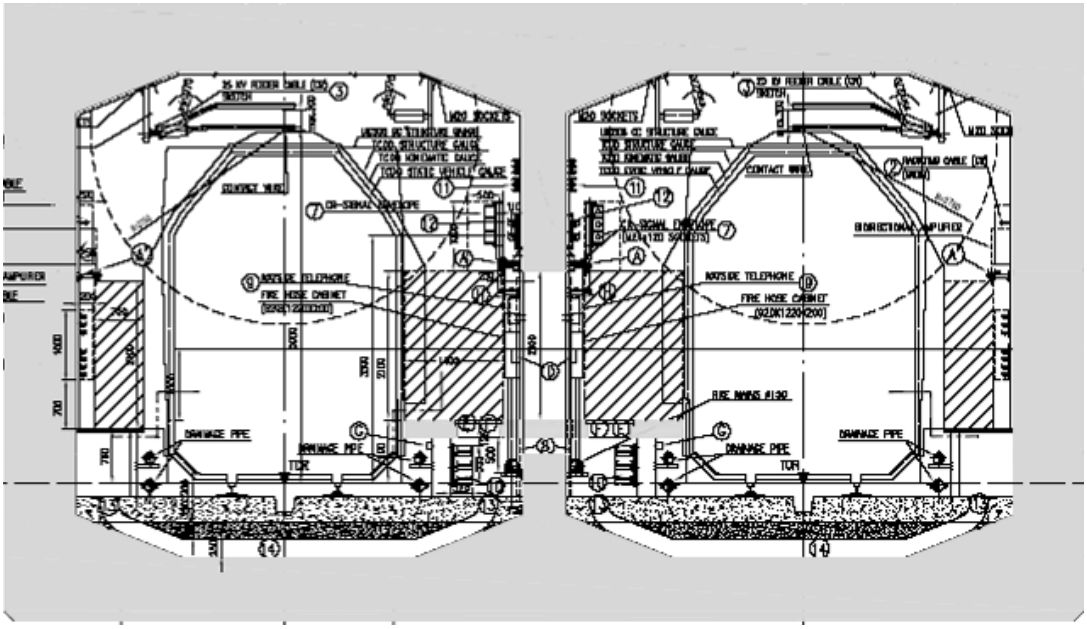
(d) Tamirat işleri, işletmeye minimum engel olacak şekilde yapılabilmelidir.

Yukarıda (a) maddesinde öngörülen koşulların karşılanabilmesi için deprem durumunda yapısal elemanlardaki elastik-ötesi deformasyon ve hasarlar tasarımda kontrol altına alınmalı ve yapısal elemanlar düktil davranış gösterecek şekilde tasarlanmalıdır.

4. BATIRMA TÜNEL DEPREM TASARIMI

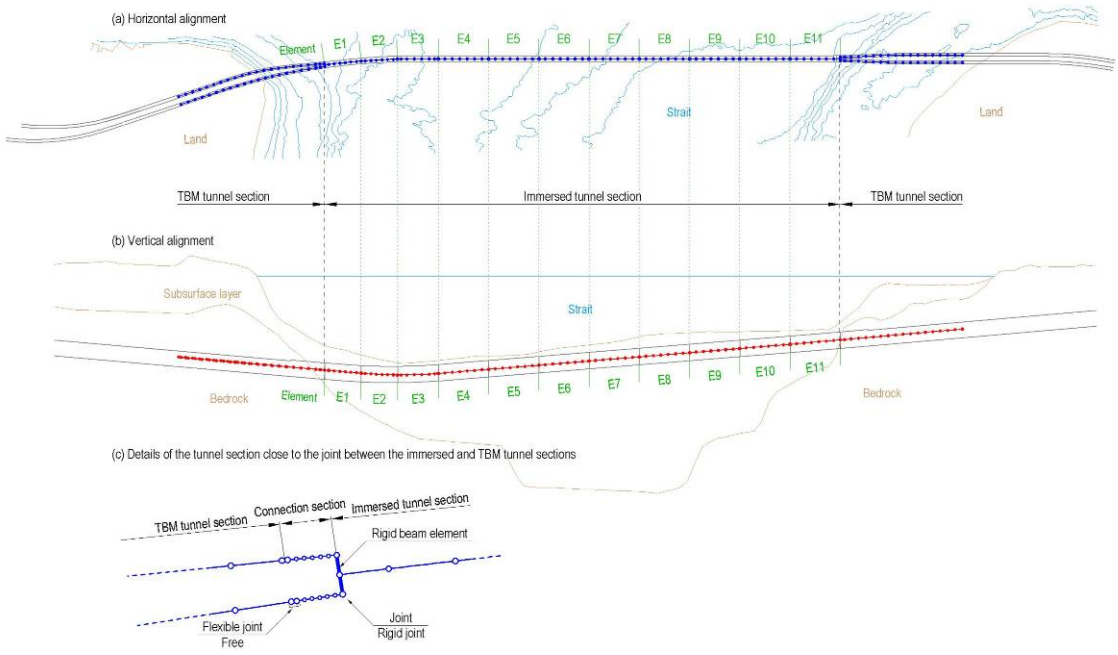
4.1. Batırma Tünel Geometrisi Ve Yapısal Sistemi

1.4 km uzuluğundaki batirma tünel, iki yönlü demiryolu işletmeciliğini sağlamak üzere tasarlanmış iki gözlü dikdörtgen bir kesite sahiptir. Her bir gözde bir tren hattı inşa edilmektedir (bakınız Şekil 8). Tünel, 15.30 m genişliğinde ve 8.75 m yüksekliğinde farklı boylara sahip 11 adet batırma tunnel elemanından oluşmaktadır (bakınız Şekil 9). Tünel elemanları Tuzla'da DLH'ya ait limanda inşa edilmiştir. Burada hazırlanan kuru havuzlarda üretilen elemanlar daha sonra yüzdürülerek Boğaz'a getirilip batırılmış ve deniz tabanında birleştirilmişlerdir. Tünel elemanları birbirine sürekli kiriş gibi davranacak şekilde rijid olarak bağlanmıştır.



Şekil 8. Batırma Tünel Elemanı Tipik Kesiti

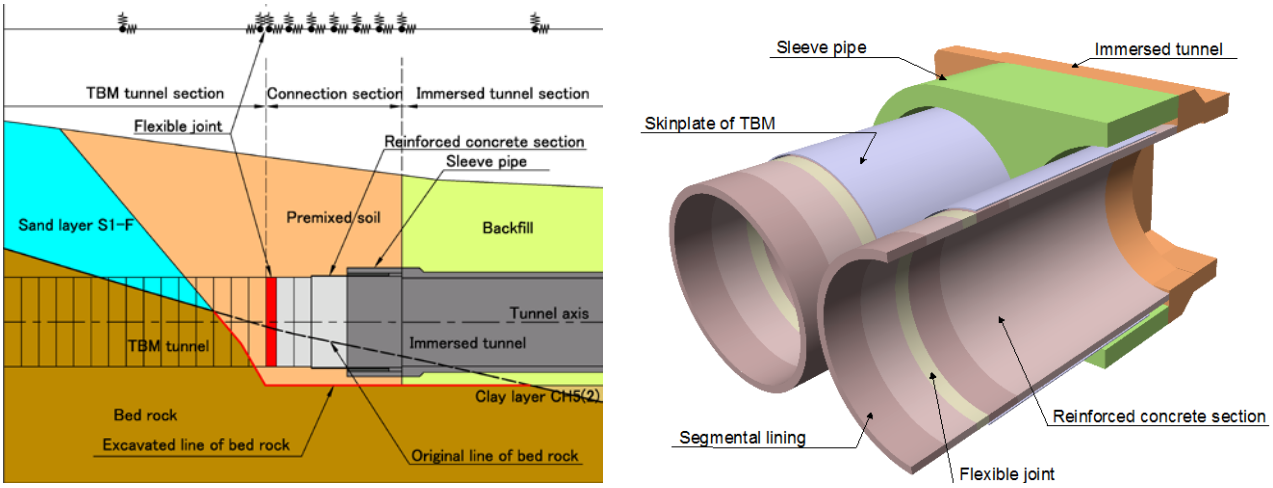
Batırma tünel taşıyıcı sistemi yerinde dökme donatılı betondur. Su geçirimsiz olarak imal edilen betonarme yapı, ilave bir su izolasyon önlemi olarak çelik membran ile kaplanmıştır. Tünel elemanlarının bağlantı noktaları komposit kesit olarak tasarlanmıştır. Bu kısımlar enine yönde komposit kesit gibi davranırken boyuna yönde tipik betonarme kesit davranışı ve rijitliği göstermektedir.



Şekil 9. Batırma Tünel Elemanları Plan ve Profili

Batırma tünel her iki uçta delme tünellerle karaya bağlanmaktadır. Tünel elemanları, Boğaz tabanında açılan hendek içerisine indirilip, birbirine bağlandıktan sonra geri dolgu malzemesi ile kapatılmıştır. Sonraki aşamada karadan gelen 4 adet TBM (2 Asya yakasından, 2 Avrupa yakasından) batırma tünele bağlanmıştır.

Batırma tünel'le TBM tüneller arasındaki bağlantı özel bir teknik kullanılarak gerçekleştirilmiştir. TBM'ler batırma tünelin her iki ucunda tasarlanan kılıf yapısına güvenli bir şekilde bağlandıktan sonra bu noktalarda bağlantı yapıları inşa edilmiştir (bakınız Şekil 10).



Şekil 10. Batırma Tünel ve TBM Bağlantı Yapısı

Boğazın altından geçen batırma tünelin her iki ucunda TBM tünel kesitinde kalacak şekilde deprem derzleri tasarlanmıştır. Bu derzler TBM'in hemen kayadan çıktığı noktada zemin çökelleri ile anakayanın birleştiği noktaya gelecek şekilde seçilmişlerdir. Yüksek su basıncından dolayı bu esnek derz elemanlarının daha önce su basıncı altında performansı kanıtlanan dairesel TBM kesitine yerleştirilmesi uygun bulunmuştur.

4.2. Saha Tepki Analizi

Batırma tünel güzergahında anakaya üzerinde çok değişken karakterlerde derin zemin çökelleri mevcuttur. Batırma tünel bu zeminin yapısının yüzeye yakın tabakalarından geçmektedir. Deprem sırasında anakayada oluşan yer hareketlerinin mevcut zemin özelliklerine bağlı olarak yüzeye yansımalarını hesaplamak için saha tepki analizleri gerçekleştirilmiştir.

Saha tepki analizlerinden şu bilgiler elde eldilmiştir:

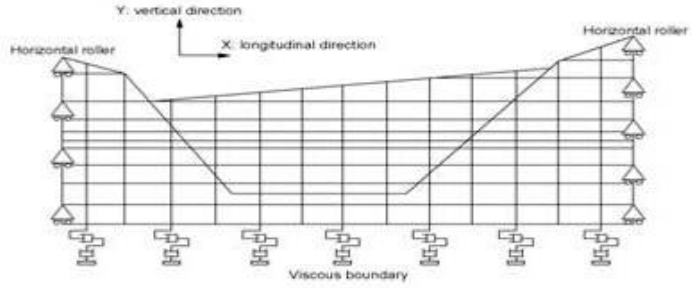
(a) Boyuna tünel tepki analizlerine veri oluşturmak için zaman kayıtlı serbest zemin hareketleri,

(b) Enine tünel tepki analizlerine veri oluşturmak için serbest zemin deformasyon profili,

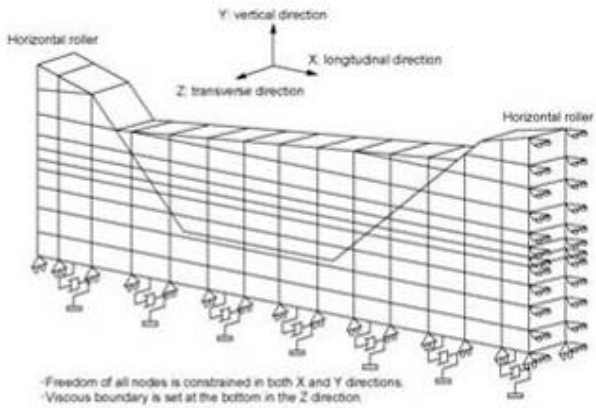
(c) Sıvılaşma potansiyeli değerlendirmeleri için zeminde deprem kaynaklı kesme gerilmeleri.

Saha tepki analizleri 2 (tünel boyuna yön) ve 3 (tünel enine yön) boyutlu dinamik analizlerle gerçekleştirilmiştir. Analizlerde sonlu eleman yöntemiyle modeller oluşturulmuş ve zeminin lineer olmayan davranışı hesaba katılmıştır.

Saha tepki analizlerinde kullanılan 2 ve 3 boyutlu şematik modeller Şekil 11 ve 12'te verilmiştir.



Şekil 11. Saha Tepki Analizi Modeli (Boy)



Şekil 12. Saha Tepki Analizi Modeli (En)

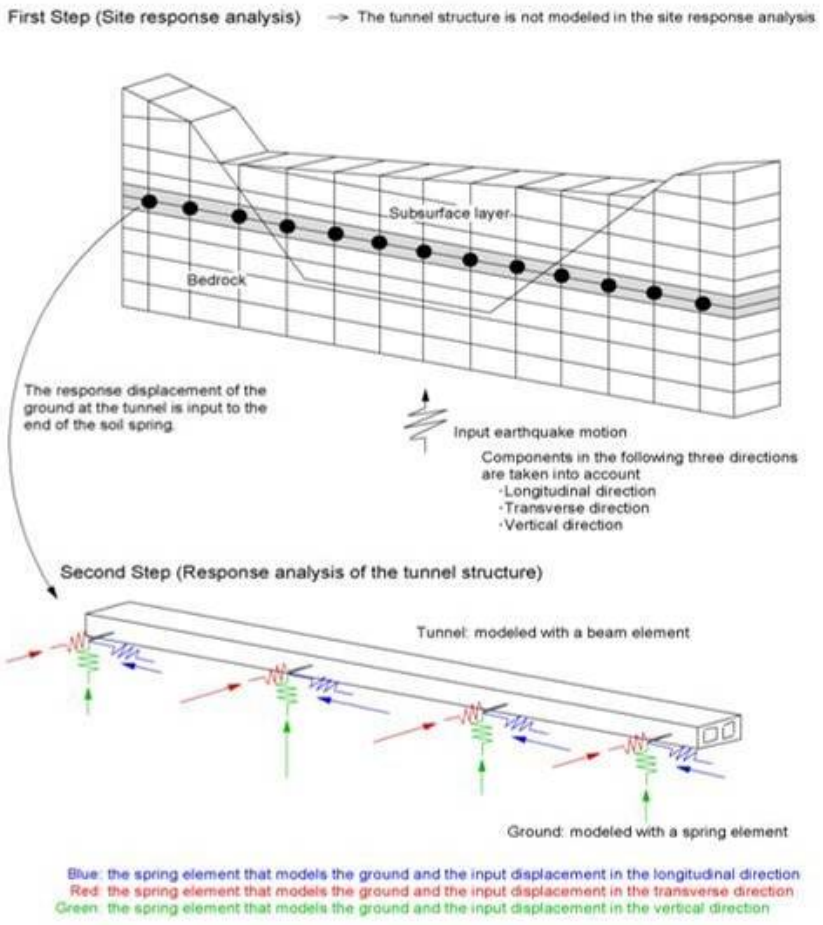
4.3. Boyuna Yön Tünel Tepki Analizi

Saha tepki analizinden elde edilen zaman kayıtlı zemin deplasmanları boyuna tünel tepki analizleri gerçekleştirilmiştir. Tepki analizinde tünel yapısı 3 boyutlu bir kiriş elemanı olarak, zemin ise yay elemanları olarak tanımlanmıştır.

Analiz modelinde üç farkli tipik kesiti tanımlanmıştır; batırma tünel kesiti, TBM tünel kesiti ve batırma tünel ile TBM bağlantı yapısı kesiti. TBM tünel segman halkaları ise eşdeğer flexural rijitliğe sahip 3 boyutlu kiriş elemar, halkalar arasındaki bağlantı koşullları ise basınç ve çekme altında eşdeğer rijitlik gösterecek yay elemanları ile tanımlanmıştır.

Batırma tünel elemanları arasındaki bağlantılar ve TBM & batırma tünel arasındaki bağlantılar sürekli bağlantılardır. Analizde deprem derzinde kullanılan esnek segmanlar serbest haraket edebilen elemanlar olarak tanımlanmıştır.

Saha Tepki Analizi ile Boyuna Yön Tünel Tepki Analizi arasındaki ilişki Şekil 13'te gösterilmiştir.



Şekil 13. Boyuna Saha Tepki Analizi ve Tünel Tepki Arasındaki İlişki

4.4. Enine Yön Tünel Tepki Analizi

Boğazdaki elverişsiz zemin koşulları nedeniyle deprem sırasında zemin-yapı arasındaki etkileşimin tam olarak belirlenmesi büyük önem kazanmıştır.

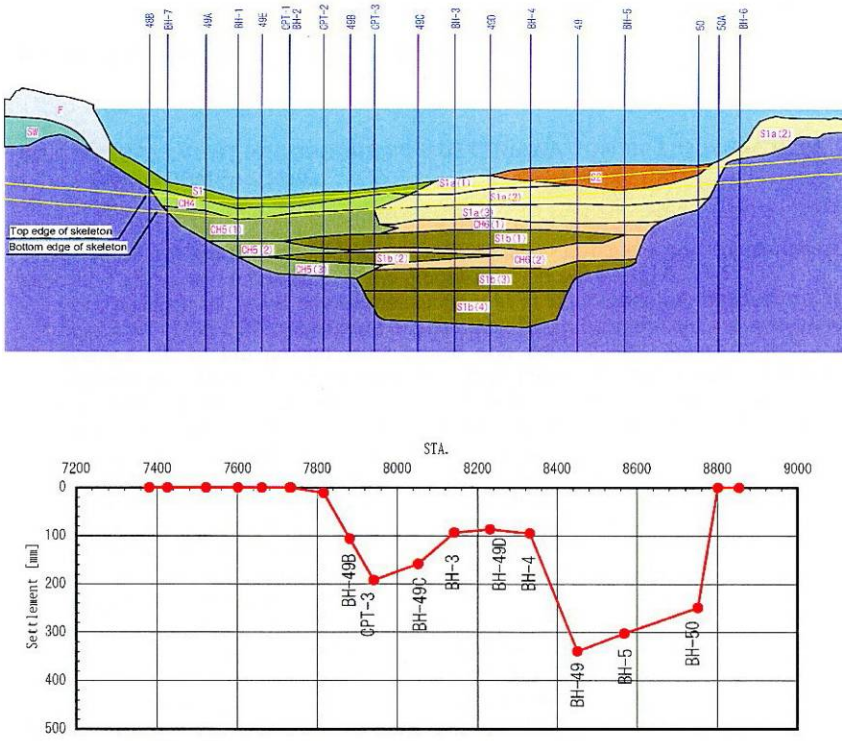
Tepki analizinde tünel yapısı, lineer olmayan betonarme yapı davranışı gösteren 2 boyutlu kiriş elemanları ile modellenmiştir. Zemin ise saha tepki analizi modelindeki zemin tabakalarıyla uyumlu olarak 2 boyutlu sonlu elemanlarla modellenmiştir. Zeminin kesme rijitliği, her bir zemin tabakası için saha tepki analizlerinden elde edilen maksimum kesme birim deformasyonlarından hesaplanmıştır. Bu model üzerinde statik deprem deformasyon metodu kullanılarak tepki analizi gerçekleştirilmiştir.
Tünel enine yön yapısal analizi, saha tepki analizinden elde edilen zemin ivmelerinin tünel yapısı ve onu çevreleyen zemine uygulanması ile gerçekleştirilmiştir. Kritik ivme değeri, saha tepki analizinde tünel taban kotu ile üst kotu arasındaki göreceli deplasmanın maksimum olduğu andaki ivme değeri olarak seçilmiştir. Kritik tünel kesiti ise saha tepki analizlerinde bu göreceli deplasmanın maksimum olduğu noktalar olarak belirlenmiştir.

Tünel tepki analizleri sonucunda deprem kaynaklı zemin deplasmanlarının tünel yapısında oluşturduğu kuvvetler depreme dayanıklı yapı tasarımına veri oluşturmuştur.

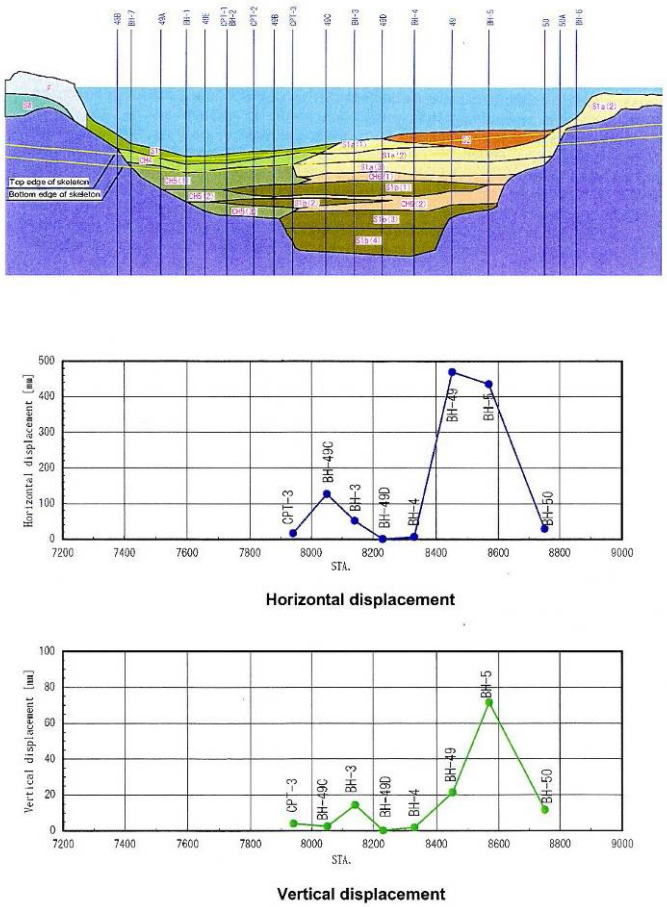
4.5. Sıvılaşma Analizleri

Tünel tasarımında sıvılaşmanın üç farklı etkisi dikkate alınmıştır: (1) kaldırma etkisi, yüzme, (2) sıvılaşma sonrası oturmalar ve yatay deformasyonlar (toplam ve farklı ötelenmeler), (3) yanal kayma stabilitesi. Batırma tüneli çevreleyen zeminin sıvılaşma değerlendirmesi penetrasyon test (CPT) sonuçları ve sismik kesme gerilmeleri kullanılarak ampirik yöntemle yapılmıştır. Kesme gerilmeleri saha tepki analizinden elde edilmiştir.

Yapılan analizler sonucunda tünel taban kotunun üzerinde ve altında, sıvılaşma potansiyeli olan zemin tabakalarının bulunduğu belirlenmiştir. Sıvılaşmadan kaynaklanan zemin deformasyonlarının batırma tünel'e etkisi analiz edilmiştir. Kazı taban kotunda sıvılaşma sonrası oluşan oturmalar ve tünel boyunca oluşan yatay ve düşey deplasmanların dağılımı Şekil 14 ve 15'de verilmiştir.



Şekil 14. Kazı Tabanında Sıvılaşma Sonrası Oturmalar

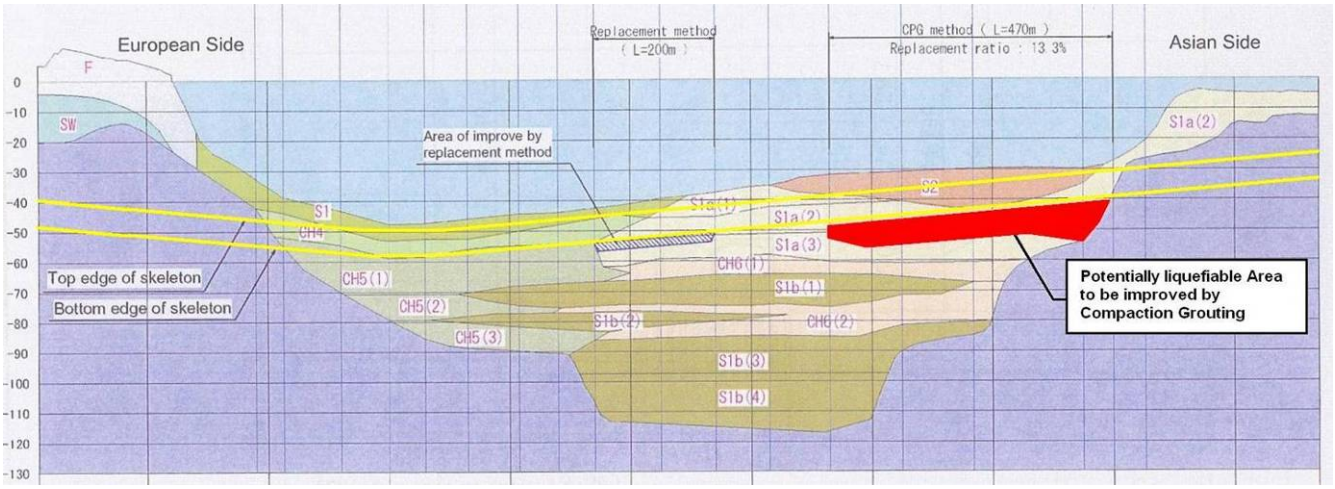


Şekil 15. Sıvılaşma Nedeniyle Tünel Boyunca Kazı Tabanında Oluşan Yatay ve Düşey Deplasmanlar

Tünel taban kotunun üzerinde, sıvılaşma potansiyeli olan zemin tabakaları tünel hendek kazısı sırasında kaldırılacaktır. Tünel tamamlandıktan sonra bu bölümler kontrollü olarak tasarlanmış, sıvılaşma riski olmayan geri dolgu malzemesi ile doldurulduğundan ilave bir önleme gerek duyulmamıştır.

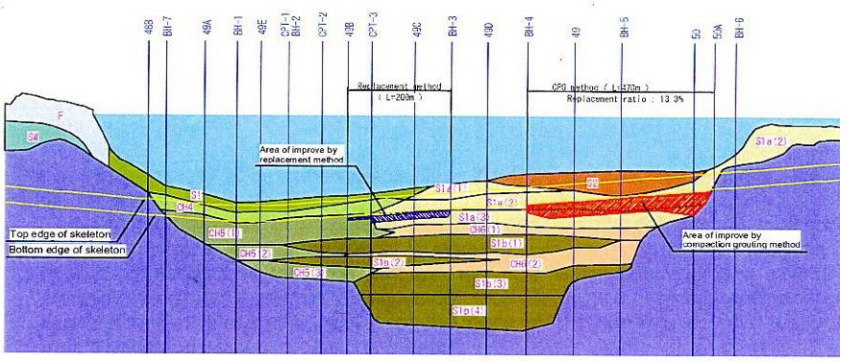
Tünel altındaki sıvılaşan zemin tabakalarında ise Compaction Grouting (4 m'den derin tabakalarda) ve yer değiştirme yöntemiyle (4 m'den ince tabakalarda) zemin iyileştirmesi uygulanmasına karar verilmiştir.

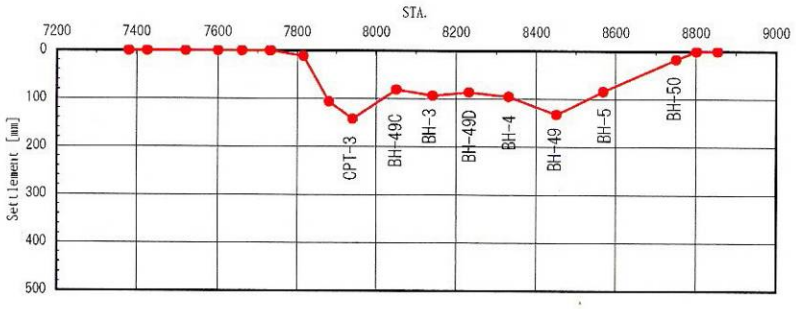
Hattın Üsküdar'a yakın bölümünde uzuluğu 470 m, derinliği 4~10 m arasında değişen bir zemin tabakasında sıvılaşma potansiyeli görülmüş ve bu zemin tabakasında Compaction Grouting (CPG) yöntemiyle zemin iyileştirmesi yapılmıştır. Bu bölgede, deniz üzerinde bir platform kullanılarak 2,770 adet CPG kolonu oluşturulmuş ve toplamda 74,500 m3'lük bir zemin tabakası iyileştirilmiştir. CPG kolonlarının oluşturulması için toplam 11,000 m3 hacminde enjeksiyon yapılmıştır. İyileştirme oranı %13.3'tür. İyileştirme uygulanan alan Şekil 16'de verilen boy profilde görülmektedir.



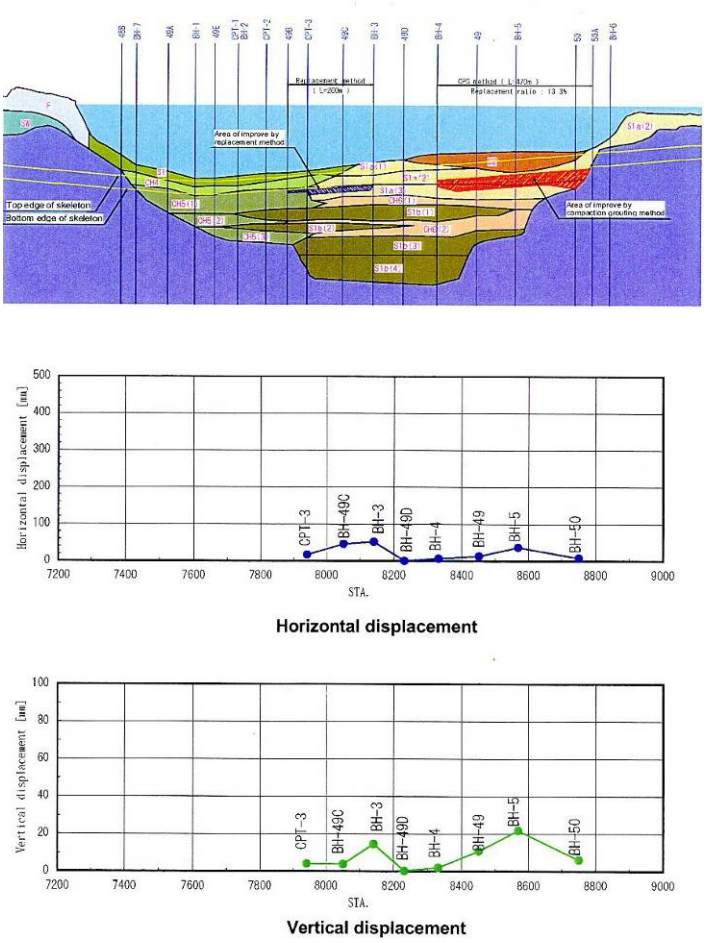
Şekil 16. Boğaz Zemin Profilinde Zemin İyileştirmesi Uygulanan Alanlar

Zemin iyileştirme önlemleri dikkate alınarak, yeni parametrelerle analizler tekrarlanmış ve bu analizlerin sonucu Şekil 17 ve 18'de verilmiştir.





Şekil 17. Zemin İyileştirmesinden Sonra Hesaplanan Sıvılaşma Sonrası Oturmalar



Şekil 15. Zemin İyileştirmesinden Sonra Hesaplanan Sıvılaşma Deformasyonları

KAYNAKLAR:

1. M.Erdik, B. Siyahi, C. Özbey, K. Şeşetyan, M. Demircioğlu, H. Akman (2002). Earthquake Assessment Hazard Assessment, Earthquake Resistant Design Considerations and Design Basis Ground Motion for the Marmaray Project

2. Taisei-Gama-Nurol (2005). Seismic Assessment for Immersed Tunnel.

3. J. Wang, M. Erdik, S. Otake (2005). Seismic Hazard Assessment and Earthquake Resistant Design Considerations for the Bosphorus Tunnel Project.

4. O. Şimşek, S. Mitani, O. Altun (2005). Marmaray Project: Geological and Geotechnical Investigations.