

### ارزیابی پایداری تونل انتقال آب ارومیه با مدل سازی عددی سه بعدی با استفاده از روش های اجزاء و تفاضل محدود

#### یادداشت فنی

سهیل شریفی<sup>۱</sup>؛ فریدون خسروی<sup>۲\*</sup>؛ سید رسول سورانی<sup>۳</sup>

۱- کارشناس ارشد ژئوتکنیک؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

۲- دانشیار؛ دانشکده پدافند غیر عامل، دانشگاه امام حسین (ع)

۳- کارشناس ارشد ژئوتکنیک؛ دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

دریافت دست نوشته: ۱۳۹۷/۰۷/۰۶؛ پذیرش دست نوشته: ۱۳۹۸/۰۱/۱۸

شناسه دیجیتال (DOI): 10.22044/TUSE.2019.7499.1349

واژگان کلیدی	چکیده
تونل تونل سازی در آبرفت NATM- TBM جت گروتینگ ادکو	تونل انتقال آب گلاس (کانی سیب) به منظور هدایت آب مازاد رودخانه ی گلاس به حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت نقده و تأمین آب زراعی بخش عمده ای از این اراضی است. در مسیر تونل قسمت آبرفت با طول تقریبی ۱۸۰۰ متر وجود دارد که به لحاظ ژئوتکنیکی دارای شرایط خاصی است. مدل سازی این تونل به روش های NATM و مکانیزه با استفاده از نرم افزارهای FLAC3D و PLAXIS 3D TUNNEL انجام و نتایج با یکدیگر مقایسه شد. نتایج به دست آمده نشان داد که پایداری قسمت آبرفت با استفاده از روش های حفاری NATM و ترکیب با روش های بهسازی، تأمین نمی شود. جهت صحت سنجی، طول کوتاهی از تونل در آبرفت حفاری شد که به علت ناپایداری شدید و خطر ریزش تونل ادامه حفاری در آبرفت متوقف شد. با مدل سازی روش مکانیزه در دو نرم افزار فشار سینه کار برابر ۹ بار به عنوان فشار تعادل محاسبه شد. همچنین در این فشار حداکثر جابه جایی جبهه حفاری در دو نرم افزار ۶ تا ۷ سانتیمتر به دست آمد.

#### ۱- مقدمه

تونل سازی یکی از پیچیده ترین زیرشاخه های مهندسی است که همواره بخش مهمی از تحقیقات این حوزه را به خود اختصاص داده است. انتخاب نوع روش تونل سازی بیش از هر عامل متأثر از جنس زمین است.

ساخت تونل های عمیق در خاک های ریزشی هنوز یکی از معضلات چالش برانگیز مهندسی عمران به حساب می آید. یکی از نگرانی های مهم این حوزه پایداری و ایمنی تونل است. در این شرایط تونل سازی به روش کند و پوش از روش های مورد توجه است. اخیراً تونل سازی به روش اتریشی (NATM) به طور گسترده ای مورد توجه قرار گرفته است.

میوا و اساکاوارا در سال ۲۰۰۵ به منظور ساخت تونل قطارهای تندرو زیر یکی از بزرگراه های ملی، چهار روش را مورد بحث و بررسی قرار دادند که در نهایت روش NATM با لوله های تزریق فورپولینگ به عنوان روش نهایی برگزیده و انتخاب شد و علاوه بر تأمین پایداری، تغییر مکان های تونل کنترل گردید (Miwa & Ogasawara, 2005). اوکه و همکاران در سال ۲۰۱۴ با تحلیل فنی و ساختاری گزارش ها به بررسی اثر چتر قوسی (Umbrella Arch) با دسته بندی آن به سه روش شمع های اس، فورپولینگ و تزریق پرداخته اند (Oke, et al., 2014). گزارش های چندین مقاله مانند نومورا و دیگران در سال ۲۰۱۱ از اجرای موفقیت آمیز

\* نویسنده مسئول - تهران؛ اتوبان شهید بابایی؛ بعد از پل لشگرک؛ دانشگاه جامع امام حسین (ع)؛ دانشکده پدافند غیرعامل؛ شماره ی تلفن:

۰۵۶۹۱۰۷۷۱-۰۲۱؛ رایانامه: ferydoonkhosravi@yahoo.com

کردن دوگانه» (*Twin Side Wall Drift*) تقسیم می‌شود (*Karakuş, 2004*) و (*Kolymbas, 2005*)

## ۲-۲- حفاری و بهسازی در تونل

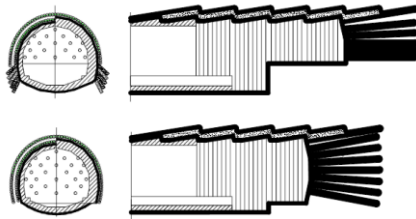
یکی از روش‌های نسبتاً نوین تونل‌سازی، ترکیب روش‌های بهسازی با روش‌های حفر تونل است که می‌توان روش جدید ادکو (*ADECO*) را نمونه‌ای از این ترکیب دانست. بهسازی تونل با روش‌های مختلفی انجام می‌شود که از آن جمله می‌توان به استفاده از جت گروتینگ، فورپلینگ، تزریق و نیلینگ فایبرگلاس اشاره کرد (*Lunardi, 2008*).

بر این اساس روش‌های معمول طراحی را با توجه به توالی ساخت می‌توان به دو دسته اصلی تقسیم کرد. همان‌طور که در شکل ۱، نشان داده شده است (*Herrenknecht & B ppler, 2003*).

الف- پیشانی کار تقسیم‌شده (به‌عنوان مثال، *Ceppi, et al., 1989*).

ب- پیشانی کامل (به‌عنوان مثال، *Bertoli, et al., 1991*).

در هر دو حالت، نصب المان بهسازی در جهت افقی انجام می‌گیرد و با پوششی چتر مانند، خاک را به‌منظور حفاری پوشش می‌دهد.



شکل ۱- توالی ساخت در تونل‌های جت گروت شده (*Herrenknecht & B ppler, 2003*)

## ۲-۳- روش مکانیزه

جنبه مهم حفاری تونل با استفاده از *TBM*‌های سپری در آبرفت محاسبه فشار سینه کار به‌منظور پایداری هنگام حفاری و تخمین نیروی پیشران دستگاه است. اکثر نتایج تحلیلی بر مبنای روش‌های تعادل حدی (*Anagnostou & Kovri, 1994*)، (*Carranza Torres, 2004*) و (*Broere, 2001*) و روش‌های آنالیز حدی (*Chambon & Cort , 1994*)، (*Soubra, 2000*) و (*Soubra, 2002*) هستند.

ترکیب تونل‌سازی با روش *NATM* و بهسازی خاک قبل از اجرای تونل با روش‌های اختلاط سطحی و عمیق در خاک‌های سست با سربار زیاد، حکایت دارد (*Nonomura, et al., 2011*). کیشیدا و دیگران در سال ۲۰۱۶ با مدل‌سازی ۳ بعدی روش ترکیبی تونل‌سازی و بهسازی خاک، به کمک مدل‌سازی آزمایشگاهی و عددی، به بررسی رفتار مکانیکی آن طی حفاری پرداختند و نتیجه گرفتند که زمین بهسازی شده مانند یک تیر عمل می‌کند و تأثیر ناحیه بهسازی شده را به‌طور فزاینده‌ای افزایش می‌دهند (*Kishida, et al., 2016*). در کنار روش تونل‌سازی اتریسی استفاده از روش‌های مکانیزه هم در این شرایط توصیه شده است. در حفر مکانیزه که اصطلاحاً با ماشین حفاری تونل (*TBM*) انجام می‌شود شناخت دقیق مشخصات خاک می‌تواند از مشکلات آتی نظیر ریزش خاک، مشکلات ناشی از آب‌های زیرزمینی، توقف دستگاه حفاری و غیر افتادن آن و مشکلات مربوط به ایمنی، تا حد زیادی بکاهد. در اغلب موارد این اندازه‌گیری‌ها هزینه‌های مربوط به دستگاه را افزایش می‌دهد اما باعث کاهش در زمان و هزینه تمام شده پروژه خواهند شد.

## ۲-۲- تونل‌سازی در خاک آبرفتی

روش‌های تونل‌سازی در خاک به‌خصوص خاک‌های سست دارای ملاحظات ویژه‌ای است. یکی از روش‌های پرکاربرد روش تونل‌سازی اتریسی است که بر اساس بازگشایی جبهه حفاری عمدتاً به دو زیرشاخه تمام‌مقطع و حفاری بخشی (باز کردن از دیواره‌ها) تقسیم می‌شود. با توجه به شرایط خاص زمین‌شناسی و ضعیف بودن پارامترهای مقاومتی خاک در آبرفت، از حفاری‌های تمام مقطع در این‌گونه خاک‌ها نمی‌توان استفاده کرد و می‌بایست جبهه کار به چند مقطع تقسیم و سپس حفاری انجام شود و یا قبل از حفاری، جبهه و جداره تونل با روش‌های مختلف بهسازی شود. در ادامه روش‌های تونل‌سازی مورد استفاده در خاک‌های آبرفتی مختصراً توضیح داده شده است.

## ۲-۱- باز کردن از دیواره‌ها (*Side wall drift*)

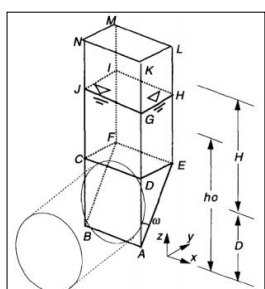
در این روش حفاری یا به‌اصطلاح باز کردن مقطع حفاری از دیواره‌ها آغاز می‌شود. این روش خود به دو نوع «روش باز کردن منفرد» (*Single Side Wall Drift*) و «روش باز

روش‌های تحلیلی حل مسئله از طریق روش‌های تعادل حدی کلی، با در نظر گرفتن خاک به‌عنوان یک جسم صلب (حل مسئله توسط معادلات تعادل کلی خاک) صورت می‌گیرد. اتکینسون و پاتز در سال ۱۹۷۷ فشار نگهداری حداقل در محیط‌های با چسبندگی پائین و بدون حضور آب زیرزمینی را مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها دو حالت حدی متفاوت (۱)  $q_s > 0$  و  $\gamma = 0$  و (۲)  $q_s = 0$  و  $\gamma > 0$  را در نظر گرفته و برای مورد دوم دو معادله برای کران پائین ارائه نمودند. برای حالتی که  $c > 0$  و  $\phi > 0$  باشد با انجام آنالیز حدی پلاستیک تحت شرایط کرنش صفحه‌ای، حداقل فشار نگهداری را از رابطه (۱)، به دست می‌آید و  $K_p$  از رابطه (۲) به دست می‌آید (Atkinson & Potts, 1977).

$$S_{min} = \frac{2K_p \gamma R}{K_p^2 - 1} \quad (1)$$

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (2)$$

ازجمله محققان دیگر که بر روی تعیین فشار نگهداری سینه کار پژوهش کرده‌اند آناگوستا و کواری بوده‌اند. این روش به دلیل ایجاد تمایز بین فشار مؤثر وارد بر سینه‌کار و فشار هیدرواستاتیک داخل چمبر در حفاری با استفاده از *EPB*، روش مناسبی نسبت به روش‌های دیگر است. در این روش برای پایداری سینه‌کار با فرض تئوری لغزش و مدل سه‌بعدی سیلو و گوه هورن و قوس فشار ترازقی در شرایط زهکشی شده، رابطه‌ی (۱)، ارائه شده که ضرایب آن با بهره‌گیری از مدل‌سازی عددی در قالب گراف‌هایی به دست می‌آیند (Horn, 1961). شکل ۲ مدل سیلو و گوه‌ی مدل Horn را نشان می‌دهد.



شکل ۲- مدل سیلو و گوه‌ی مدل Horn (Anagnostou & Kovari, 1997)

برای محاسبه فشار سینه‌کار از رابطه (۳) استفاده

همچنین مطالعات محاسباتی به‌منظور تعیین فشار جبهه تونل به‌وسیله‌ی بارنت و کمبو در سال ۱۹۹۸ و ابورسوخ و ویادیس در سال ۱۹۹۹ و با رویکرد دوبعدی انجام شده است (Abu-Farsakh & Bernat & Cambou, 1998). در سال‌های اخیر به‌منظور ارزیابی رفتار تنش-کرنش خاک مدل‌های سه‌بعدی توسط دیاس و دیگران در سال ۲۰۰۰، ملیس و دیگران در سال ۲۰۰۲، چاکری و دیگران در سال ۲۰۱۱ و حسن پور و دیگران در سال ۲۰۱۲ توسعه یافته است (Melis, et al., (Dias, et al., 2000), (Chakeri, et al., 2011), (2002) Hasanpour, et al., (2012). با این وجود پژوهش بر روی پایداری جبهه تونل و فشار مورد نیاز در شرایط دشوار شامل سطح آب زیرزمینی بالا و سربار زیاد بر روی تشکیلات آبرفتی با مشخصات مکانیکی ضعیف، کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. علاوه بر این اکثر روش‌های تئوریک برای چنین شرایطی به‌طور کامل پذیرفته نیست و لزوم مدل‌سازی سه‌بعدی را آشکارتر می‌کند.

در شرایطی که مشخصات ژئوتکنیکی خاک، ضعیف باشد استفاده از سپرهای تعادلی زمین (*EPB*) یکی از گزینه‌های مناسب جهت پایداری خاک است. برخلاف سایر سپرها، پایداری سینه‌کار، در سپر تعادلی فشار زمین بدون واسطه نگهداری ثانویه (هوای فشرده، محلول، صفحات مکانیکی) انجام می‌گیرد. تعیین فشار نگهداری سینه‌کار در ادامه این قسمت آورده شده است. مواد حفرشده به‌عنوان واسطه نگهداری به کار گرفته می‌شوند. در صورتی که فشار نگهداری مواد زمین در داخل اتاقک حفاری از حد تعادل بالاتر رود محلول نگهداری وسیله یک نقاله ماریچی یا نوار زنجیری منتقل می‌شود.

## ۲-۴- تعیین فشار نگهداری سینه‌کار

تعیین دقیق میزان فشار جهت جلوگیری از ناپایداری سینه‌کار به فاکتورهای مختلفی از قبیل میزان چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، میزان نفوذپذیری زمین، نوع دستگاه *TBM*، سرعت پیشروی، وزن مخصوص خاک، قطر تونل، میزان روباره و سطح ایستایی آب بستگی دارد (Guglielmetti et al., 2008).

روش‌های مختلف تجربی، عددی و تحلیلی جهت تعیین فشار نگهداری سینه کار استفاده شده است. در

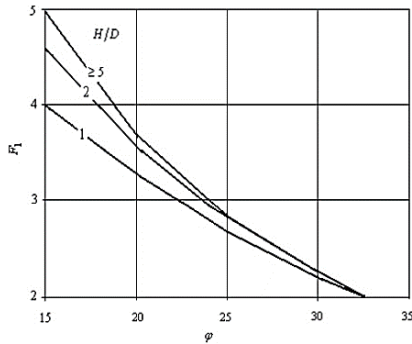
ارزیابی پایداری تونل انتقال آب ارومیه با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با استفاده از روش‌های اجزاء و تفاضل محدود: ص ۱۰۵-۱۲۰

(Anagnostou & Kovari, 1996)

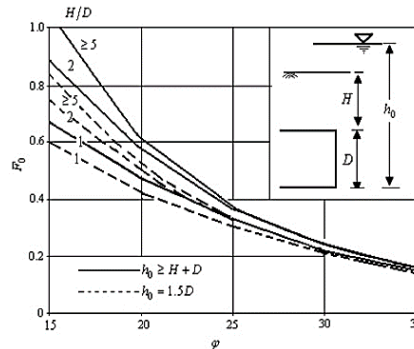
$$s' = f(D, H, h_f, h_0, c, \varphi, \gamma', \gamma_d) \quad (3)$$

$$s' = F_0 \cdot \gamma' \cdot D - F_1 \cdot c \quad (4)$$

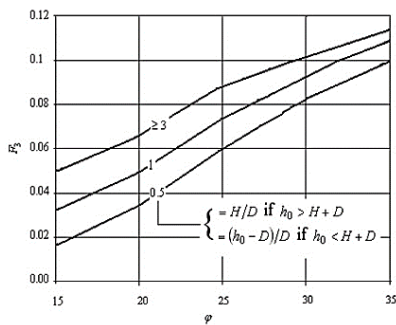
می‌شود.  $F_0, F_1, F_2$  و  $F_3$  از طریق نمودارهای ارائه شده در شکل ۳، تعیین می‌شوند. همچنین حداقل فشار نگهداری سینه‌کار در خاک خشک از رابطه (۴) به دست می‌آید



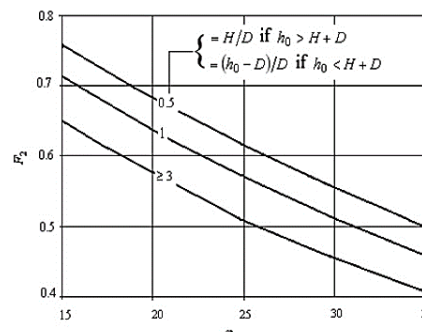
ب- نمودار محاسبه  $F_1$



الف- نمودار محاسبه  $F_0$



ت- نمودار محاسبه  $F_3$



ب- نمودار محاسبه  $F_2$

شکل ۳- نمودارهای محاسبه ضرایب بدون بعد  $F_0, F_1, F_2$  و  $F_3$  (Anagnostou & Kovari, 1997)

خود از واحدهای آبرفتی و توده‌های نفوذی با ترتیب گرانبی و گرانودیوریت عبور می‌کند. براساس اطلاعات به‌دست‌آمده از پروفیل‌های زمین‌شناسی مسیر تونل، فاصله مغار تا مرز آبرفت در حدود ۶۳۰ متر و طول آبرفت به‌صورت تقریبی ۱۸۰۰ متر است. با وجود لایه‌های آبخوان تحت فشار، مقدار فشار آن نسبت به سقف تونل در برخی مقاطع تونل معادل ۵۷ متر ستون آب است. در جدول ۱ پارامترهای ژئوتکنیکی حاصله از آزمایش‌های صحرایی شامل بارگذاری صفحه و برش برجا و همچنین آزمایش‌های آزمایشگاهی، آورده شده است. در جدول ۱، ترکیبی از  $com1$ ،  $CH$  و  $com2$  شامل  $CL$  و  $GC-GM$ ، ترکیبی از  $GC$ ،  $CL$  و  $MH$  که تا انتهای گمانه  $KST-19$  و  $KST-20$ ، همچنین  $Com4$  به‌اندازه ۲۰ متر پایین‌تر از کف گمانه است.

### ۳- مشخصات زمین‌شناسی پروژه

تونل انتقال آب گلاس (کانی سیب) به‌منظور هدایت آب مازاد رودخانه‌ی گلاس به حوضه آبریز دریاچه ارومیه و دشت نرده برای تأمین آب زراعی بخش عمده‌ای از این اراضی است. موقعیت این تونل در شکل ۴ مشخص شده است. بخش واقع‌شده در آبرفت این تونل، به علت وجود سطح آب زیرزمینی بالا، مشخصات مقاومتی پایین خاک و زیاد بودن مقدار سربار یکی از چالشی‌ترین پروژه‌های تونل‌سازی در کشور بوده که طول تونل ۳۵۶۶۰ متر با مقطع دایره‌ای با قطر تمام‌شده ۶٫۵ متر است. تونل گلاس شامل تونل اصلی، تونل دسترسی و مغار زیرزمینی در محل تقاطع تونل اصلی، دسترسی و شفت است. تونل دسترسی در مسیر



شکل ۴- مسیر تونل مشخص شده بر روی نقشه‌ی ماهواره‌ای

جدول ۱- پارامترهای حاصل از آزمایش‌های آزمایشگاهی و برجا (Imensazan, 2017)

$\nu$	$\phi$ (deg)	$c$ (Kpa)	$E$ (Mpa)	$\gamma_{sat}$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	$\gamma_d$ ( $\frac{kg}{m^3}$ )	نوع زمین	تا	شروع تراز از
۰/۳۵	۲۳	۱۲	۸/۵	۱۶۰۰	۱۳۰۰	Cl-MI	۹/۴	۰
تراز آب زیرزمینی								
۰/۳۵	۲۱	۳۰	۵/۲	۱۹۴۰	۱۵۶۰	Cl	۱۵/۱	۹/۴
۰/۳	۲۲	۱۱	۱۵	۲۰۰۰	۱۸۵۰	GC	۱۸/۹	۱۵/۱
۰/۳۵	۲۲	۳۰	۸	۲۰۰۰	۱۶۰۰	CL	۲۰	۱۸/۹
۰/۳۵	۲۲	۳۰	۸	۲۰۰۰	۱۶۰۰	CL	۲۵/۱	۲۰
۰/۳	۱۹	۳۱	۴	۱۹۰۰	۱۵۰۰	ML	۲۹/۱	۲۵/۱
۰/۳۵	۲۰	۳۰	۵	۱۹۵۰	۱۵۵۰	CL	۳۴/۱	۲۹/۱
۰/۴	۲۳	۳۱	۷	۱۷۵۰	۱۳۶۰	CH	۵۷	۳۴/۱
۰/۳۵	۲۳	۲۵	۵/۸	۲۰۰۰	۱۷۰۰	CL	۶۹	۵۷
۰/۴	۲۱	۲۸	۹/۵	۱۸۵۰	۱۵۰۰	com1	۸۹/۹	۶۹
۰/۳۵	۲۲	۲۱	۸	۱۹۰۰	۱۶۵۰	com2	۹۸/۶	۸۹/۹
۰/۳۴	۲۲	۲۳	۱۰	۱۹۶۰	۱۶۵۰	com3	۱۲۰	۹۸/۶
۰/۳	۲۵	۳۰	۱۵	۲۰۰۰	۱۷۰۰	com4	۱۴۱/۱	۱۲۰

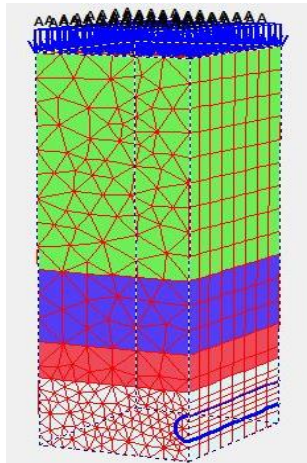
#### ۴- مدل‌سازی عددی

در این پژوهش مدل‌سازی برای دو روش حفاری سنتی و مکانیزه انجام شده و نتایج به‌دست‌آمده برای روش مکانیزه با روش تحلیلی مقایسه شده است. تونل فوق با استفاده از نرم‌افزارهای *FLAC3D* و *PLAXIS3D TUNNEL* مدل‌سازی شده که مراحل آن در این قسمت آورده شده است. نرم‌افزار *PLAXIS3D TUNNEL* یک نرم‌افزار المان محدود سه‌بعدی توسعه داده شده است که می‌تواند ورودی‌های گرافیکی ساده را به یک نسل سریع از مدل المان‌های محدود پیچیده تبدیل کند. نرم‌افزار *FLAC3D*

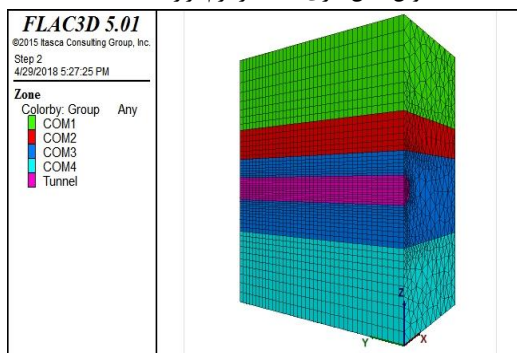
یک نرم‌افزار تفاضل محدود بوده که توانایی مدل‌سازی خاک و سنگ، سیستم‌های نگهداری شاتکریت، قاب و ... را در شرایط استاتیکی و دینامیکی دارد. با توجه به شرایط خاص پروژه و قرارگیری تونل در عمق بیش از ۱۰۰ متر در بخش آبرفتی (ضعیف بودن خصوصیات ژئوتکنیکی و آبدار بودن لایه‌ها)، این پروژه یکی از پیچیده‌ترین و سخت‌ترین پروژه‌ها در کشور است که باید حتی‌الامکان نتایج به‌دست‌آمده با یک نرم‌افزار با نرم‌افزاری دیگر مقایسه و سپس در مورد روش پایدارسازی و پارامترهای طراحی تصمیم‌گیری می‌شد. در مدل‌سازی برای روش سنتی تونل به‌صورت تمام

ارزیابی پایداری تونل انتقال آب ارومیه با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با استفاده از روش‌های اجزاء و تفاضل محدود: ص ۱۰۵-۱۲۰

دچار گسیختگی شده است. در این حالت منحنی تنش کرنش تمام نقاط خاک یکسان و به اصطلاح به شکل خمیرهای گسیخته می‌شود و رفتاری مشابه رفتار خاک‌های سست گسیخته شده دارد.

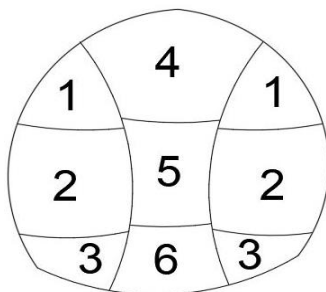


الف- تونل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار PLAXIS3D



ب- تونل مدل‌سازی شده در نرم‌افزار FLAC3D

شکل ۵- مدل‌سازی تونل در دو نرم‌افزار مختلف



شکل ۶- توالی حفاری مقطع تونل در حالت بازگشایی جداره‌ها به روش دوگانه

مقطع مدل گردید. همچنین برای کاهش زمان محاسبات در نرم‌افزار FLAC3D بخشی از روباره تونل، از مدل حذف شد و بار آن به مدل در المان مرزی اعمال شد. ابعاد مدل ساخته‌شده در جهت  $x$ ،  $y$  و  $z$  به ترتیب ۳۸٫۵، ۶۰ و ۷۲ متر است. در مدل‌سازی عددی قطر تونل ۶٫۶ متر لحاظ شده است. سطح آب استاتیک در آبخوان آزاد در عمق ۱۳٫۶ متر و در آبخوان دوم، ۴۳ متر از سطح زمین برداشت شد. به عبارت دیگر این لایه به علت تحت فشار بودن، آب را تا ۵۷ متر نسبت به سقف تونل (عمق سقف تونل ۱۰۰ متر) بالا می‌آید. لذا در محاسبات این ارتفاع از آب نسبت به سقف تونل در مدل در نظر گرفته شده است.

با توجه به اطلاعات در دسترس و مقبولیت بیشتر نسبت به سایر مدل‌های موجود، از مدل رفتاری موهر-کولمب به عنوان مدل رفتاری مناسب برای محیط تونل استفاده شد که در مکانیک خاک و سنگ برای حالت پلاستیک مدل مرسوم است. در شکل ۵ تصویری از هندسه‌ی تونل به همراه لایه‌بندی در نرم‌افزارهای PLAXIS3D و FLAC3D آورده شده است. نتایج مدل‌سازی‌های تونل‌سازی به روش اتریشی و مکانیزه در بخش ۴-۲ به تفصیل آورده شده است.

#### ۴-۱- نتایج مدل‌سازی تونل به روش NATM

با توجه به ناپایداری دیواره و جبهه کار، روش باز کردن از جداره‌ها مدل‌سازی شد. در نرم‌افزار PLAXIS3D در روش باز کردن دوگانه از جداره‌ها ابتدا حفاری از گوشه‌های مقطع تونل و در مجاورت جداره‌ها انجام شد. این مراحل از قسمت بالا (*top*) آغاز می‌شود، به ترتیب در وسط و کف تونل هم ادامه می‌یابد. آنگاه همین روال برای قسمت میانی باقیمانده نیز انجام می‌شود.

در مرحله اول حفاری با عمق ۱ متر انجام شد و سپس لتیس‌گذاری در فاز دوم مدل شد. در فاز ۶ که حفاری کناره‌ها در ابتدای ۱ متر دوم پیشروی است، خاک دچار گسیختگی شده و محاسبات در این فاز متوقف می‌شود. توالی حفاری در این بخش مطابق شکل ۶ در نظر گرفته شد.

نمودار تنش کرنش جداره در این حالت در شکل ۷-الف، آورده شده است. مطابق این نمودار منحنی، هنوز افقی نشده اما کرنش‌ها به سمت بالا سیر می‌کنند و بنابراین خاک

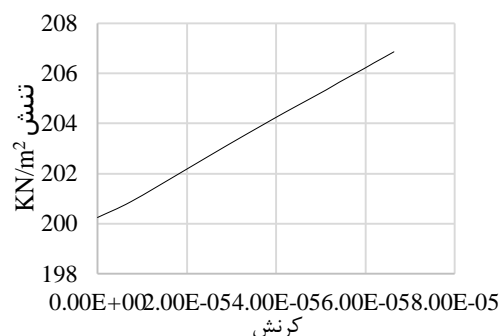
با این پژوهش ضریب چسبندگی بیش از ۲۰ برابر شده است. البته نمونه‌گیری‌ها همگی بر روی ستون‌های استوانه‌ای بوده است و بدیهی است که خاک اطراف تأثیر کمتری دارد؛ بنابراین در این پروژه زاویه اصطکاک پس از بهسازی ۴۰ درجه و چسبندگی برابر ۴۰ کیلو پاسکال در نظر گرفته شد همچنین مدول الاستیسیته برابر ۵۰۰۰۰ کیلونیوتن بر مترمربع در نظر گرفته شد.

نمودار ترسیمی شکل ۷ مربوط به تنش کرنش نقطه‌ی ۲۸ بعد از حفاری یک‌سوم بالا و همین نقطه در مقطع بهسازی نشده، است. در این حالت خاک‌برداری در همان فاز اول با تغییر مکان‌های زیادی و در نتیجه توقف محاسبات همراه است. نمودار تنش کرنش جداره برای این حالت مطابق شکل ۷-ب است.

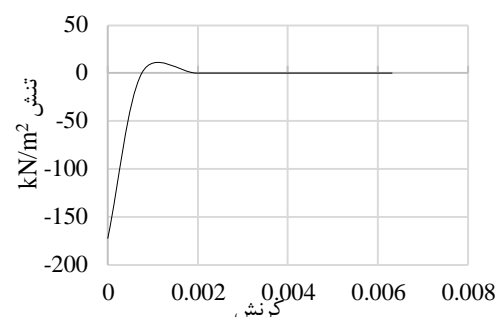
در این حالت رفتار خاک به حالت نرم شوندگی تمایل دارد و نقطه گسیختگی مشخص است. این رفتار در خاک‌های با پارامترهای مقاومتی بالا مشاهده می‌شود که این خود نشان‌دهنده اثر جت گروتینگ بر خاک اطراف جبهه کار است.

صفر شدن مقدار تنش نشان‌دهنده این است که خاک مقاومت برشی خود را از دست داده و به اصطلاح روان شده است. نکته جالب توجه این است که در حفاری به روش بالا به پایین در این تونل میزان پیشروی کمتر از روش باز کردن دوگانه است که به نظر می‌رسد دلیل آن بزرگ‌تر بودن مقطع حفاری در مرحله اول در روش بالا به پایین نسبت به روش باز کردن دوگانه است. با تعریف یک کلاستر جدید حول جداره‌ی تونل مشخصات خاک اطراف تونل به فاصله‌ی ۱ متر بهبود داده شد. در این حالت روش *NATM* با حفاری بالا به پایین مدل‌سازی شد. توالی حفاری در روش بالا به پایین در شکل ۸ به این صورت است که ابتدا یک‌سوم بالا حفاری می‌شود، بعد از لیس‌گذاری و پایدارسازی، یک‌سوم میانی و به همین ترتیب یک‌سوم زیرین حفاری می‌شود.

در مدل‌سازی بعدی از روش باز کردن دوگانه برای خاک بهسازی شده با جت گروتینگ استفاده شد که در این حالت مشخصات خاک اطراف برابر مشخصات خاک بهسازی شده در مدل‌سازی قبلی در نظر گرفته شد. در این حالت که انتظار پایداری بیشتری نسبت به حالات قبل می‌رفت، مطابق پیش‌بینی تا ۷ فاز تونل‌سازی با توالی در نظر



الف- نمودار تنش کرنش جداره تونل در خاک جت گروت شده برای روش باز کردن دوگانه



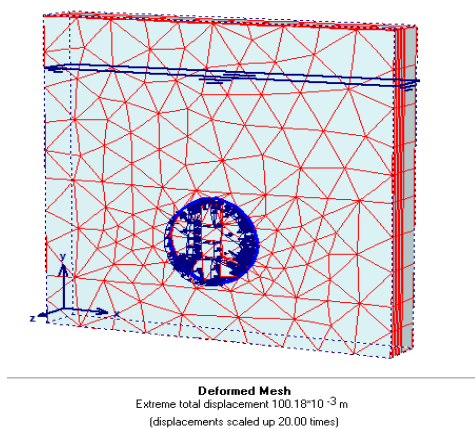
ب- نمودار تنش کرنش جداره تونل در خاک جت گروت شده برای روش بالا به پایین

شکل ۷- نمودار تنش کرنش جداره تونل در خاک جت گروت شده برای روش باز کردن از جداره‌ها

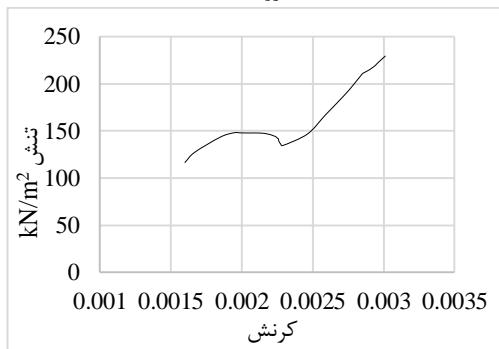
در مدل‌سازی بعدی المان‌های جت گروتینگ به‌عنوان چتر در تاج و بدنه تونل به کار گرفته شد تا با استفاده از این المان‌ها مشخصات خاک بهبود یابد. با توجه به اینکه نرم‌افزار *PLAXIS3D* قابلیت افزودن المان پایدارکننده خارجی را ندارد از مقالات ارائه‌شده در زمینه بهبود مشخصات خاک با استفاده از جت گروتینگ استفاده شده است. به‌عنوان مثال نیکبختان و اوسانلو در سال ۲۰۰۹ به بررسی مقاومت برشی شامل ضریب چسبندگی و زاویه اصطکاک خاک پس از بهسازی با جت گروتینگ پرداخته‌اند (*Nikbakhtan & Osanloo, 2009*). محل پروژه نزدیک شهر میانه بوده که به لحاظ جغرافیایی به پروژه‌ی حاضر نزدیک است. همچنین نوع خاک در حدود ۳ متر بالا درشت (*GM*) و لایه‌های پایین‌تر خاک ریزدانه (*CL, CH, ML*) است که تا حدود زیادی شبیه خاک پروژه تونل گلاس به‌نظر می‌رسد. مطابق

۲ متر است درحالی‌که به‌اندازه ۰/۵ متر حفاری صورت گرفته است بنابراین براساس این نوع روش حفاری با سیستم نگهداری نصب‌شده، سینه‌کار پایدار نبوده و دچار ریزش و شکست می‌شود.

شکل ۱۱-ب، شکست المان‌های کابل را نشان می‌دهد براساس این شکل نیروهای وارده بر این المان‌ها از ظرفیت تحمل آنها بیشتر بوده و در نتیجه بیش از یک‌سوم طول آنها تسلیم شده است که باعث شده جابه‌جایی‌های زیادی در سینه‌کار به وجود آید.



الف- تغییر مکان‌های حاصله در پایان فاز هفتم خاک‌برداری به روش باز کردن از جداره‌ها در تونل بهسازی شده به‌وسیله جت گروتینگ

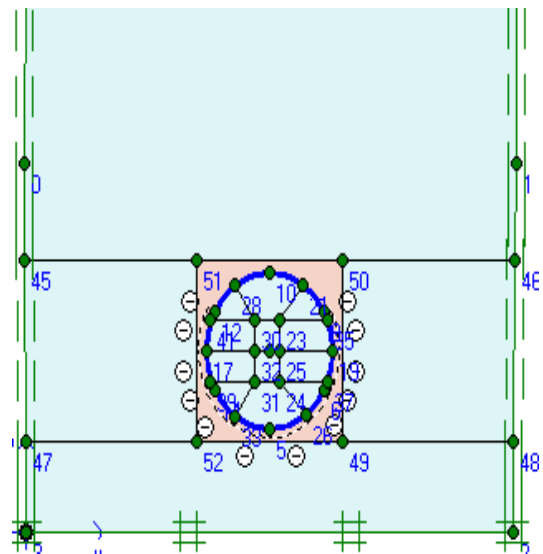


ب- نمودار تنش کرنش جداره تونل حفاری‌شده به روش باز کردن دوگانه در خاک جت گروت شده

شکل ۹- وضعیت تغییر مکان‌ها و تنش کرنش جداره‌ها در تونل بهسازی شده به‌وسیله جت گروتینگ

با توجه به مدل‌سازی‌های صورت گرفته در بخش آبرفت، روش سنتی قابل اجرا انتخاب‌شده در این بخش (جت گروت به ضخامت ۱ متر به‌صورت ۳۶۰ درجه با طول

گرفته‌شده در شکل ۶ انجام شد که در فاز هفتم یعنی حفاری در گام سوم که ۱/۵ متر از صفحه جلویی تونل فاصله داشت (هر گام ۰/۵ متر در نظر گرفته شد)، توده‌ی خاک دچار گسیختگی شده و مطابق شکل ۹- الف دارای تغییر شکلی ۱۰ سانتیمتری شد. همچنین منحنی تنش-کرنش جداره تونل در نقطه متناظر با نقطه ۲۸ شکل ۸ در این حالت در شکل ۹- ب آورده شده است.



شکل ۸- مقطع تونل به همراه خاک بهسازی شده اطراف با روش جت گروتینگ

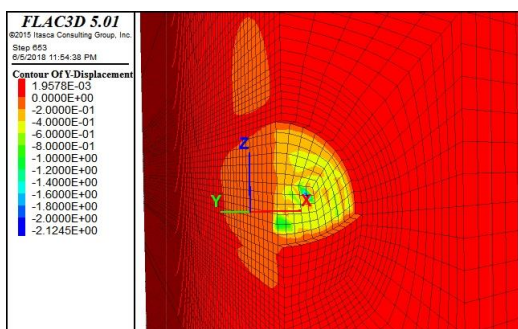
شکل ۱۰- الف، مدل‌سازی جت گروت در دیواره به همراه روش NATM (بالا به پایین) را در نرم‌افزار *FLAC3D* نشان می‌دهد. ابتدا قبل از حفاری خصوصیات اطراف تونل به‌اندازه یک متر به خصوصیات جت گروت تغییر داده شد سپس در داخل سینه‌کار المان‌های فایبرگلاس تزریق شد و در نهایت تونل به‌اندازه نیم متر در قسمت بالا حفاری می‌شود و سیستم نگهداری شاتکریت به همراه لیتیس اعمال می‌گردد. شکل ۱۰- ب، سیستم نگهداری شاتکریت معادل شده و المان‌های تزریقی فایبرگلاس در سینه‌کار را نشان می‌دهد. پس از حفاری ۰/۵ متر در قسمت بالا مدل اجرا شد و نتایج مورد بررسی قرار گرفت.

شکل ۱۱- الف، کنتور جابه‌جایی در راستای محور تونل را نشان می‌دهد همان‌طور که از این شکل دیده می‌شود جابه‌جایی ایجادشده در راستای محور تونل بیش از

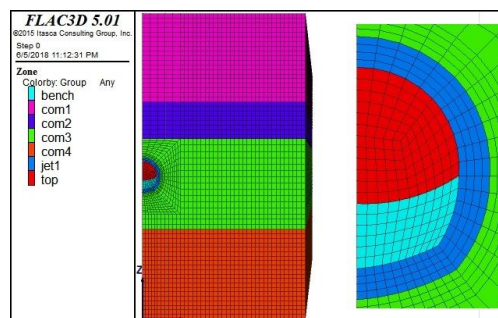


جداره و جبهه تونل، حفاری را با دشواری‌های زیادی روبه‌رو کرد و عملاً ادامه کار را در این قسمت غیرممکن ساخت؛ بنابراین پیشروی تونل در آبرفت متوقف‌شده و دهانه بازگشایی‌شده با مش و شات و مصالح پایدارکننده سنگین بسته شد.

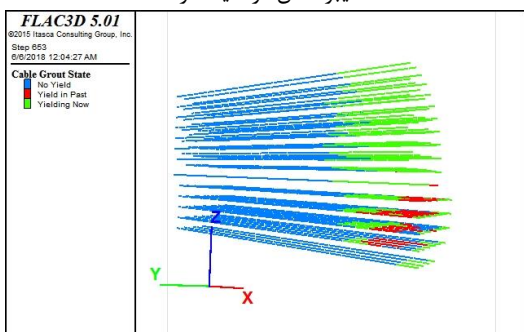
۱۲ متر، سیستم ترکیبی شاتکریت و لتیس همراه با تزریق فایبرگلاس در سینه‌کار با فاصله ۰/۵ متری با طول ۱۲ متر) چه به‌صورت تمام مقطع و چه به‌صورت چندمرحله‌ای پایدار نیست و جابه‌جایی‌های ایجادشده در سینه‌کار تونل، بسیار بیشتر از حد مجاز هستند و در نهایت مدل‌ها به تعادل نرسیدند و سینه‌کار دچار ریزش شد.



الف- سیستم نگهداری شاتکریت معادل شده و المان‌های تزریقی فایبرگلاس در سینه‌کار

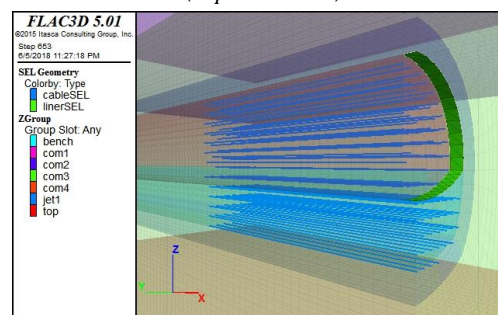


الف- جت گروت در دیواره به همراه روش NATM (Top and bench)



ب- شکست المان‌های کابل به‌کاررفته در سینه‌کار

شکل ۱۱- مدل‌سازی سیستم نگهداری شاتکریت به همراه المان‌های فایبرگلاس



ب- شاتکریت معادل شده و المان‌های تزریقی فایبرگلاس در سینه‌کار

شکل ۱۰- مدل‌سازی سیستم‌های بهسازی تونل در نرم‌افزار *FLAC3D*

نتایج مدل‌سازی عددی برای روش‌های فوق و همچنین اجرای طول کوتاهی از تونل و مشاهده‌ی ناپایداری آن، لزوم استفاده از روش حفاری مکانیزه را آشکار ساخت.

#### ۴-۲- مدل‌سازی TBM

##### ۴-۲-۱- تعیین فشار سینه‌کار

براساس روش تحلیلی کواری و آناگنوستو و اطلاعات زمین‌شناسی مهندسی و لحاظ کردن فشار هیدرواستاتیک داخل چمبر تا ۴ بار، فشار مؤثر مورد نیاز جهت پایداری سینه‌کار ۲ بار و فشار کل ۶ بار به دست آمد. سپس برای صحت‌سنجی و تعیین دقت این روش از مدل‌سازی‌های عددی با استفاده از نرم‌افزار *FLAC3D* و *PLAXIS3D*

به دلیل هزینه‌های پایین‌تر اجرای تونل به روش اتریشی نسبت به روش مکانیزه و همچنین تجربه پیشین مهندسی و متخصصین پروژه، تصمیم به اجرای این روش به‌صورت آزمایشی و با احتیاط کامل گرفته شد؛ بنابراین یک جبهه حفاری در قسمت آبرفت گشوده شده و حفاری از این دهانه آغاز شد. بازگشایی جبهه کار به دو روش باز کردن منفرد و دوگانه از جداره‌ها و همچنین با تزریق فورپولینگ و لتیس‌گذاری به فاصله‌ی ۰/۵ متری انجام گرفت؛ اما مطابق انتظار جبهه کار با ناپایداری شدیدی همراه بود و دبی و فشار آب بسیار بالا، سست بودن خاک و ریزش‌های مکرر

ارزیابی پایداری تونل انتقال آب ارومیه با مدل سازی عددی سه بعدی با استفاده از روش های اجزاء و تفاضل محدود: ص ۱۰۵-۱۲۰

$$K_{st} = \frac{E_{st} I_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \quad (6)$$

برای شاتکریت روابط زیر برقرار است:

$$A_{st} = s \cdot t_{sh} \quad (7)$$

$$I_{sh} = \frac{s \cdot t_{sh}^3}{12} \quad (8)$$

$$D_{sh} = \frac{E_{sh} A_{sh}}{1 - \nu_{sh}^2} \quad (9)$$

$$K_{sh} = \frac{E_{sh} I_{sh}}{1 - \nu_{sh}^2} \quad (10)$$

برای مقطع معادل روابط زیر برقرار است:

$$D_{eq} = n(D_{st} + D_{sh}) \quad (11)$$

$$K_{eq} = n(K_{st} + K_{sh}) \quad (12)$$

$$t_{eq} = \sqrt{\frac{12K_{eq}}{D_{eq}}} \quad (13)$$

$$E_{eq} = \frac{D_{eq}}{bt_{eq}} \quad (14)$$

جدول زیر پارامترهای ترکیب شاتکریت و لتیس مورد استفاده را نشان می دهد.

جدول ۲- پارامترهای ترکیب شاتکریت و لتیس مورد

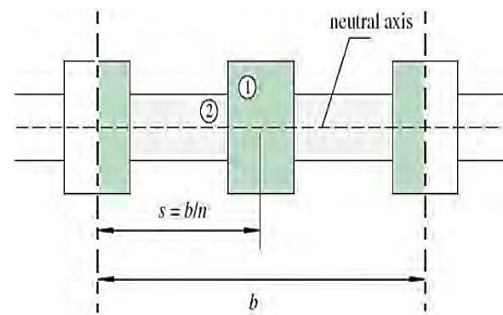
استفاده

چگالی شاتکریت: ۲۲۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب	مدول یانگ شاتکریت: ۲۰ گیگاپاسگال
مقاومت فشاری شاتکریت: ۲۱ مگاپاسگال	نسبت پواسون شاتکریت: ۰/۱۵
فاصله بین لتیس ها: ۰/۵ متر	ضخامت شاتکریت: ۰/۳۵ متر
نسبت پواسون میلگرد: ۰/۲۵	مدول یانگ میلگرد: ۲۰۰ گیگاپاسگال
تعداد میلگرد در هر لتیس: ۴ عدد	چگالی میلگرد: ۷۸۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب
فاصله میلگردها در مش: ۱۰ سانتی متر	دو لایه مش با قطر ۶ میلی متر
چگالی معادل: ۲۳۸۰ کیلوگرم بر مترمکعب	قطر میلگردها: ۲۸ میلی متر
مدول یانگ معادل: ۲۵ گیگاپاسگال	ضخامت معادل: ۰/۳۳ متر

استفاده شد.

#### ۴-۲-۲-۲-۴-المان لاینر (ترکیب شاتکریت با لتیس)

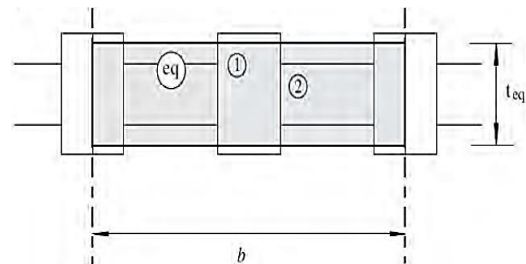
ترکیب شاتکریت با لتیس با روش معادل سازی انجام گرفت. با توجه به اینکه سیستم نگهداری طراحی شده برای تونل، سیستم ترکیبی شاتکریت و لتیس است، برای مدل کردن، این سیستم نگهداری به صورت سیستم کامپوزیت در نظر گرفته شد. برای این کار از روش نوینی که در سال ۲۰۰۹ توسط تورس و دیدریچس برای سیستم نگهداری مرکب شاتکریت و قاب فولادی ارائه گردیده استفاده شد. رفتار لایه نگهدارنده تونل که مقطع متشکل از دو ماده مختلف است (به عنوان مثال شاتکریت و قاب یا لتیس) براساس تئوری ارتجاعی پوسته ها و رفتار تیرهای منحنی به صورت شکل ۱۲ و ۱۳ است. (Carranza-Torres & Diederichs, 2009)



شکل ۱۲- نمایش شماتیک یک مقطع از لایه نگهدارنده

شامل مواد مختلف

(Carranza-Torres and Diederichs, 2009)



شکل ۱۳- مقطع معادل برای لایه کامپوزیت

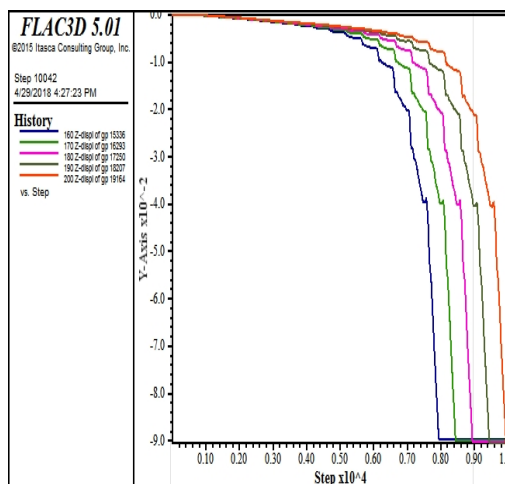
(Carranza-Torres & Diederichs, 2009)

برای قاب فولادی روابط زیر برقرار است:

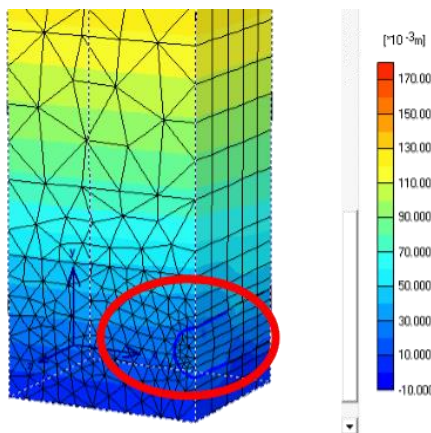
$$D_{st} = \frac{E_{st} A_{st}}{1 - \nu_{st}^2} \quad (5)$$

## ۵- تحلیل نتایج نرم‌افزار

تنش‌های اطراف سینه‌کار را حدود  $13/2$  سانتیمتر نشان می‌دهد. درحالی‌که سینه‌کار با توجه به فشار اعمال‌شده پس از  $7/2$  سانتیمتر جابه‌جایی تفاضلی به شرایط تعادل رسیده است. مقدار این پارامتر در نرم‌افزار *PLAXIS 3D* بعد از شرایط تعادل تونل برابر با  $6$  سانتیمتر به‌دست‌آمده است که نتایج آن در شکل ۱۵- ب به‌صورت کانتور تغییر شکل‌های افقی آورده شده است؛ بنابراین نتایج تغییر مکان‌های افقی و قائم سینه‌کار در هر دو نرم‌افزار تطابق مناسبی داشته و فشار سینه‌کار برابر  $9$  بار به‌عنوان فشار تعادل محاسبه شد.



الف- تاریخچه جابجایی قائم در تاج تونل (محور قائم) برحسب متر با توجه به سکنس‌های پیشروی در نرم‌افزار *FLAC3D*



ب- کانتور تغییر شکل‌های قائم در محدوده‌ی دستگاه *TBM* در نرم‌افزار *PLAXIS3D*

شکل ۱۴- جابجایی‌های قائم تونل در روش مکانیزه در دو نرم‌افزار مختلف

برای روش مکانیزه در هر دو نرم‌افزار به علت تقارن در هندسه و بارگذاری نیمی از کل خاک و تونل مدل گردید. با توجه به مدل‌سازی‌های صورت گرفته در دو نرم‌افزار، مشخص شد که در فشار تعیین‌شده توسط روش تحلیلی کواری و آناگنوستو مدل در دو نرم‌افزار به تعادل نمی‌رسد؛ بنابراین فشارهای بیشتر مورد بررسی قرار گرفت. با مدل‌سازی فشارهای مختلف، این عدد در نرم‌افزار *PLAXIS3D* در فاز تعریف فشار تونل به‌طور دقیق برابر  $8,8$  بار به دست آمد که فشار  $9$  بار به‌عنوان فشار پایدارکننده جبهه تونل در نظر گرفته شد. همچنین پس از حل نهایی مدل در نرم‌افزار *FLAC3D* (شرط اصلی جهت انتخاب فشار مناسب، تعادل نهایی در تاریخچه جابه‌جایی‌های سینه‌کار است)، نتایج مورد بررسی قرار گرفت و فشار  $9$  بار به‌عنوان فشار مناسب انتخاب گردید سپس تغییر مکان‌ها در دو نرم‌افزار به‌دست‌آمده و نتایج آن باهم مقایسه شده است. با مدل‌سازی در نرم‌افزار *FLAC3D*، مطابق شکل ۱۴- الف، جابه‌جایی قائم رخ داده در تاج تونل در محدوده شیلد حدود  $9$  سانتی‌متر است (با صرف‌نظر از مقادیر مرزی مدل).

این مقادیر جابه‌جایی کل زمین قلمداد می‌شود. از مجموع  $9$  سانتیمتر جابه‌جایی قائم،  $4$  سانتیمتر آن مربوط به قبل از رسیدن سپر و  $5$  سانتیمتر باقیمانده بعد از قرارگیری سپر است که در نرم‌افزار *PLAXIS3D* نیز قابل نمایش است. این جابه‌جایی در نرم‌افزار *PLAXIS3D* برابر با  $3,5$  سانتیمتر است. علت این اختلاف آن است که نرم‌افزار *FLAC3D* قابلیت مدل‌سازی تونل قبل از رسیدن سپر را نیز دارد. در عمل از جابه‌جایی تونل قبل از رسیدن سپر چشم‌پوشی می‌شود زیرا این مقدار فقط برای چند متر ابتدایی تونل مشاهده می‌شود؛ بنابراین می‌بایست مقدار  $3,5$  سانتیمتر با  $5$  سانتیمتر مقایسه شود که تطابق نسبتاً مناسبی در این حالت مشاهده می‌شود. در شکل ۱۴- ب کانتور تغییر شکل‌های قائم در نرم‌افزار *PLAXIS3D* آورده شده است.

در نرم‌افزار *FLAC3D* سینه‌کار همان‌طور که در شکل ۱۵- الف، نمایش داده شده است جابه‌جایی سینه‌کار تا رسیدن دستگاه در راستای محور تونل به دلیل آزادسازی

### ۶- نتیجه‌گیری

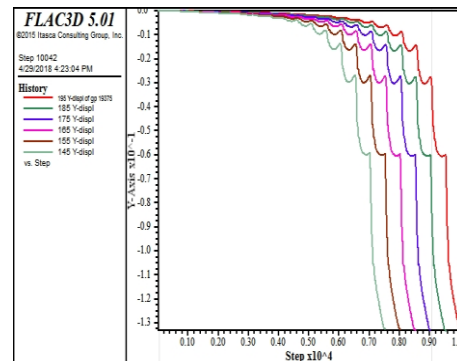
پروژه تونل انتقال آب ارومیه یکی از چالشی‌ترین پروژه‌ها در حوزه مهندسی عمران در کشور است. سربار حدود ۱۰۰ متری و سطح آب زیرزمینی همراه با دبی بسیار بالا موجب دشواری‌های ژئوتکنیکی زیادی جهت پایداری‌سازی این تونل شده است.

در این پژوهش پایداری تونل مذکور به روش عددی و با استفاده از نرم‌افزارهای *FLAC3D* و *PLAXIS3D* مورد بررسی قرار گرفت. با توجه به مدل‌سازی‌های صورت‌گرفته در بخش آبرفت، روش سنتی قابل اجرا انتخاب‌شده در این بخش (جت گروت به ضخامت ۱ متر به صورت ۳۶۰ درجه با طول ۱۲ متر، سیستم ترکیبی شاتکریت و لتیس همراه با تزریق فایبرگلاس در سینه‌کار با فاصله ۰/۵ متری با طول ۱۲ متر) چه به صورت تمام‌مقطع و چه به صورت چندمرحله‌ای پایدار نیست و جابه‌جایی‌های ایجادشده در سینه‌کار تونل، بسیار بیشتر از حد مجاز هستند و در نهایت مدل‌ها به تعادل نرسیدند و سینه‌کار دچار ریزش شد. همچنین اجرای طول کوتاهی از تونل در قسمت آبرفت به روش *NATM* با ناپایداری شدید و خطر ریزش همراه بود که ادامه کار را در این قسمت غیر ممکن ساخت.

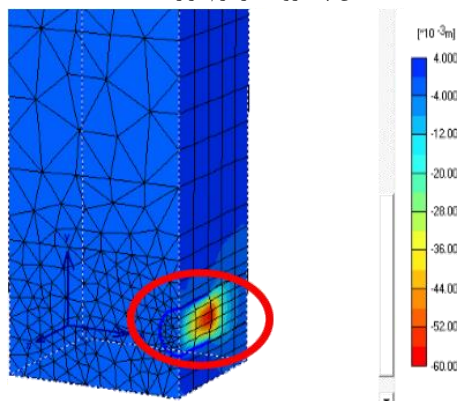
بنابراین روش مناسب جهت حفاری در این شرایط استفاده از *EPB* می‌باشد تا فشار مورد نیاز جهت پایداری جبهه تونل تأمین شود. در این حالت فشار *EPB* برابر ۹ بار محاسبه شد. همچنین تغییر مکان‌های افقی و قائم تونل در هر دو نرم‌افزار با یکدیگر مقایسه شد که مقادیر به‌دست‌آمده نشان از انطباق مناسب نتایج داشت.

با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از این تحلیل پیشنهاد می‌شود در صورت امکان، مسیر تونل اصلی را تغییر داده تا از بخش آبرفت خارج شود. به‌جای حفاری بخش آبرفت در عمق ۱۱۰ متری، در ابتدا و انتهای آبرفت در نزدیکی سطح زمین، پمپ‌های قوی در شفت‌ها تعبیه شود و آب را از تونل اصلی پمپاژ کرده و در نزدیکی سطح زمین از طریق لوله‌های انتقال آب به بخش دیگر تونل اصلی آب را انتقال دهند تا هزینه‌های بسیار زیاد حفاری بخش آبرفت کاهش یابد.

جهت اجرای پروژه به‌وسیله *TBM* ضمن افزایش توان دستگاه‌های موجود یا تهیه دستگاه *TBM* مناسب رعایت موارد زیر بسیار بااهمیت است:



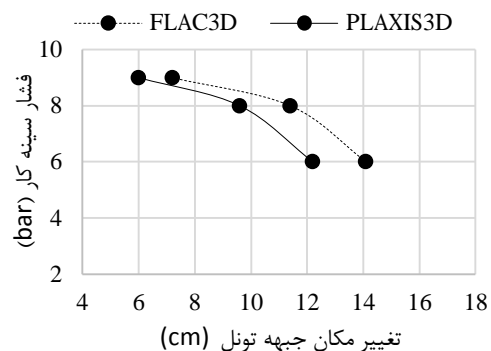
الف: تاریخچه جابجایی سینه‌کار در راستای افقی بر اساس سکانس پیشروی در نرم‌افزار *FLAC3D*



ب: کانتور تغییر شکل‌های افقی در محدوده‌ی دستگاه *TBM* در نرم‌افزار *PLAXIS3D*

### شکل ۱۵- جابجایی‌های افقی تونل در روش مکانیزه در دو نرم‌افزار مختلف

در شکل ۱۶ حداکثر جابه‌جایی جبهه حفاری در فشارهای مختلف در دو نرم‌افزار مقایسه شده است که مقدار آن در فشار ۹ بار بین ۶ تا ۷ سانتیمتر در دو نرم‌افزار به‌دست‌آمده است.



شکل ۱۶- تغییر مکان جبهه تونل در فشارهای مختلف دستگاه *EPB*

در حد توان عملی می‌شود. زمان پایداری حفاری تونل با سگمنت تعیین شود. بار اعمال‌شده در محاسبات به‌صورت توزیع یکنواخت بر روی سگمنت در نظر گرفته شود.

در حین حفاری می‌بایست فشار بر روی شیلد و نهایتاً سگمنت کاهش یابد. این مهم به‌وسیله قرار دادن *p-gravel* و اجرای ملات در اطراف سگمنت و همچنین اجرای زهکش

## ۷- سیاهه نمادها

سیاهه نمادها در جدول ۳ آورده شده است.

جدول ۳- سیاهه‌ی نمادها

نماد	واحد	شرح	نماد	واحد	شرح
$s'$	$kN/m^2$	فشار نگهداری مؤثر	$K_p$	-	ضریب فشار جانبی خاک در حالت مقاوم
$D$	$m$	قطر تونل	$A_{st}$	$m^2$	سطح مقطع عرضی قاب فولادی
$\gamma'$	$kN/m^3$	وزن مخصوص غوطه‌ور خاک	$I_{st}$	$m^4$	ممانیرسی قاب فولادی
$c$	$kN/m^2$	چسبندگی خاک	$\nu_{st}$	-	نسبت پواسون قاب فولادی
$\Delta h$	$m$	اختلاف فشار هیدرواستاتیک داخل چمبر و ارتفاع آب بالای تونل	$t_{sh}$	$m$	ضخامت شاتکریت
$h_0$	$m$	تراز آب از کف تونل	$D_{sh}$	$kN$	ضریب تراکم‌پذیری شاتکریت
$F_0$	-	ضریب ثابت	$K_{sh}$	$kN.m^2$	ضریب انعطاف‌پذیری شاتکریت
$F_1$	-	ضریب ثابت	$A_{sh}$	$m^2$	سطح مقطع شاتکریت
$F_2$	-	ضریب ثابت	$I_{sh}$	$m^4$	ممانیرسی شاتکریت
$F_3$	-	ضریب ثابت	$\nu_{st}$	-	نسبت پواسون شاتکریت
$\varphi$	<i>degree</i>	زاویه اصطکاک داخلی	$D_{eq}$	$kN$	ضریب تراکم‌پذیری مقطع معادل
$H$	$m$	روباره تونل	$K_{eq}$	$kN.m^2$	ضریب انعطاف‌پذیری مقطع معادل
$D_{st}$	$kN$	ضریب تراکم‌پذیری قاب فولادی	$t_{eq}$	$m$	ضخامت مقطع معادل
$K_{st}$	$kN.m^2$	ضریب انعطاف‌پذیری قاب فولادی	$E_{eq}$	$kN/m^2$	مدول یانگ مقطع معادل

## ۸- مراجع

- Abu-Farsakh, M.Y., and Voyiadjis, G.Z. (1999). Computational model for the simulation of the shield tunneling process in cohesive soils. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 23, 23-44.
- Anagnostou, G., & Kovari, K. (1996). Face stability conditions with earth-pressure-balanced shields. *Tunneling and underground space technology*, 11(2), 165-173.
- Anagnostou, G., & Kovari, K. (1997). Face stabilization in closed shield tunneling. In *1997 Rapid Excavation and Tunneling Conference. Proceedings* (pp. 549-558). Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Anagnostou, G., Kovari, K. (1994). The face stability of slurry shield-driven tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 9(2), 165-174.
- Atkinson, J. H., & Potts, D. M. (1977). Stability of a shallow circular tunnel in cohesion less soil. *Geotechnique*, 27(2), 203-215.
- Bernat, S., and Cambou, B. (1998). Soil-structure interaction in shield tunnelling in soft soil. *Computers and*

ارزیابی پایداری تونل انتقال آب ارومیه با مدل‌سازی عددی سه‌بعدی با استفاده از روش‌های اجزاء و تفاضل محدود: ص ۱۰۵-۱۲۰

*Geotechnics*, 22, 221-242.

- Broere, W. (2001). *Tunnel face stability and new CPT applications*. Ph.D. Thesis, Delft University of Technology, Delft University Press, The Netherlands.
- Carranza Torres, C. (2004). *Computation of factor of safety for shallow tunnels using Caquot's lower bound solution*. Technical report for Geodata, Turin.
- Carranza-Torres, C., & Diederichs, M. (2009). *Mechanical analysis of circular liners with particular reference to composite supports. For example, liners consisting of shotcrete and steel sets*. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(5), 506-532.
- Chakeri, H., Hasanpour, R., Hindistan, M. A., Ünver, B. (2011). *Analysis of Interaction between Tunnels in Soft Ground by 3D Numerical Modeling*. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 70, 439-448.
- Chambon, P., Corté, J.F. (1994). *Shallow tunnels in cohesionless soil: stability of tunnel face*". *Journal of Geotechnical Engineering ASCE*, 120(7), 1148-1165.
- Dias, D., Kastner, R., Maghazi, M. (2000). *Three dimensional simulation of slurry shield tunnelling*. In: Kusakabe, O., Fujita, K., Miyazaki, Y. (Eds.), *Geotechnical Aspects of Underground Construction in Soft Ground*. Balkema, Rotterdam. 351-356.
- Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A. and Xu, S. eds., (2008). *Mechanized tunneling in urban areas: design methodology and construction control*. Taylor and Francis, CRC Press.
- Hasanpour, R., Chakeri, H., Özcelik, Y., Denek, H. (2012). *Evaluation of surface settlements in the Istanbul metro in terms of analytical, numerical and direct measurements*. *Bulletin of Engineering Geology and Environment*, 71, 499-510.
- Herrenknecht, A. and Böppler, K., (2003). *Segmental concrete lining design and installation*. In *Soft Ground and Hard Rock Mechanical Tunneling Technology Seminar*.
- Imensazan. (2017). *Engineering Geology Report on kani sib Tunnel*. (In Persian).
- Jancsecz, S., & Steiner, W. (1994). *Face support for a large mix-shield in heterogeneous ground conditions*. In *Tunnelling'94* (pp. 531-550). Springer, Boston, MA.
- Karakuş, M. and Fowell, R.J., (2004). *An insight into the new austrian tunnelling method (NATM)*. *Proc. ROCKMEC*.
- Kishida, K., Cui, Y., Nonomura, M., Iura, T., & Kimura, M. (2016). *Discussion on the mechanism of ground improvement method at the excavation of shallow overburden tunnel in difficult ground*. *Underground Space*, 1(2), 94-107.
- Kolymbas, D., (2005). *Tunnelling and tunnel mechanics: A rational approach to tunnelling*. Springer Science & Business Media
- Lunardi, P., (2008). *Design and construction of tunnels: Analysis of Controlled Deformations in Rock and Soils (ADECO-RS)*. Springer Science & Business Media.
- Melis, M., Medina, L., Rodriguez, J.M. (2002). *Prediction and analysis of subsidence induced by shield tunnelling in the Madrid metro extension*". *Canadian Geotechnical Journal*, 39, 1273-1287.
- Miwa, M., & Ogasawara, M. (2005). *Tunnelling through an embankment using all ground fasten method*. *Tunnelling and underground space technology*, 20(2), 121-127.

- Nikbakhtan, B., & Osanloo, M. (2009). *Effect of grout pressure and grout flow on soil physical and mechanical properties in jet grouting operations*. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 46(3), 498-505.
- Nonomura, M., Iura, T., Okajima, M., & Kishida, K. (2011). *Effectiveness and issues of pre-improvement of unconsolidated ground for shall tunnel construction*. *Tunnels and Underground, JTA*, 42(5), 381-391.
- Oke, J., Valchopoulos, N., & Marinos, V. (2014). *Umbrella arch nomenclature and selection methodology for temporary support systems for the design and construction of tunnels*. *Geotechnical and Geological Engineering*, 32(1), 97-130. <http://dx.doi.org/10.1007/s10706-013-9697-4>
- Soubra, A.H. (2000). *Three-dimensional face stability analysis of shallow circular tunnels*. In: *Proceedings of the International Conference on Geotechnical and Geological Engineering*. 19-24 November, 2000, Melbourne, Australia.
- Soubra, A.H. (2002). *Kinematical approach to the face stability analysis of shallow circular tunnels*. In: *Proceedings of the Eight International Symposium on Plasticity, Canada, British Columbia*. 443-445.

## *Evaluation of Urmia Tunnel Stability using 3D Finite Element and Finite Difference Modeling*

### *Technical Note*

*S. Sharif<sup>1</sup>; F. Khosravi<sup>2</sup>; S.R. Soorani<sup>3</sup>*

*1. M.Sc. Student in Geotechnical Engineering, Iran University of Science and Technology*

*2. Assistant Professor; Faculty of Civil Engineering, Imam Hossein University*

*3. M.Sc. in Geotechnical Engineering, Iran University of Science and Technology*

*Received: 25 Mar 2017; Accepted: 7 Apr 2019*

*DOI:10.22044/TUSE.2019.7499.1349*

---

#### **Keywords**

**Tunnel**  
**Tunneling in Alluvial Ground**  
**Underground Space**  
**New Austrian Tunneling Method (NATM)**  
**Jet Grouting**  
**TBM**  
**ADECO**

---

#### **Extended Abstract**

##### **Summary**

Urmia tunnel is being constructed to convey water to the Naghadeh and Urmia agricultural plains. About 1800 m of excavations are located in the alluvial ground. In this paper, a part of Urmia tunnel that is located in the alluvial ground was modeled using the numerical modeling FLAC3D and PLAXIS3D TUNNEL software packages. For this, first, the

new Austrian tunneling method (NATM) was modeled. The NATM modeling results showed high displacement and instability of the face of the tunnel. Then, the earth pressure balance (EPB) machine was modeled and the face pressure was calculated. The modeling results showed suitable conformation between the two software packages. Moreover, a short-length part of the tunnel was excavated in the alluvial structure using the NATM, however, according to the modeling results, the face of the tunnel was unstable, and thus, the excavation was stopped. The face pressure, in the tunnel boring machine (TBM) was also calculated.

#### **Introduction**

Urmia tunnel is a challenging project because of its especial ground and excavation conditions. The main focus of this research is on tunneling in hard conditions like high groundwater level, high depth of tunnel, too much overburden, etc. An example of tunneling in hard conditions is the Urmia tunnel that is studied in this paper. The main objective of this paper is to select a suitable method of excavation in the tunnel.

#### **Methodology and Approaches**

In this study, the NATM and its combination with soil improvement methods, and also, the EPB machine were modeled using the numerical modeling FLAC3D and PLAXIS 3D TUNNEL software packages. A short-length part of the tunnel, which was excavated in the alluvial ground using the NATM, was considered in this study.

#### **Results and Conclusions**

The obtained modeling results in this study showed high displacement of both face and crown and instability of the face in the NATM modeling and combination of the NATM and soil improvement methods like jet-grouting and forepoling. Thus, the EPB machine was modeled and the face pressure was calculated.

---