

UDK 624.194:625.11 (496.1-56)

Primljeno

# Projekt Marmaray - željeznica ispod mora

Huseyin Belkaya

## Ključne riječi

Projekt Marmaray,  
željeznica,  
Istanbulski tjesnac,  
tunel,  
tehnički zahvati,  
povijesno nasljeđe

## Key words

Marmaray Project,  
railway,  
Istanbul Strait,  
tunnel,  
technical interventions,  
historic heritage

## Mots clés

Projet de Marmaray,  
voie ferrée,  
détroit du Bosphore,  
tunnel,  
interventions techniques,  
patrimoine historique

## Ключевые слова

Проект Мармарэй  
(Marmaray),  
железная дорога,  
Истамбульский пролив,  
тоннель,  
технические захваты

## Schlüsselworte

Projekt Marmaray,  
Eisenbahn,  
Istanbuler Meerenge,  
Tunnel,  
technische Eingriffe,  
geschichtliches Erbtum

H. Belkaya

Stručni rad

## Projekt Marmaray - željeznica ispod mora

Opisuje se Projekt Marmaray kojim se rješava prijelaz željeznice tunelom ispod Istanbulskog tjesnaca. Tim sustavom će se u cijelosti renovirati postojeći sustav prigradske željeznice u Istanbulu i povezati europsko i azijsko kopno. Ispod razine tla bit će 13,4 km pruge. Prikazuju se ciljevi Projekta, a posebno složeni tehnički zahvati koji su predstavljali izazove sa kojima su se suočili graditelji ovog pothvata. Istaknuti su napori za spašavanje i zaštitu povijesnog nasljeđa.

H. Belkaya

Professional paper

## Marmaray Project - a railway under the sea

The Marmaray Project, in the scope of which the railway tunnel below the Istanbul Strait will be built, is described. Upon completion of this system, the Istanbul's existing suburban railway system will be fully upgraded, and a proper link will be established between Europe and Asia. 13.4 km of railway will be built below the ground level. Project objectives are presented, and highly complex technical problems, presenting a veritable challenge to the builders, are described. A special emphasis is placed on efforts that are being invested in preserving and protecting historic heritage.

H. Belkaya

Ouvrage professionnel

## Projet de Marmaray - voie ferrée sous la mer

Le Projet de Marmaray, dans le cadre duquel le tunnel sous le détroit du Bosphore sera construit, est décrit. Après l'achèvement du projet, le système de voie ferrée urbain d'Istanbul sera complètement rénové, et la connexion solide sera établie entre l'Europe et l'Asie. 13,4 kilomètres de voie ferrée seront construits au-dessous du niveau de sol. Les objectifs du projet sont présentés, et les problèmes techniques complexes, présentant un défi véritable aux constructeurs, sont décrits. L'accent est mis sur des efforts fournis afin de préserver et protéger le patrimoine historique.

Х. Белкая

Отраслевая работа

## Проект Мармарэй (Marmaray) – железная дорога из-под моря

В работе описывается Проект Мармарэй (Marmaray), которым решается переход железной дороги тоннелем из-под Истамбульского пролива. Той системой полностью реновируется существующая система пригородной железной дороги в Истамбуле и связываются европейский и азиатский материи. Из-под уровня грунта будет находиться 13,4 км железной дороги. Представляются цели Projekta, а особенно сложными являются технические захваты, которые представляли вызовы, с которыми встретились строители этого предприятия. Подчёркнуты усилия по спасению и защите исторического наследия.

H. Belkaya

Fachbericht

## Projekt Marmaray - Eisenbahn unter dem Meeresspiegel

Beschrieben ist das Marmaray - Projekt nach dem durch einen Tunnel unter der Istanbuler Meerenge der Eisenbahnübergang gelöst wird. Mit diesem System wird das bestehende System der Vorortbahn in Istanbul komplett erneuert und das europäische und asiatische Festland verbunden. 13,4 km der Bahn verläuft unterirdisch. Dargestellt sind die Ziele des Projekts, und besonders die komplizierten technischen Eingriffe die für die Bauleute dieses Unterfangens besondere Herausforderungen vorstellten. Hervorgehoben sind die Bemühungen um Rettung und Schutz des geschichtlichen Erbtums.

Autor: Mr. sc. **Huseyin Belkaya**, dipl. ing. građ., Zamjenik voditelja projekta Yuksel Proje International, Turska

## 1 Definicija projekta

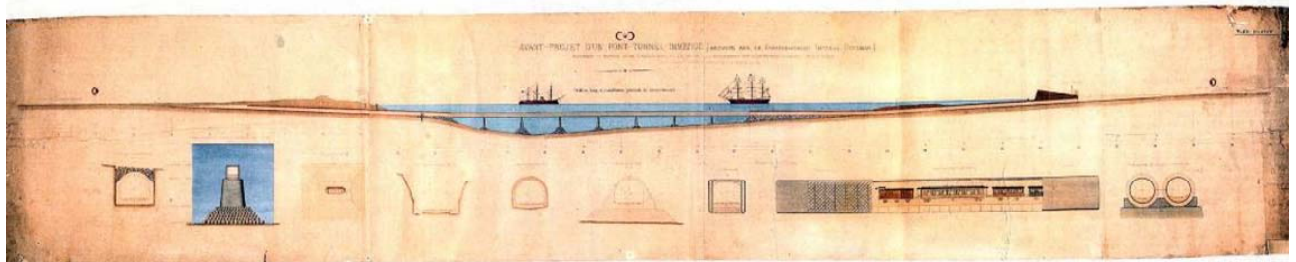
Projektom Marmaray u potpunosti će se renovirati postojeći sustav prigradske željeznice u Istanbulu, i to povezivanjem Halkalija na europskoj strani s Gebzeom na azijskoj strani s pomoću kontinuiranoga, modernoga i visokokapacitetnog sustava prigradske željeznice.

Dva postojeća željeznička kolosijeka smještena na obje strane istanbulskog tjesnaca zamijenit će se s tri kolosijeka koji će međusobno biti povezani bušenim tunelima i "uronjenim" tunelima. Sveukupna duljina tog novoga željezničkog sustava iznositi će 76 km, od čega će se 13,4 km nalaziti ispod razine tla (slika 1.). Glavne su građevine i sustavi karakteristični za ovaj projekt uronjeni tunel, bušeni tuneli, tuneli izvedeni novom austrijskom metodom, tri nove podzemne željezničke postaje, 37 površinskih postaja, 165 mostova, 63 propusta, pomoćni pogoni, radionice, pogoni za održavanje, centar

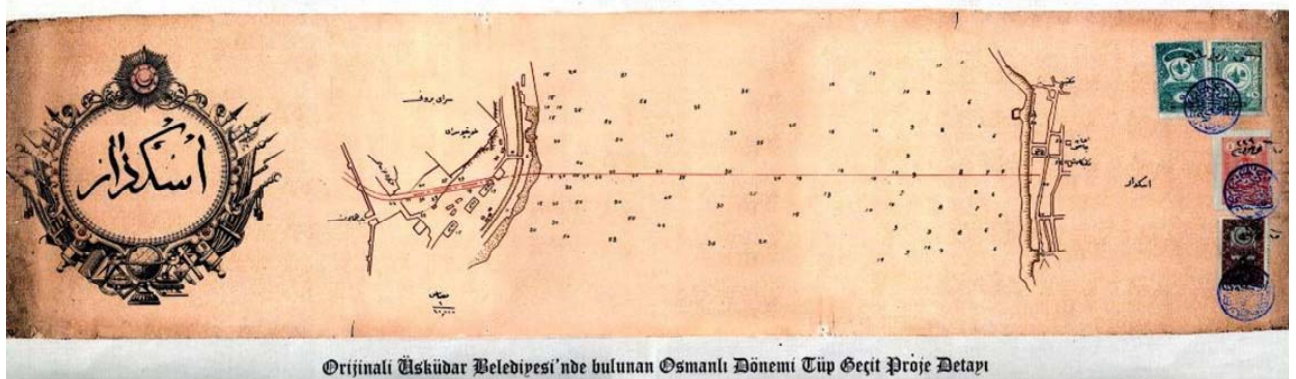
jeleka koji će međusobno biti povezani bušenim tunelima i "uronjenim" tunelima. Sveukupna duljina tog novoga željezničkog sustava iznositi će 76 km, od čega će se 13,4 km nalaziti ispod razine tla (slika 1.). Glavne su građevine i sustavi karakteristični za ovaj projekt uronjeni tunel, bušeni tuneli, tuneli izvedeni novom austrijskom metodom, tri nove podzemne željezničke postaje, 37 površinskih postaja, 165 mostova, 63 propusta, pomoćni pogoni, radionice, pogoni za održavanje, centar



Slika 1. Prikaz trase



1860 tarihli orijinal Tüp Geçit Projesi Planı



Orijinali Üsküdar Beledipesi'nde bulunan Osmanlı Dönemi Tüp Geçit Proje Detayı

Slika 2. Prijelaz preko istanbulskog tjesnaca, inženjer S. Preault, 1860

za upravljanje i kontrolu prometa, potpuno novi električni i strojarski sustavi te popunjavanje željezničkoga voznog parka s 440 novih jedinica.

## 2 Prijašnji pokušaji tunelskog premoštavanja istanbulskog tjesnaca

Ideja o gradnji željezničkog tunela ispod istanbulskog tjesnaca prvi se put pojavila još 1860. godine. Međutim, u najdubljem dijelu tjesnaca, zbog tehnoloških ograničenja tog vremena, tunel se nije mogao položiti niti na dno, a niti ispod dna, pa je zato predviđen "plutajući" tip tunela koji je trebao ležati na stupovima postavljenima na dno mora (slika 2.).

Slični, ali nešto poboljšani projekt izrađen je 1902. godine. Tim je projektom također predviđen željeznički tunel ispod tjesnaca, ali je prema ovom rješenju trebao biti položen na samo morsko dno. Oba predložena tunela trebala su povezivati dva stara naselja, Uskudar i Sarayburnu. I danas, 148 godina nakon izrade prvog projekta, trasa Projekta Marmaray koja vodi preko istanbulskog tjesnaca još se uvijek nalazi na istom potezu između Uskudara i Sarayburnua (slika 3.).



Slika 3. Projekt Marmaray, podmorski prijelaz istanbulskog tjesnaca

## 3 Ciljevi Projekta Marmaray

Kako se ovdje radi o velikom projektu razvoja prometne infrastrukture, Projekt Marmaray neće se ograničiti na poboljšanje svakodnevnoga istanbulskog prometovanja, već će bitno utjecati i na razvoj čitavog grada i šire regije.

Najznačajniji su ciljevi:

- pronaći dugoročno rješenje za ublažavanje sadašnjih gradskih prometnih teškoća u Istanbulu
- ublažiti sadašnje operativne probleme na glavnim željezničkim linijama
- osigurati izravnu željezničku vezu između Azije i Europe
- povećati kapacitet, pouzdanost, dostupnost, točnost i sigurnost na prigradskim i gradskim željezničkim linijama
- smanjiti vrijeme putovanja i povećati komfor na gradskim i prigradskim željezničkim linijama
- osigurati kontinuirani putnički i robni promet preko istanbulskog tjesnaca
- smanjiti razinu onečišćenja zraka od ispušnih plinova, te tako poboljšati kakvoću zraka u Istanbulu
- umanjiti prometnu buku u središtu Istanbula
- ublažiti negativne utjecaje na povijesna zdanja i lokacije od povijesnog značenja nuđenjem alternativnog rješenja kojim se umanjuje broj automobila u starom središtu Istanbula.

## 4 Posebni izazovi Projekta

Projekt Marmaray postavlja pred graditelje velik broj izazova od kojih nabrajamo samo najznačajnije:

- Uronjeni tunel kojim se po morskom dnu prelazi preko istanbulskog tjesnaca biti će najdublji do sada izgrađeni tunel, s najnižom točkom na oko 58 m ispod površine mora.
- Istanbulsko će područje najvjerojatnije zadesiti potres jačine do 7,5 stupnjeva u razdoblju uporabe ovog prometnog sustava.
- Geotehnički uvjeti u području istanbulskog tjesnaca su takve prirode da graditeljima neće biti jednostavno ostvariti seizmički prihvatljiv spoj između uronjenog tunela i bušenih tunela.
- U konačnici će kapacitet ovog prometnog sustava iznositi barem 75.000 putnika na sat u svakom smjeru. Stoga se trebaju definirati posebni zahtjevi glede sigurnosti osoba u tunelima i podmorskim stanicama.
- Morske će radove trebati obavljati u vrlo velikim dubinama i u tjesnacu kroz koji prođe više od 50.000 brodova na godinu, te preko kojeg prelazi mnogo trajekata i putničkih brodova.
- Radnje uranjanja odvijat će se pod utjecajem morskih struja koje su prisutne na raznim dubinama u zoni istanbulskog tjesnaca, s napomenom da brzina gornje morske struje dostiže brzinu i do 5 čvorova.

- Podmorske stanice i tuneli gradit će se u području gdje ima tragova civilizacija starih i više od 8.000 godina. Stoga je izuzetno važno poduzimati sve radnje radi zaštite i spašavanja povijesnog naslijeđa.

## 5 Seizmičnost

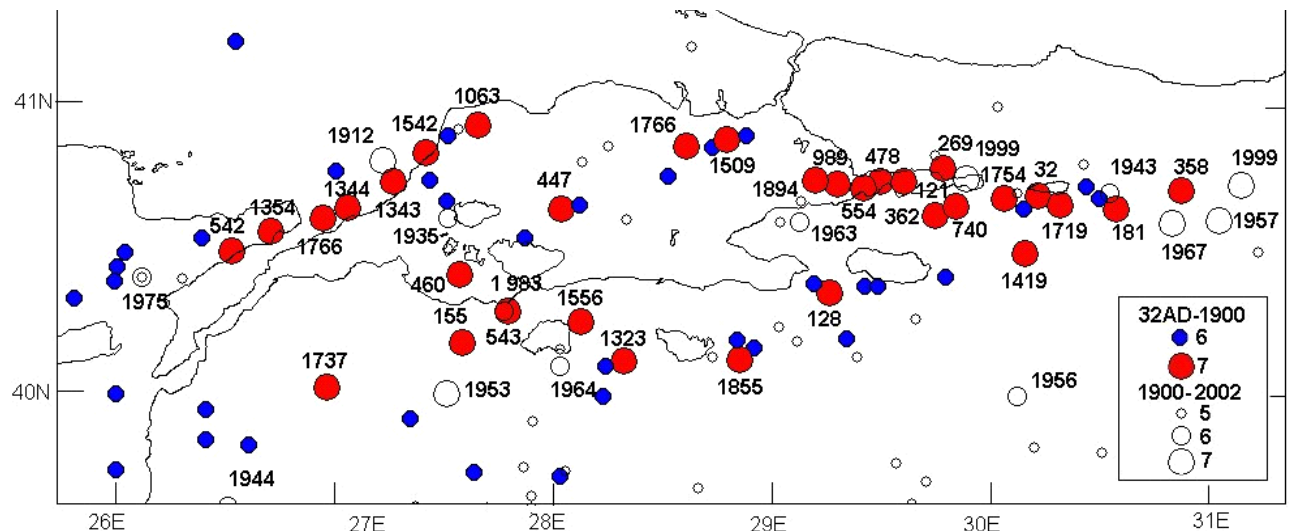
Seizmičko projektiranje uronjenog tunela može se svakako smatrati jednim od najkritičnijih elemenata Projekta Marmaray i to zato što je dotični tunel samo 16 km udaljen od seizmički značajnoga rasjednog sustava.

Minimalni seizmički zahtjevi iskazani za Projekt Marmaray temelje se na proračunskom potresu koji je definiran kao osnovni proračunski potres (DBE). Za ocjenjivanje opasnosti od potresa primjenjivali su se probabilistički i deterministički pristupi.

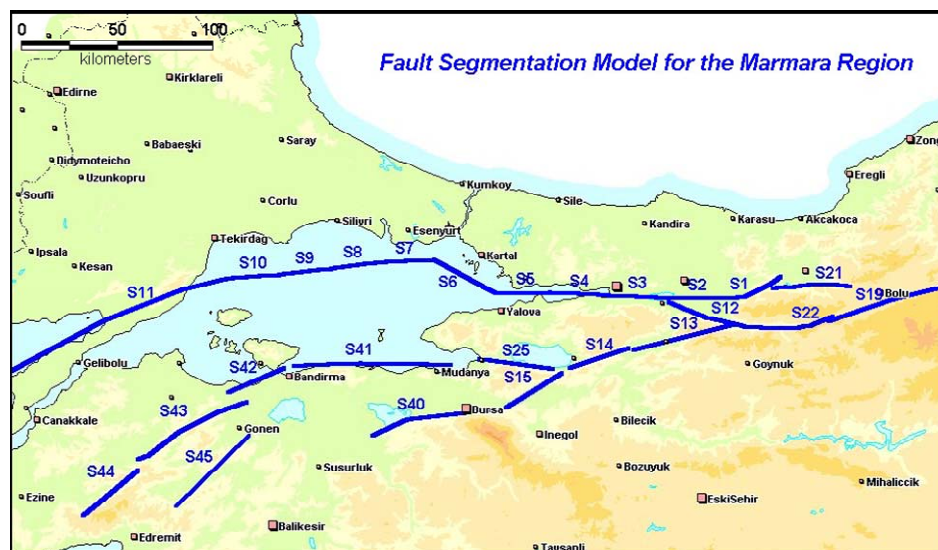
U širem području Mramornog mora registrirani su, u vremenu od 1500. godine do danas, brojni potresi magnitude veće od 7,0 (slika 4.). Nakon detaljne analize rasporeda registriranih potresa i oštećenja uzrokovanih tim potresima, najveći potresi su uneseni u model za segmentiranje rasjeda koji je prikazan na slici 5. Potres trenutne magnitude od 7,5 stupnjeva ( $M_w = 7,5$ ) odabran je kao maksimalni mogući scenarij za ovaj projekt, te se smatra da bi takav potres mogao zadesiti područje u segmentima S5 do S8 duž glavne sjevernoanatolijske rasjedne zone.

Za tunnelske su konstrukcije definirani takvi minimalni zahtjevi da bi se, u slučaju osnovnoga proračunskog potresa (DBE), postiglo sljedeće:

- šteta nastala potresom lako bi se mogla popraviti i ne



Slika 4. Seizmičnost u širem području Mramornog mora, potresi  $M > 7,0$



Slika 5. Model segmentiranja rasjeda u području Mramornog mora

bi dovela do prekida prometa ili ljudskih žrtava

- tunel bi ostao potpuno vodonepropustan
- tunel bi ostao u funkciji nakon potresa, a radnje kontroliranja i korigiranja trase pruge ne bi trajale više od nekoliko dana
- popravak bi se mogao obaviti uz minimalno ometanje prometa.

Kako se na potezu od 470 m duž trase uronjenog tunela nalaze naslage sipkog pijeska, stručnjaci su u toku projektiranja uronjenog tunela

trebali uzeti u obzir i mogućnost pojave likvefakcije isto kao i mogućnost deformacije tla zbog likvefakcije.



Slika 6. Postupak zbijanja injektiranjem u istanbulskom tjesnacu

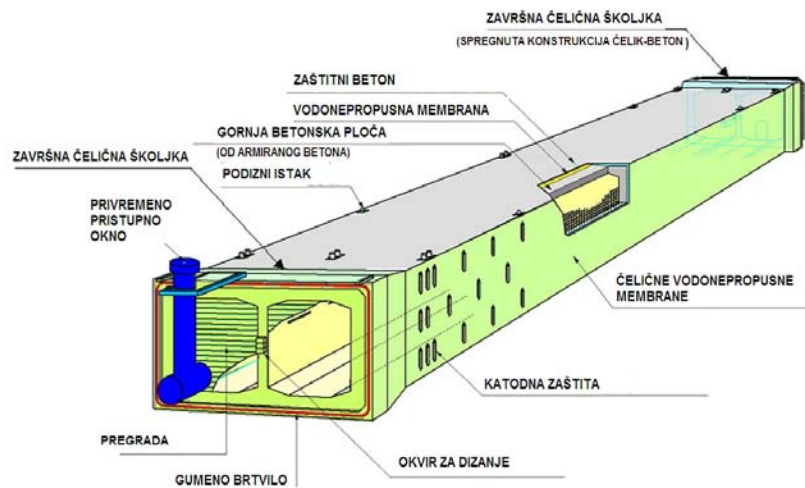
Područje u kojoj bi moglo doći do likvefakcije poboljšano je primjenom postupka zbijanja tla injektiranjem. U okviru tog zadatka u tlo je, sve do razine posteljice tunela, injektirana mreža cementnih stupova, sastavljena od 2.778 stupova s razmakom od 1,7 m između pojedinačnih stupova. Djelotvornost ovog postupka injektiranja provjerena je provedbom statičkih penetracijskih pokusa (CPT) te su tako dobiveni podaci o likvefakcijskom potencijalu nakon radova injektiranja.

**6 Uronjeni tunel**

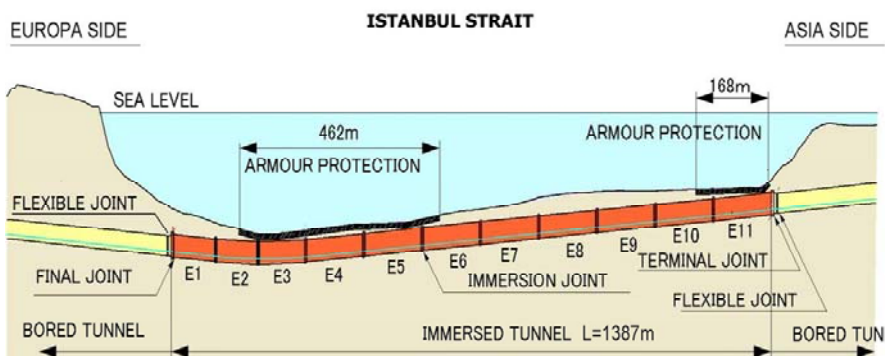
Uronjeni tunel koji se izvodi u okviru Projekta Marmaray za sada je jedini podvodni interkontinentalni tunel na svijetu. Uronjeni je tunel za potrebe izvođenja radova

smjer kretanja željeznice. Dno i strane tunela ojačani su vanjskim vodonepropusnim čeličnim membranama debljine 7 mm. Kao dodatna zaštita služi plastična membrana koja s gornje strane osigurava vodonepropusnost tunela.

Posebna čelična školjkasta konstrukcija izvedena na krajevima svakog elementa obavija završne pregrade i nosi brtvenu spojnicu GINA i njezinu kontaktnu ploču (slika 9.). Elementi uronjenog tunela izrađuju se u dva suha doka pripremljena na lučkom pogonu Tuzla koji se nalazi 40 km istočno od gradilišta tunela. Oba suha doka projektirana su samo za prva dva stadija betoniranja (osnovna ploča i djelomično zidovi), nakon čega se svaki element prevozi do pristaništa, gdje se obavljaju završne faze betoniranja (slika 10.). Tada je element gotov i tegli se do mjesta sidrenja gdje se obavljaju pripreme za konačno postavljanje.



Slika 8. Tipičan element uronjenog tunela



Slika 7. Profil trase tunela u istanbulskom tjesnacu

podijeljen na jedanaest dionica (slika 7.) ili elemenata, pojedinačne duljine od otprilike 135 m, širine 15,3 m i visine 8,6 m, dok težina svakog elementa iznosi 18.000 tona (slika 8.). Tunel je u presjeku pravokutna betonska sandučasta konstrukcija s odvojenim cijevima za svaki

Prvo je postavljen element br. 11 (slika 7.). On se na svakom kraju oslanja na potporne okvire. Sljedeći se elementi postavljaju na vodilice iza već postavljenih elemenata, s tim da se potporni okvir postavlja na vanjski kraj. Potporni okvir omogućuje vrlo precizno vertikalno i horizontalno niveliranje svakog elementa nakon što se geodetskim postupcima odredi gdje dolazi vanjski kraj, i to nakon aktiviranja spojnice.

Prije postavljanja elementa, na dno jarka se kontraktorom polaže posebna porozna temeljna šljunčana podloga. Potporni okviri leže na toj podlozi koja zapravo sprječava nastajanje likvefakcije u području neposredno ispod tunela. Nakon što se postigne

odgovarajući položaj, ispod elementa se kroz otvore koji se nalaze na svakih 8 m injektira posebna injekcijska smjesa. Taj materijal ne ulazi u šljunčani temelj već se očvršćava na kontaktu sa šljunkom i zapravo nosi element. Nakon što injekcijska smjesa očvrstne dizalice se skidaju i element se zatrpava.



Slika 9. Pregrade i brtvilo GINA

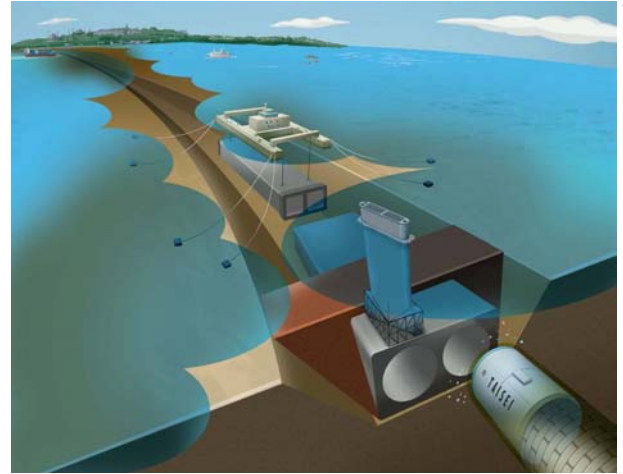
Svaka se spojnica aktivira izvlačenjem poluge dizalice (slika 8.) iz već položenog dijela tunela tako da se poveže s elementom koji se upravo postavlja, nakon čega se ručka dizalice uvlači da bi se pritisnula meka izbočina na brtvilu GINA. Tada se voda crpi iz spojnice da bi se neujednačena sila tlaka vode upotrijebila za potpuno tlačenje brtvila GINA. Tako se u svaku spojnicu može ući radi čišćenja, mogu se skinuti pregrade, te se prostor spojnice može kompletirati u toku napredovanja tunelskih radova u istanbulskom tjesnacu.



Slika 10. Pogon Tuzla za izradu elementa uronjenog tunela

Spojni tuneli na europskoj i azijskoj strani tjesnaca buše se kroz stijensku masu posebnim strojevima za tunelsko bušenje (TBM) i to sve do prijelaznog područja sastavljenog od smjese pijeska i cementa koja je prije ugrađena kontraktorom te koja vodi do kružnih čeličnih ovojnica

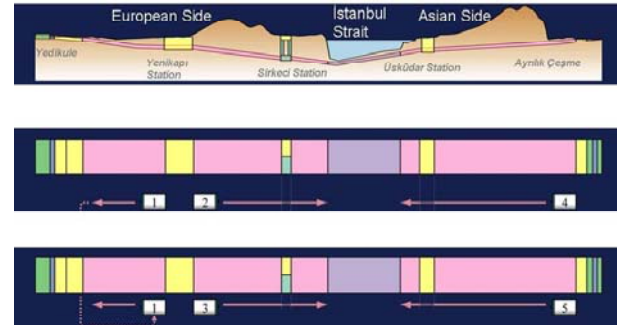
izvedenih na kraju uronjenog tunela. Nakon toga strojevi za tunelsko bušenje napreduju kroz čeličnu ovojnicu i brtve se na kontaktu s uronjenim tunelom te se zatim rastavljaju i uklanjaju (slika 11.).



Slika 11. Prikaz uronjenog i izbušenog tunela

## 7 Bušeni tuneli

Projekt Marmaray ima ukupno 9,8 km dvocijevnih tunela a za njihovo se bušenje rabi pet strojeva za tunelsko bušenje tipa TBM (slika 12.):



Slika 12. Raspored tunela i strojeva za tunelsko bušenje

- Za oba se tunela za iskop u mekom tlu između Yedikulea i Yenikapija rabi jedan TBM stroj s balansiranjem tlaka tla. Promjer stroja je 7,97 m.
- Za iskop tunela u čvrstom stjenkom materijalu rabe se četiri TMB stroja s isplakom. Promjer tih strojeva je 7,89 m (slika 13.).

Za proizvodnju betonskih obloga izgrađen je poseban pogon i proizvodnja obložnih elemenata je u tijeku. Obložni elementi izvedeni su od armiranog betona razreda C50, a debljina im je 300 mm ili 320 mm.

Unutarnji će promjer dovršenih tunela iznositi 7,04 m, a obavit će se i usklađivanje s dimenzijama propisanim u dokumentu UIC506.



Slika 13. Stroj za tunelski iskop s isplakom

Do kraja 2007. godine tunelske su bušilice TBM 4 & 5 iskopale svaka po 1000 m tunela, dok je bušilicom TBM 1 iskopano 100 m tunela. Rad bušilica TMB 2 & 3 još nije počeo jer se u području njihova zahvata obavljaju arheološka istraživanja.

## 8 Povijesno naslijeđe

Istanbul je bio glavni grad triju carstava: otomanskog, bizantskog i istočno-rimskog. Zato ne čudi da su u Sirkeciju za izvođenja okna promjera 25 m arheolozi do sada iskopali 13 m arheoloških nalaza (slika 14.). U



Slika 14. Arheološke iskopine na zapadnom oknu u Sirkeciju

gornjim su slojevima nađeni nalazi iz otomanskog razdoblja. U susjednom nižem sloju nađene su građevine i manji nalazi iz bizantskog razdoblja. U dubljim slojevima nađeni su primjerci arhitekture i nalazi iz starorim-

skog vremena. Arheolozima je trebalo šest mjeseci da iskopaju, prouče i odstrane posljednja 3 m nalaza. Ovaj se sloj odnosi na kolonijalno razdoblje Istanbula.

U tijeku arheoloških iskopanja u Yenikapiju pronađena je antička luka Theodosius. Ova je luka izgrađena u 3. stoljeću pr. Kr. i koristila se sve do 11 stoljeća pr.Kr. U tom je području pronađeno 27 olupina brodova (slika 15.). Ti brodovi potječu iz razdoblja od 7. do 11. stoljeća pr. Kr. Ta su nalazišta propisno dokumentirana i brodovi su prenijeti s prvobitnih lokacija u konzervatorske bazene, sve uz nadzor konzervatorskih stručnjaka.



Slika 15. Olupina broda iz 11. stoljeća pr. Kr.

## 9 Zaključak

Oduvijek je bilo teško graditi u gusto naseljenim urbanim sredinama. Situacija na Projektu Marmaray još je i složenija zbog izuzetno bogatoga povijesnog naslijeđa grada Istanbula.

Projekt Marmaray kasni zbog arheoloških iskopanja i nalaza, međutim to je i velika prilika da Istanbul dozna još više o svojoj bogatoj povijesti.

Iako će Istanbul svoj prometni sustav dobiti nešto kasnije nego što je planirano, odlučeno je da veliku pozornost valja posvetiti njegovu povijesnom i kulturnom naslijeđu, pogotovo u svjetlu činjenice da Istanbul ima status grada svjetske baštine.

Očuvanje kulturnih bogatstava i moderni razvoj ne moraju biti nepomirljive suprotnosti. Ni jedno od njih ne može se žrtvovati za drugo.

## IZVORI

[1] Dokumentacija projekata