

## ارزیابی عددی اثر فشار و تراوش آب در طراحی تونل‌های تحت فشار

علیرضا پیشکاری احمد اباد<sup>۱</sup>، اکبر مختارپور<sup>۲</sup>، امید توسلی<sup>۳</sup>

<sup>۱</sup> دانشگاه آزاد واحد تهران شرق مقطع ارشد رشته مهندسی عمران-تخصص آب و سازه های هیدرولیکی

<sup>۲</sup> دانشجوی دکتری واحد علوم تحقیقات، تخصص آب

<sup>۳</sup> دکتری تخصصی، ژئوتکنیک

### چکیده

تونل‌ها و شفت‌های تحت فشار در ابتدا در صنعت هیدروالکتریک (نیروگاه‌های برق آبی) استفاده می شدند، اما اکنون برای انتقال آب مصرفی و ضایعات آبی استفاده می شوند. اما هنوز عمومی ترین استفاده از تونل‌ها و شفت های تحت فشار در طرح نیروگاه‌های برق آبی جهت انتقال آب از بالادست به نیروگاه پایین دست است. در این پایان نامه، جهت روشن شدن هدف اصلی تحقیق که ارزیابی عددی اثر فشار و تراوش آب در طراحی تونل های تحت فشار است، به روش اجزای محدود با استفاده از نرم افزار 3DPLAXIS چندین سیستم سازه ای تونل تحت اثر فشار با سطوح مختلف آب زیر زمینی و سربارهای متفاوت تحت اثر فشار و تراوش مدلسازی و مورد تحلیل واقع شده است. در مجموع ۳۲ مدل که شامل ۴ نسبت ارتفاع سربار به قطر تونل ( $\frac{H}{D}$ ) و ۴ نسبت تراز آب زیر زمینی به ارتفاع سربار تونل ( $\frac{h}{H}$ ) تحلیل و بررسی شد. در این تحقیق ابتدا به ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود تونل های تحت فشار همچون تغییر شکل (تغییر مکان) و تنش های وارده بر نمونه ها بر مبنای تغییر میزان تراز سطح آب زیر زمینی و سربار تونل پرداخته شد، سپس کرنش کلی، کرنش برشی و در نهایت نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی نمونه های مورد مطالعه و عملکرد میخ ها و دیواره ها بر اساس تغییرات نسبت ارتفاع سربار به قطر تونل ( $\frac{H}{D}$ ) و نسبت تراز آب زیر زمینی به ارتفاع سربار تونل ( $\frac{h}{H}$ ) مورد بررسی قرار گرفت.

**واژه‌های کلیدی:** تونل زیر زمینی، فشار، تراوش آب، روش اجزای محدود، نرم افزار PLAXIS.

## ۱- مقدمه

تونل ها و شفت های تحت فشار مجراهایی هستند که برای انتقال سیالات عموماً آب تحت فشار، حفاری میشوند. تونلها و شفتهای تحت فشار در ابتدا در صنعت هیدروالکتریک (یا نیروگاههای برق آبی) استفاده میشدند، اما اکنون برای انتقال آب مصرفی و ضایعات آبی مورد استفاده قرار می گیرند، ولی هنوز هم عمومیتترین استفاده از تونلها و شفتهای تحت فشار در طرح نیروگاههای برق آبی برای انتقال آب از بالادست به نیروگاه در پایین دست است. این تونلها ممکن است از توده سنگ یا خاک با توپوگرافی و میزان روباره مختلف عبور کنند. از لحاظ مهندسی ژئوتکنیک طراحی و اجرای اینگونه تونلها به نحویکه در طول عمر مفید پروژه ایمن باشند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است (آنانوستو<sup>۱</sup>، ۲۰۱۴).

از نظر پایداری، فشار هیدرولیکی (اعم از استاتیکی و دینامیکی) داخل تونل تحت فشار اساسی ترین عامل ناپایداری سنگ اطراف تونل است و باعث ایجاد پدیده جک هیدرولیکی، تراوش بیش از اندازه، فشار حفره ای بیش از حد می شود. در جهت بررسی پتانسیل ناپایداری های مذکور معیارهایی توسط متخصصین ارائه شده که اخیراً روشهای عددی نیز به آنها اضافه شده است. بنابراین در جاهایی که پتانسیل خرابی ناشی از فشار داخلی بالاست استفاده از پوشش امری اجتناب ناپذیر است. از اینسو استفاده از پوشش فولادی ایمن ترین راه حل است. پوشش فولادی مانع از انتقال صد در صد فشار هیدرولیکی داخل تونل به زمین اطراف و نیز مانع از نشت آب که خود آثار مخرب دیگری دارد، می شود (همان). علیرغم ایمنی پوششهای فولادی، استفاده از آن و اجرای آن مستلزم صرف هزینه و زمان قابل توجهی است که در اغلب موارد توجیه اقتصادی و زمانی پروژه را با سوالات جدی روبه رو می سازد. بدین دلیل استفاده از پوشش فولادی در اکثر موارد مطلوب نیست و باید سایر پوششها (صفحه بتنی، صفحه بتنی مسلح و ...) نیز مورد بررسی قرار گیرند. از نظر فشار داخلی تا به حال تونلهای تحت فشار با فشار کم (فشار در حدود ۱۰ متر) و تونلهای تحت فشار با فشار خیلی زیاد (فشار در حدود ۱۵۰۰ متر آب) در جهان اجرا شده، و مورد بهره برداری قرار گرفته اند (چن<sup>۲</sup>، ۲۰۰۹).

## ۲- پیشینه پژوهش

احمد فهیمی فر و همکارانش در سال ۱۳۹۳ در مقاله ای تونل های زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن اثر تراوش مورد تحلیل الاستوپلاستیک قرار دادند. در این مقاله، مدلی تحلیلی- عددی برای تونل های زیر سطح آب زیرزمینی در شرایط تقارن محوری و کرنش صفحه ای ارائه شده است. با در نظر گرفتن رفتار نرم کرنشی توده سنگ هوک و براون و مدل های مختلف تراوش، مدلی الاستوپلاستیک برای تحلیل تونل های زیر سطح آب زیرزمینی با مقطع دایروی پیشنهاد شده است. با مقایسه مدل های مختلف تراوش، مدل دقیق تر انتخاب و در این پژوهش مورد استفاده قرار می گیرد (مارنکو<sup>۳</sup>، ۲۰۱۲). در روش ارائه شده تأثیرات نمو کرنش الاستیک در ناحیه پلاستیک وزاویه اتساع توده سنگ نیز لحاظ می گردد. روش حل مسئله در ناحیه پلاستیک با توجه به در نظر گرفتن رفتار نمر کرنشیتوده سنگ روش پله ای است که در آن پارامترهای مقاومتی توده سنگ به صورت گام به گام از مقادیر حداکثر خود تا مقادیر ماندگار تغییر می کند. همچنین تنش ها، کرنش ها و تغییرشکل های توده سنگ نیز از مقادیر مرز الاستوپلاستیک تا مقادیر مرز تونل به صورت گام به گام تغییر می کند. از سوی دیگر، برای ناحیه الاستیک روابط تحلیلی بسته به دست می آید. دقت و کاربرد عملی روش ارائه شده در شرایط خشک و تر مورد بررسی قرار می گیرد. نتایج به دست آمده، تأثیر زاویه اتساع، نمو کرنش الاستیک در ناحیه پلاستیک و مدل های مختلف تراوش را به خوبی نشان می دهند (احمدوند، ۱۳۹۲).

پرازلی<sup>۴</sup> و همکارانش در سال ۲۰۱۴ به بررسی پایداری جبهه (سینه) تونل<sup>۵</sup> تحت شرایط تراوش جریان آب پرداختند. این مقاله در واقع بررسی مشکلات ناشی از پایداری سینه تونل تحت اثر نیروی تراوش جریان آب بر اساس روش اسلایسس<sup>۱</sup> می باشد.

<sup>۱</sup> Anagnostou

<sup>۲</sup> Chen

<sup>۳</sup> Marengo

<sup>۴</sup> Perazzelli

<sup>۵</sup> Tunnel face

مدل محاسباتی پیشنهادی موجب رفع محدودیت های روش تعادل آنانستو و کواری<sup>۲</sup> (۱۹۹۶) می شود. علاوه بر این، این روش نشان داده که اگر گرادیان هد هیدرولیکی وارده بر جبهه ی تونل زیاد باشد، شکست کششی در لبه ها ممکن است بیشتر از شکست برشی باشد. همچنین برای تخمین توزیع هد هیدرولیکی در عرصه سینه ی تونل، این محققین یک روش حل فرم بسته<sup>۳</sup> را برای مقاومت در برابر فشار جریان تراوش ارائه کردند (احمدوند، ۱۳۹۱).

### ۳- روش پژوهش

در این پژوهش، از روش کتابخانه ای برای جمع آوری اطلاعات در زمینه ادبیات و پیشینه ی تحقیق استفاده گردیده و با مطالعه کتاب ها، مقالات و تحقیقات دیگر پژوهشگران و جستجو در اینترنت، اطلاعات مورد نیاز جمع آوری شده است (عبدالمالکی، ۲۰۱۳). در همین راستا با استفاده از روش کتابخانه ای و بهره گیری از تجارب متخصصان فن که مطالعات مفیدی در این زمینه انجام داده اند به عنوان اولین مرحله پژوهش مورد توجه قرار گرفت و سپس جهت طراحی مدل های سازه از نرم افزار PLAXIS3D استفاده می شود (احمدوند، ۱۳۹۳).

### ۴- مدلسازی پژوهش

در این مطالعه، ۳۲ نمونه تونل تحت اثر فشار و همچنین فشار و تراوش آب در نظر گرفته شده است. طبقه بندی نمونه های مورد بررسی به شرح زیر می باشد (احمدوند، ۱۳۹۱):



شکل ۱. طبقه بندی مدل های مورد مطالعه

<sup>1</sup> slices

<sup>2</sup> Anagnostou and Kovári

<sup>3</sup> closed-form

## ۴-۱- مشخصات مدل های مورد مطالعه

لایه خاک توسط مدل Mohr-Coulomb مدل می گردد و رفتار این لایه زهکشی شده در نظر گرفته می شود. مشخصات جنس عناصر مدل در جدول (۱) آورده شده است (زارعی فرد، ۱۳۹۲).

جدول ۱. مشخصات جنس عناصر نمونه های مورد مطالعه

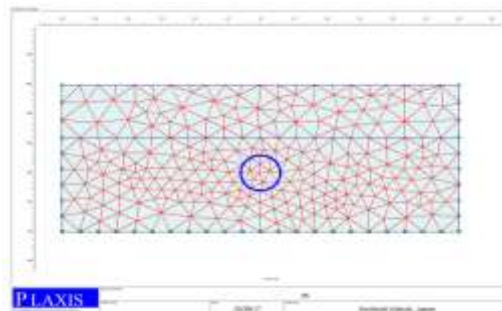
Parameters	Symbol	Rock mass	Lining	Unit
Modulus of elasticity	$E$	10	20	$GPa$
Poisson's ratio	$\nu$	0.20	0.22	-
Unit weight	$\gamma$	26	24	$kN/m^3$
Frictional angle	$\phi$	40	40	$^\circ$
Cohesion	$C$	1000	1000	$kN/m^2$
Thickness of lining	$d$	-	0.1	$m$
Weight	$w$	-	24	$kN/m/m$
Thermal coefficient	$\alpha$	-	$1.2 \times 10^{-5}$	$/^\circ C$

همانگونه که در شکل (۱) آمده است، ۴ تیپ تونل با سربارهای متفاوت مورد مطالعه است که در هر نوع تونل، ۴ تراز مختلف سطح آب با و بدون در نظر گرفتن تراوش آب در تونل های مورد مطالعه ارزیابی شده اند. لازم به توضیح است قطر تونل برابر ۶ متر در نظر گرفته شده است. با توجه به مطالب فوق، در این پژوهش در مجموع ۳۲ مدل سازه ای مورد بررسی و تحلیل قرار می گیرد (احمدوند، ۱۳۹۳).

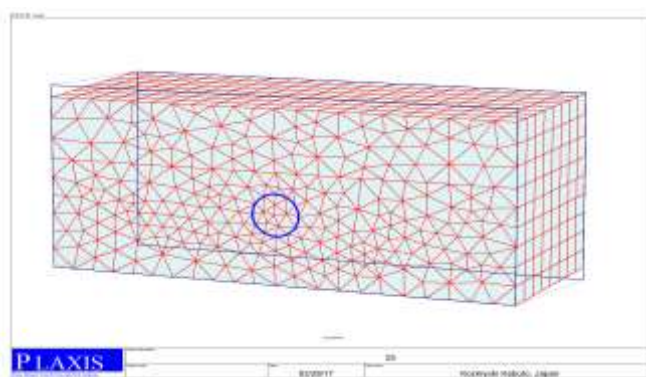
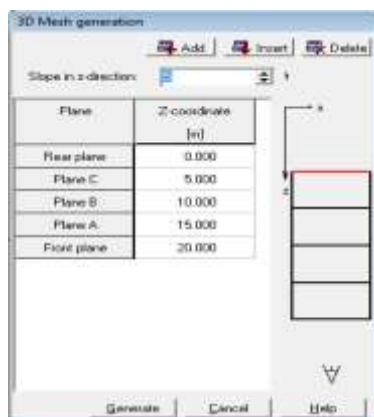
## ۴-۲- مش بندی

هنگامی که هندسه مدل کامل گردید، مدل عناصر اجزاء محدود یا همان مش بندی، می تواند تولید گردد. برنامه 3DPLAXIS تولید مش ها را کاملاً به طور خودکار انجام می دهد و مدل های هندسی را براساس ساختار مدل به عناصر پایه تقسیم بندی می کند، به این صورت که بر این اساس بهترین سه ضلعی های پایه را به مدل برازش می دهد. لازم به توضیح است که اندازه مش ها به صورت Fine (ریز) انتخاب می شود. لازم به ذکر است که در برنامه 3DPLAXIS ابتدا مش بندی باید به صورت دو بعدی زده شود، سپس مدل به صورت سه بعدی مش خواهد خورد. همچنین تونل تونل ۲۰ متر فرض شده است (قدیمی، ۱۳۹۰).

در شکل های (۲) و (۳) مش بندی مدل های هندسی نشان داده شده است (چن، ۲۰۰۹).



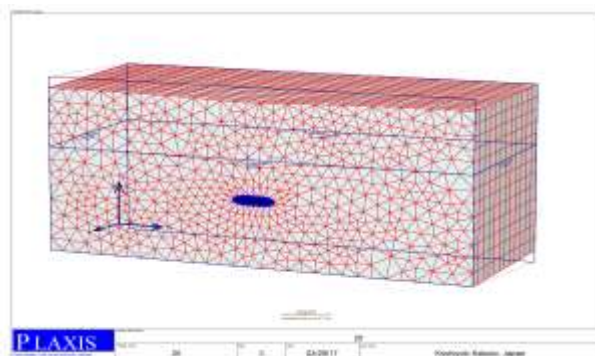
شکل ۲. مش بندی تونل به صورت دو بعدی



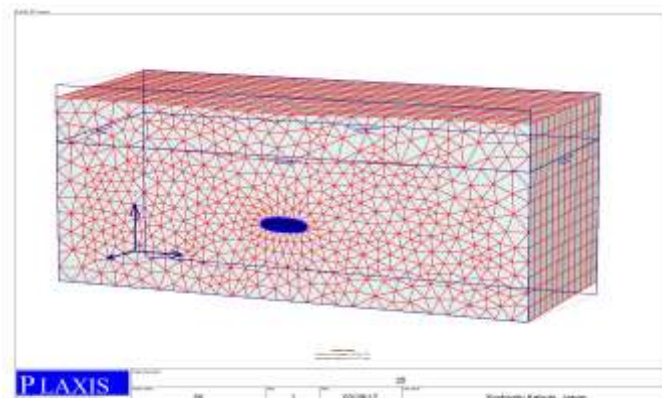
شکل ۳. مش بندی تونل به صورت سه بعدی

#### ۳-۴- بررسی نتایج حاصل از تحلیل

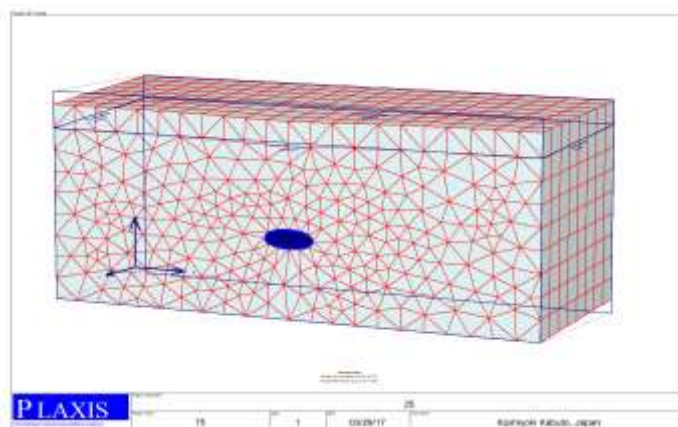
بعد از محاسبه تونل های طراحی شده در حالت های شرح داده شده، مش های تغییر شکل یافته در انتهای فاز محاسباتی، براساس بیشترین تغییر شکل ها، در شکل (۴) نمایش داده شده است. با توجه به حجم زیاد مدل های مورد بررسی، تغییر شکل های تونل با نسبت  $\frac{H}{D} = 2.0$  و نسبت های  $\frac{h}{H} = 0.25, 0.50, 0.75, 1.0$  نمایش داده شده است (شکل ۴) (زارعی فرد، ۱۳۹۲).



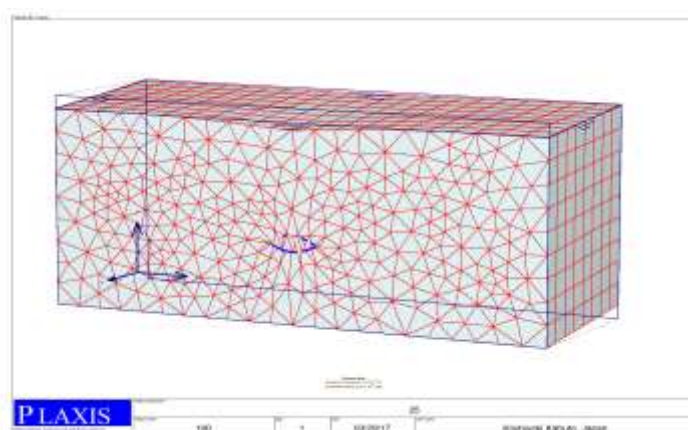
الف- تونل با نسبت  $\frac{h}{H} = 0.25$



ب- تونل با نسبت  $\frac{h}{H} = 0.50$



ج- تونل با نسبت  $\frac{h}{H} = 0.75$



د- تونل با نسبت  $\frac{h}{H} = 1.0$

شکل ۴. تغییر شکل تونل نسبت  $\frac{H}{D} = 2.0$  و نسبت های متفاوت تراز آب به سر بار

همانگونه که در شکل (۴) نمایش داده شده است، با افزایش نسبت تراز سطح آب به سربار تونل ( $\frac{h}{H}$ )، تغییر شکل کلی تونل با روند نزولی داشته است. به عبارت دیگر با نزدیک شدن تراز سطح آب زیر زمینی به سطح زمین، تغییر شکل تونل های مورد بررسی کاهش یافته است (عبدالمالکی، ۱۳۹۱).

در صورتی که اگر تونل با نسبت  $\frac{h}{H} = 0.25$  با تغییر شکل  $0/119$  میلی متر به عنوان نمونه شاهد لحاظ گردد، با افزایش نسبت تراز سطح آب زیرزمینی به سربار به  $0/5$ ،  $0/75$  و  $1/0$ ، تغییر شکل نمونه ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب  $1/59$ ،  $15/98$  و  $23/95$ ٪ کاهش پیدا کرده است.

## جدول ۲. تنش کل وارده بر تونل تحت اثر فشار و تراوش

	نمونه	تنش کلتونل <sup>2</sup> (kN/mm <sup>2</sup> )		میزان اختلاف (%)
		تحت فشار	تحت فشار و تراوش	
$\frac{H}{D}$	$\frac{h}{H}$			
2.0	0.25	675.27	686.32	<b>1.61</b>
	0.50	654.5	664.06	<b>1.44</b>
	0.75	651.27	652.3	<b>0.16</b>
	1.0	649.04	650.1	<b>0.17</b>
3.0	0.25	936.85	950.49	<b>1.43</b>
	0.50	910.8	918.73	<b>0.86</b>
	0.75	863.01	875.99	<b>1.48</b>
	1.0	837.54	846.04	<b>1.04</b>
4.0	0.25	1.17E+03	1.20E+03	<b>2.5</b>
	0.50	1.16E+03	1.17E+03	<b>0.85</b>
	0.75	1.10E+03	1.12E+03	<b>1.79</b>
	1.0	1.06E+03	1.07E+03	<b>0.93</b>
5.0	0.25	1.48E+03	1.50E+03	<b>1.33</b>
	0.50	1.41E+03	1.43E+03	<b>1.39</b>
	0.75	1.36E+03	1.38E+03	<b>1.45</b>
	1.0	1.29E+03	1.31E+03	<b>1.53</b>

با توجه به نتایج حاصل از جدول (۲)، میزان اختلاف میان تونل ها تحت اثر حالت فشار و حالت فشار و تراوش، با افزایش نسبت  $\frac{H}{D}$  افزایش پیدا می کند، به طوریکه در نسبت  $\frac{H}{D} = 5.0$  میزان اختلاف به طور میانگین  $1/4$ ٪ رسیده است.

نتایج نشان می دهد در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار وارد بر تونل، میزان کرنش برشی بر خلاف کرنش کل که کاهش می یابد، روند کاملاً صعودی را در پیش خواهد گرفت (رحمان نژاد، ۱۳۸۹).

لازم به توضیح است که با توجه به حجم زیاد مدل های مورد بررسی، توزیع تنش های وارده تنها یک نوع تونل با سطوح مختلف تراز سطح آب ( $\frac{h}{H}$ ) نمایش داده شده است (مارنکو، ۲۰۱۲).

از سوی دیگر، تغییر کرنش کل و برشی به دست آمده از اثر تومان فشار و تراوش نتایج نشان می دهد در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش و فشار، کرنش کل روند نزولی و کرنش برشی روند افزایشی را نسبت به صرف لحاظ فشار، پیدا کرده است (جداول ۳ و ۴) (صالح زاده، ۱۳۸۸).

## جدول ۳. کرنش کل تونل تحت اثر فشار و تراوش

$\frac{H}{D}$	نمونه $\frac{h}{H}$	کرنش کلتونل* $10^{-3}$ (%)		میزان اختلاف (%)
		تحت فشار	تحت فشار و تراوش	
2.0	0.25	3.85	3.4	<b>11.69</b>
	0.50	3.42	3.14	<b>8.19</b>
	0.75	2.76	2.72	<b>1.45</b>
	1.0	2.5	2.47	<b>1.2</b>
3.0	0.25	4.52	4.46	<b>1.33</b>
	0.50	4.19	4.13	<b>1.43</b>
	0.75	3.75	3.7	<b>1.33</b>
	1.0	3.4	3.35	<b>1.47</b>
4.0	0.25	5.19	5.09	<b>1.9</b>
	0.50	5.18	5.16	<b>0.39</b>
	0.75	4.7	4.69	<b>0.21</b>
	1.0	4.18	4.16	<b>0.48</b>
5.0	0.25	8.99	7.49	<b>16.69</b>
	0.50	7.83	6.7	<b>14.43</b>
	0.75	6.61	5.96	<b>9.84</b>
	1.0	5.75	5.27	<b>8.35</b>

همانگونه نتایج به دست آمده از جداول (۳) و (۶) نشان می دهد، میزان اختلاف کرنش کل و کرنش برشی میان تونل ها تحت اثر حالت فشار و تراوش، با افزایش نسبت  $\frac{H}{D}$  افزایش پیدا می کند، به طوریکه در نسبت  $\frac{H}{D} = 5.0$  میزان اختلاف در کرنش کل و کرنش برشی به ترتیب حدودا  $12/33\%$  و  $3/30\%$  رسیده است (عبدالمالکی، ۲۰۱۳).

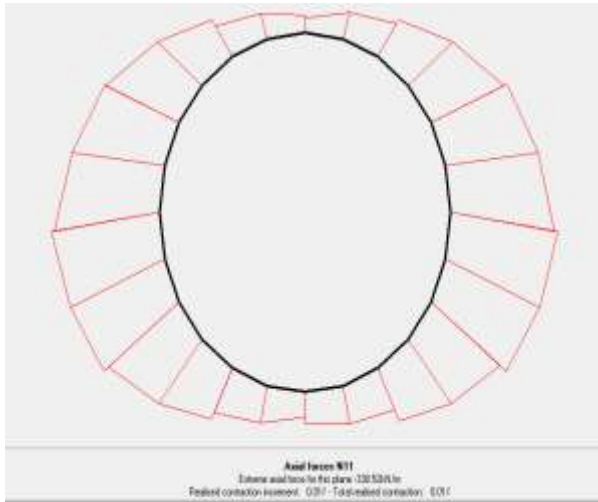
## جدول ۴. کرنش برشی تونل تحت اثر فشار و تراوش

$\frac{H}{D}$	نمونه $\frac{h}{H}$	کرنش برشیتونل* $10^{-3}$ (%)		میزان اختلاف (%)
		تحت فشار	تحت فشار و تراوش	
2.0	0.25	4.71	4.84	<b>2.69</b>
	0.50	4.35	4.47	<b>2.69</b>
	0.75	3.83	3.86	<b>0.77</b>
	1.0	3.45	3.48	<b>0.86</b>
3.0	0.25	6.41	6.49	<b>1.23</b>
	0.50	5.81	5.86	<b>0.85</b>
	0.75	5.25	5.27	<b>0.37</b>
	1.0	4.69	4.74	<b>1.05</b>
4.0	0.25	8	8.3	<b>3.61</b>
	0.50	7.33	7.49	<b>2.14</b>
	0.75	6.59	6.71	<b>1.79</b>
	1.0	5.83	5.94	<b>1.85</b>
5.0	0.25	10.85	11.27	<b>3.72</b>
	0.50	9.51	9.85	<b>3.45</b>
	0.75	8.52	8.82	<b>3.40</b>
	1.0	5.52	5.67	<b>2.64</b>

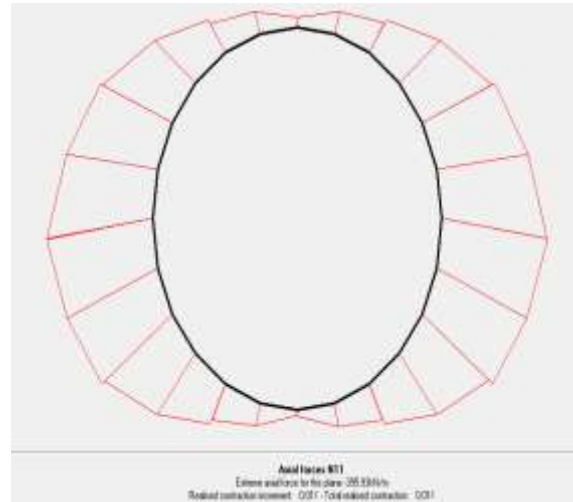


در شکل (۵) نمودار نیروهای محوری تونل های مورد مطالعه به ترتیب تحت اثر فشار و فشار و تراوش توامان قابل مشاهده است. نتایج نشان می دهد در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار وارد بر تونل، میزان نیروهای وارده روند کاهشی به خود گرفته است. همچنین با افزایش تراز سطح آب زیر زمینی، بر خلاف روند افزایشی که نیروی داخلی تحت اثر زیاد شدن نسبت  $\frac{H}{D}$  پیدا می کند، نیروی محوری کاهش یافته است (رحمان نژاد، ۱۳۸۹).

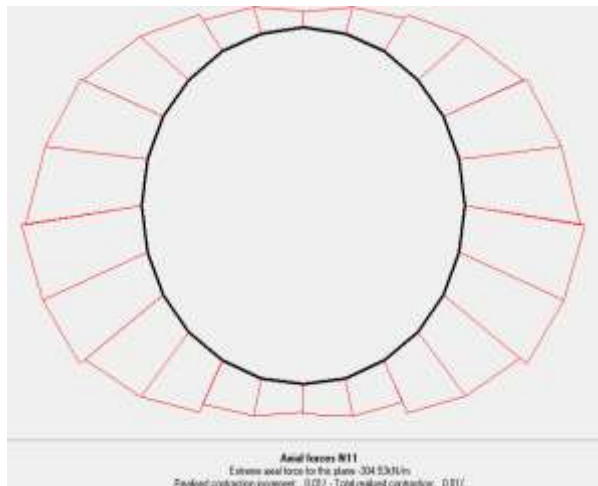
با توجه به حجم زیاد مدل های مورد بررسی، نمودار نیروی محوری تونل با  $\frac{H}{D} = 5.0$  در سطوح مختلف تراز سطح آب  $(\frac{h}{H})$  نمایش داده شده است.



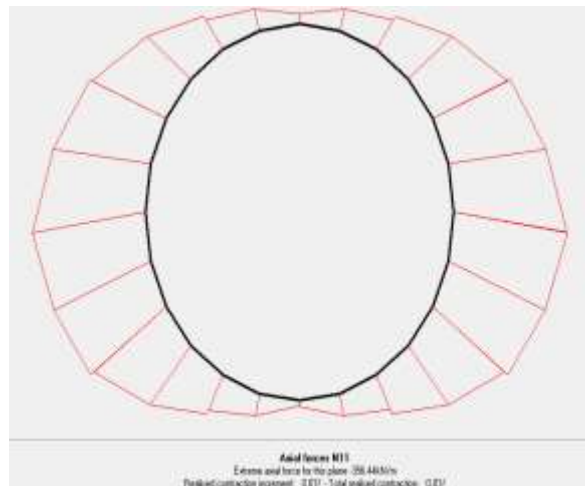
ب- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.25$



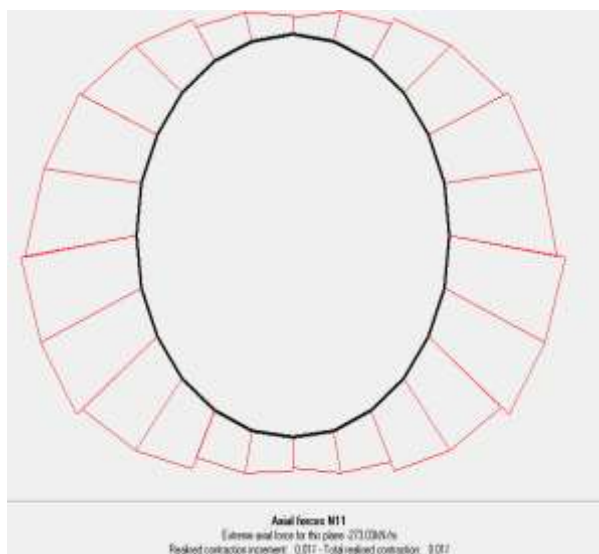
الف- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.25$



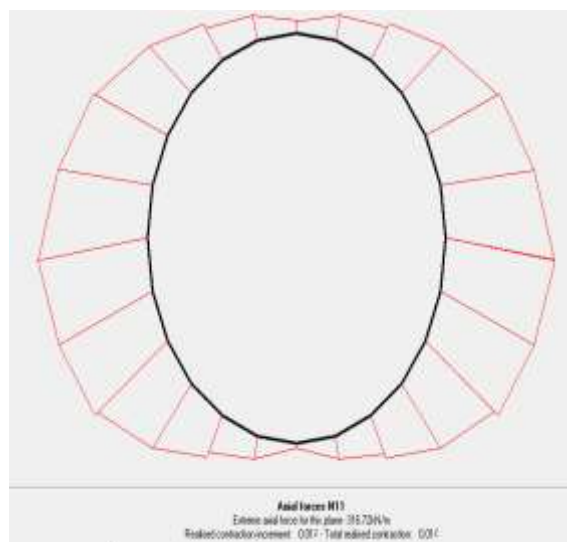
د- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.50$



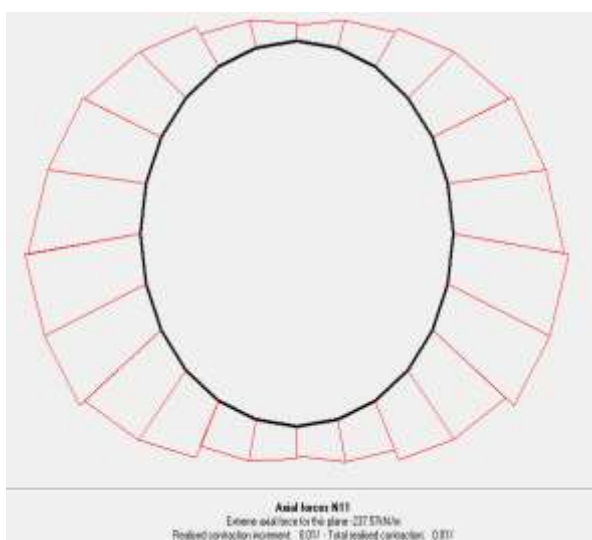
ج- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.50$



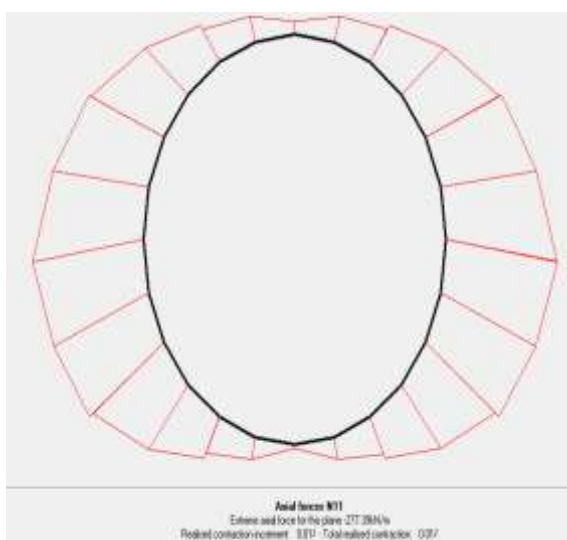
و- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.75$



ه- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.75$



ح- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 1.0$

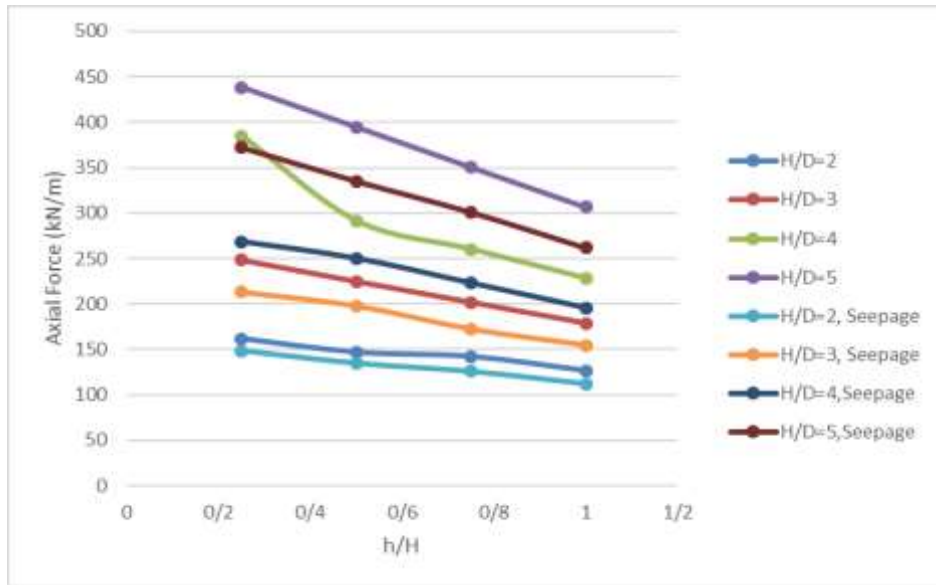


ز- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 1.0$

شکل ۵. نیروی محوری تونل نسبت  $\frac{H}{D} = 5.0$  و نسبت های متفاوت تراز آب به سر بار

در ادامه در شکل (۶)، نیروی محوری تونل ها تحت اثر فشار و تراوش و فشار به صورت نمودار میله ای تونل های در حالت های مورد بررسی مقایسه شده است (جدول ۵) (ویلیام<sup>۱</sup>، ۱۹۹۷)

<sup>۱</sup> Williams



شکل ۶. نمودار مقایسه ای نیروی محوری تونل

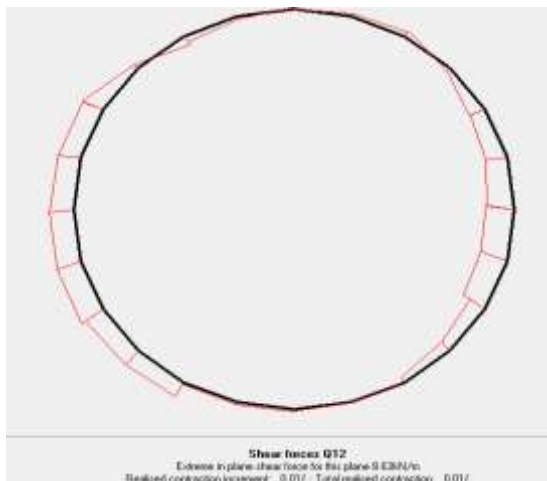
در جدول (۵)، نیروی محوری تونل در دو حالت تحت اثر فشار و تراوش و فشار توامان و میزان اختلاف آن ها با تغییر تراز آب زیر زمینی و عمق تونل آمده است.

جدول ۵. نیروی محوری تونل تحت اثر فشار و تراوش

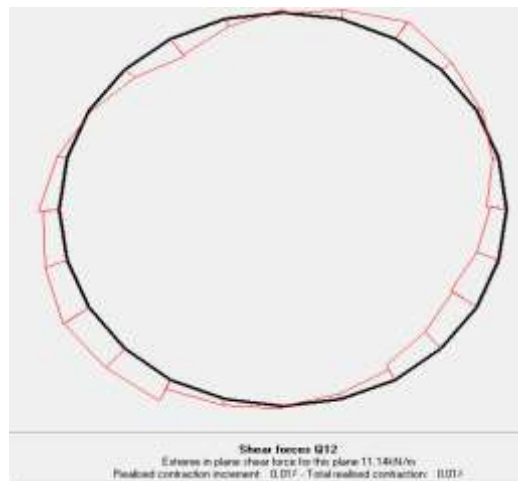
$\frac{H}{D}$	نمونه $\frac{h}{H}$	نیروی محوری تونل (kN/m)		میزان اختلاف (%)
		تحت فشار	تحت فشار و تراوش	
2.0	0.25	161.52	148.53	<b>8.04</b>
	0.50	146.74	134.73	<b>8.18</b>
	0.75	142.08	125.66	<b>11.56</b>
	1.0	126.64	112.08	<b>11.49</b>
3.0	0.25	248.67	213.09	<b>14.31</b>
	0.50	224.97	197.9	<b>12.03</b>
	0.75	201.74	172.37	<b>14.56</b>
	1.0	178.56	154.65	<b>13.39</b>
4.0	0.25	384.93	268.16	<b>30.33</b>
	0.50	291.39	249.88	<b>14.24</b>
	0.75	260.11	222.92	<b>14.29</b>
	1.0	228.27	195.86	<b>14.19</b>
5.0	0.25	438.29	372	<b>15.12</b>
	0.50	394.51	335.1	<b>15.06</b>
	0.75	350.38	300.86	<b>14.13</b>
	1.0	306.62	261.74	<b>14.63</b>

در شکل (۷) نمودار نیروهای برشی تونل های مورد مطالعه به ترتیب تحت اثر فشار و فشار و تراوش توامان قابل مشاهده است. نتایج نشان می دهد در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار وارد بر تونل، میزان نیروهای وارده روند کاهشی به خود

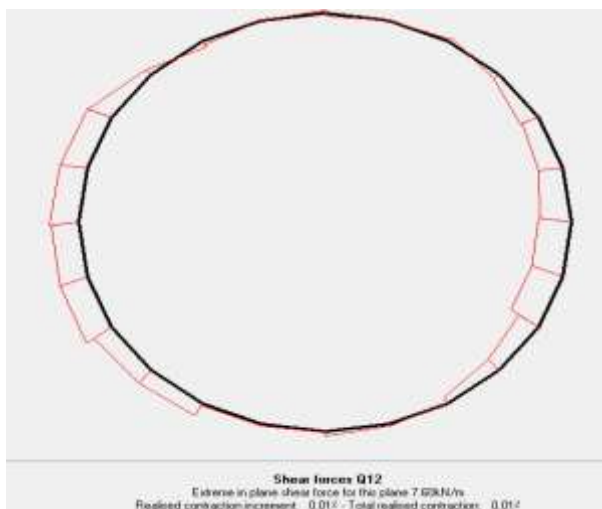
گرفته است. همچنین با افزایش تراز سطح آب زیر زمینی، بر خلاف روند افزایشی که نیروی برشی تحت اثر زیاد شدن نسبت  $\frac{H}{D}$  پیدا می کند، نیروی برشی کاهش یافته است. نمودار نیروی برشی تونل با  $\frac{H}{D} = 5.0$  در سطوح مختلف تراز سطح آب ( $\frac{h}{H}$ ) در شکل (۷) نمایش داده شده است (انجمن تونل ایران، ۱۳۹۳).



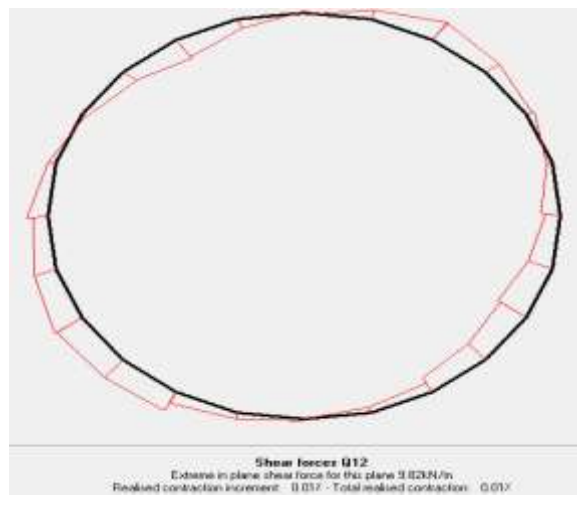
ب- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.25$



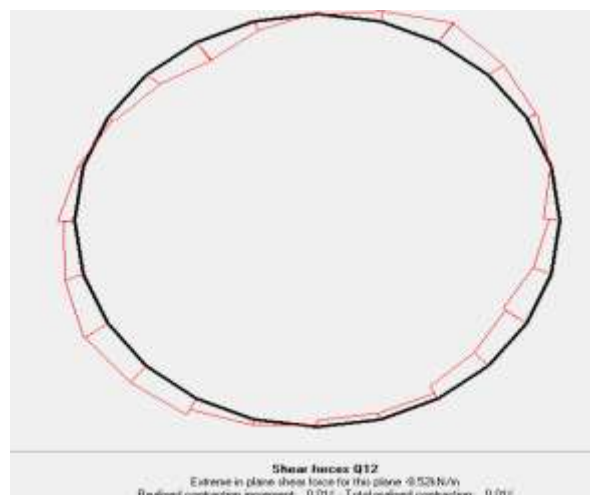
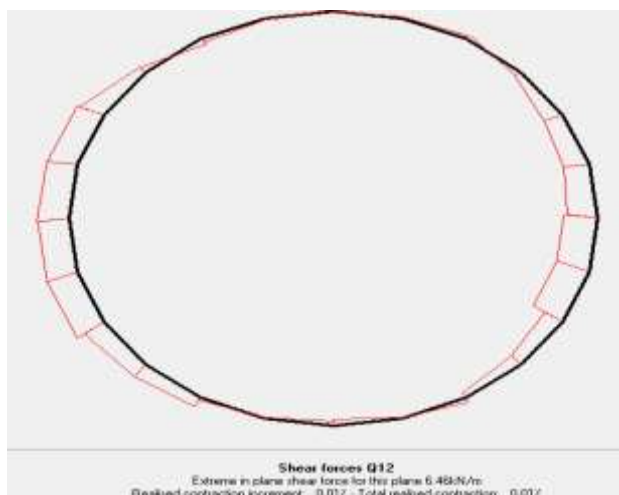
الف- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.25$



د- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.50$

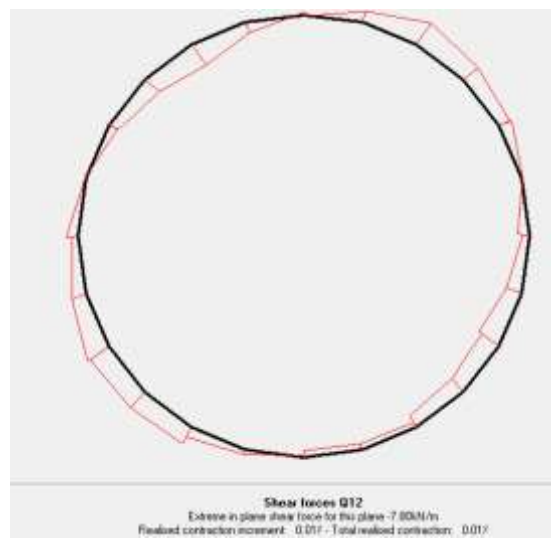
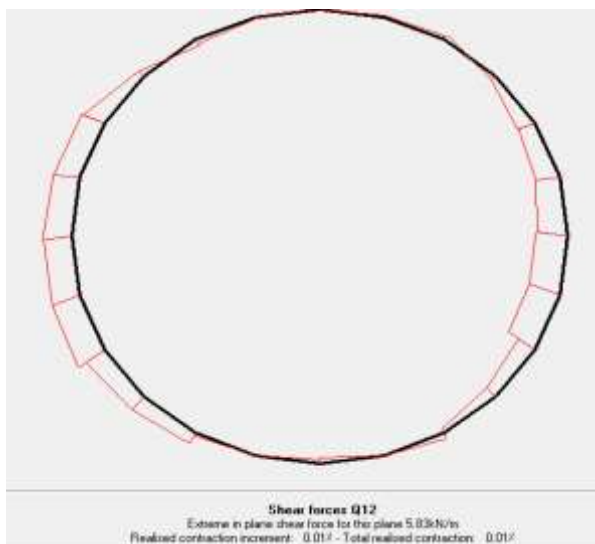


ج- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.50$



و- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.75$

ه- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.75$

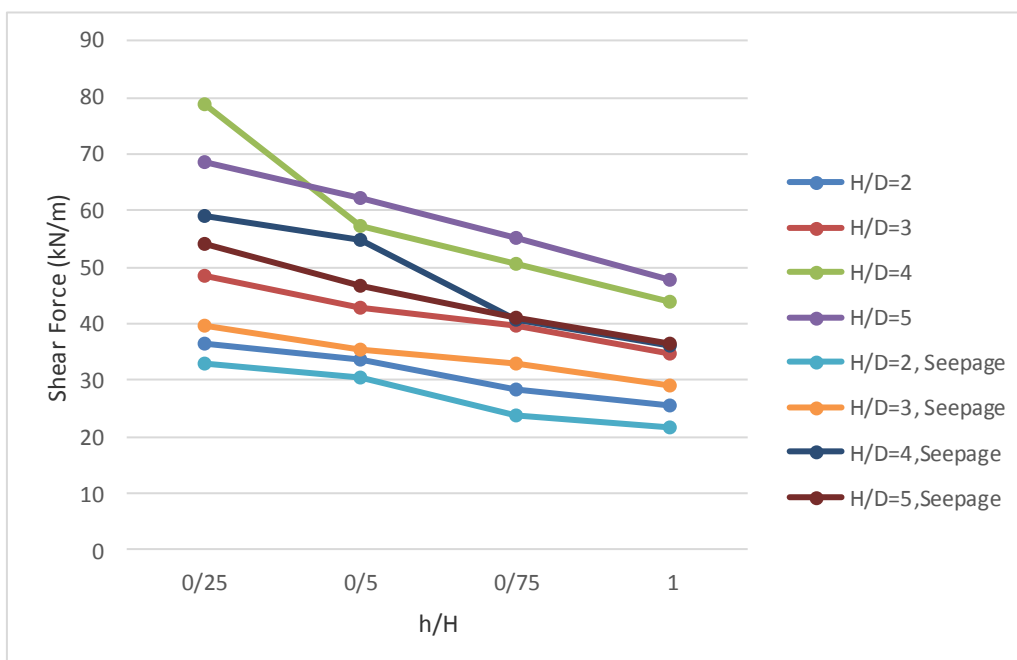


ح- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 1.0$

ز- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 1.0$

شکل ۶. نیروی برشی تونل نسبت  $\frac{H}{D} = 5.0$  و نسبت های متفاوت تراز آب به سرپار

در ادامه در شکل (۷)، نیروی برشی تونل ها تحت اثر فشار و تراوش و فشار به صورت نمودار خطی تونل های در حالت های مورد بررسی، مقایسه شده است.



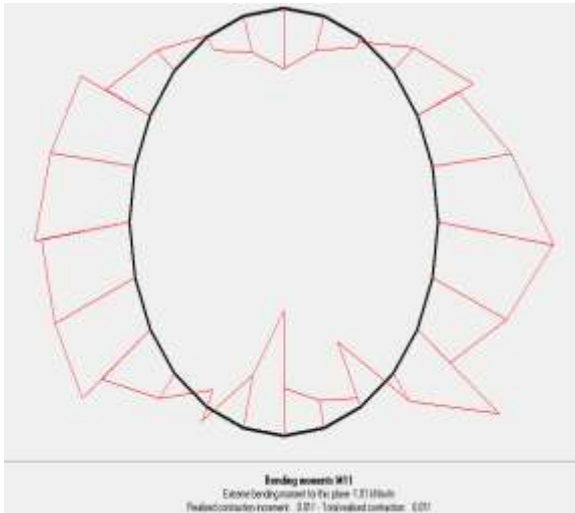
شکل ۷. نمودار مقایسه ای نیروی برشی تونل

در جدول (۶)، نیروی برشی تونل در دو حالت تحت اثر فشار و تراوش و فشار توامان و میزان اختلاف آن ها با تغییر تراز آب زیر زمینی و عمق تونل آمده است (صالح زاده، ۱۳۸۸).

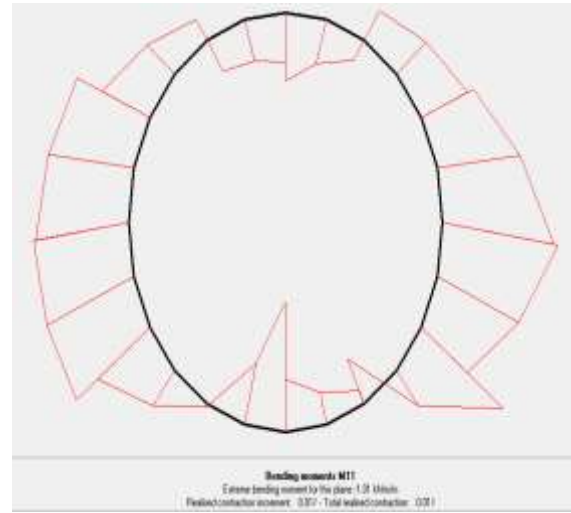
جدول ۶. نیروی برشی تونل تحت اثر فشار و تراوش

$\frac{H}{D}$	نمونه $\frac{h}{H}$	نیروی برشیتونل (kN/m)		میزان اختلاف (%)
		تحت فشار	تحت فشار و تراوش	
2.0	0.25	36.54	32.97	<b>9.71</b>
	0.50	33.73	30.52	<b>9.52</b>
	0.75	28.23	23.79	<b>15.73</b>
	1.0	25.59	21.68	<b>15.28</b>
3.0	0.25	48.59	39.5	<b>18.71</b>
	0.50	42.84	35.34	<b>17.51</b>
	0.75	39.5	32.86	<b>16.81</b>
	1.0	34.78	28.97	<b>16.71</b>
4.0	0.25	78.85	58.93	<b>25.26</b>
	0.50	57.22	54.87	<b>4.11</b>
	0.75	50.52	40.67	<b>19.49</b>
	1.0	43.81	36.14	<b>17.51</b>
5.0	0.25	68.57	54.21	<b>20.94</b>
	0.50	62.14	46.73	<b>24.79</b>
	0.75	55.08	40.94	<b>25.67</b>
	1.0	47.78	36.5	<b>23.61</b>

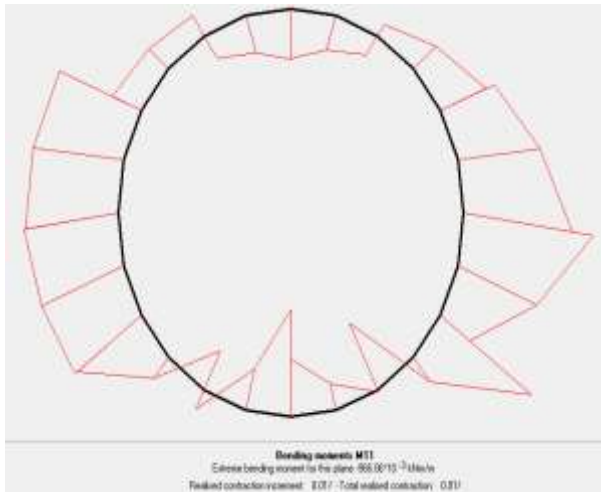
در شکل (۸) نمودار لنگر خمشی تونل های مورد مطالعه به ترتیب تحت اثر فشار و فشار و تراوش توامان قابل مشاهده است. نتایج نشان می دهد در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار وارد بر تونل، میزان لنگر خمشی وارده روند کاهشی به خود گرفته است. همچنین با افزایش تراز سطح آب زیر زمینی، بر خلاف روند افزایشی که لنگر خمشی تحت اثر زیاد شدن نسبت  $\frac{H}{D}$  پیدا می کند، لنگر خمشی کاهش یافته است. نمودار لنگر خمشی تونل با  $\frac{H}{D} = 5.0$  در سطوح مختلف تراز سطح آب ( $\frac{h}{H}$ ) در شکل (۸) نمایش داده شده است.



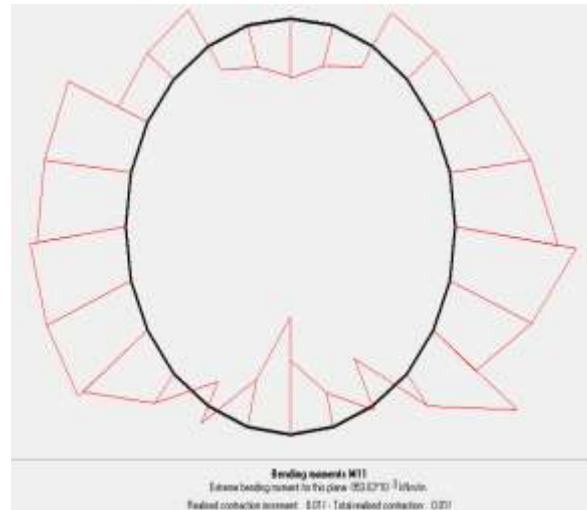
ب- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.25$



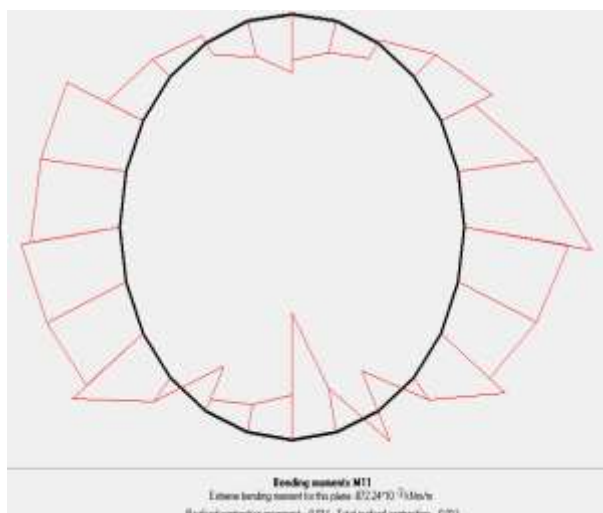
الف- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.25$



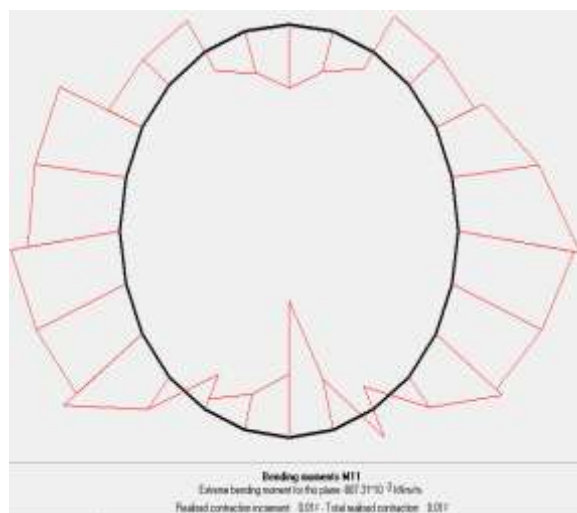
د- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.50$



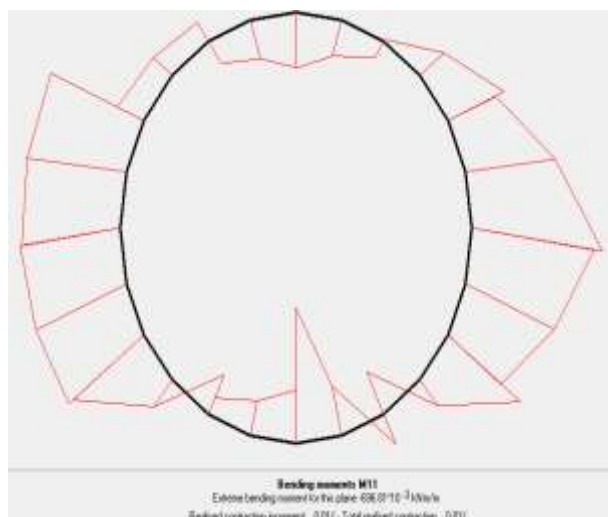
ج- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.50$



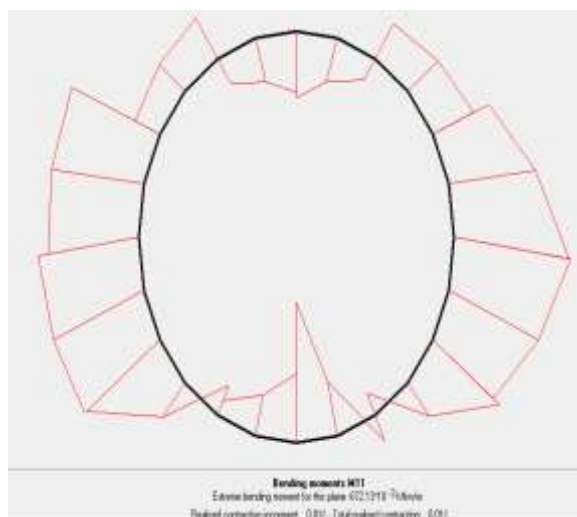
و- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.75$



ه- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.75$



ح- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 1.0$

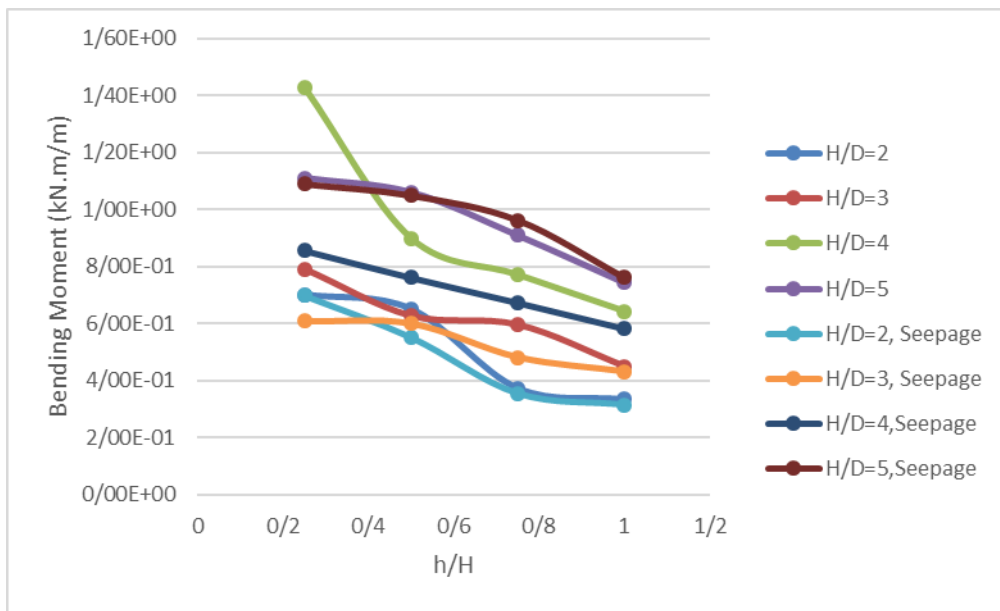


ز- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 1.0$

شکل ۸. لنگر خمشی تونل نسبت  $\frac{H}{D} = 5.0$  و نسبت های متفاوت تراز آب به سر بار

در ادامه در شکل (۹)، نیروی برشی تونل ها تحت اثر فشار و تراوش و فشار به صورت نمودار خطی تونل های در حالت های مورد بررسی مقایسه شده است (احمدوند، ۱۳۹۲).





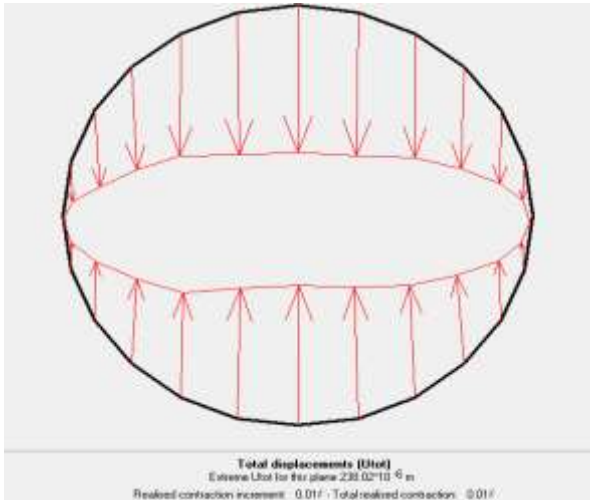
شکل ۹. نمودار مقایسه ای لنگر خمشی تونل

در جدول (۷)، لنگر خمشی تونل در دو حالت تحت اثر فشار و تراوش و فشار توامان و میزان اختلاف آن ها با تغییر تراز آب زیر زمینی و عمق تونل آمده است (انجمن تونل ایران، ۱۳۹۳).

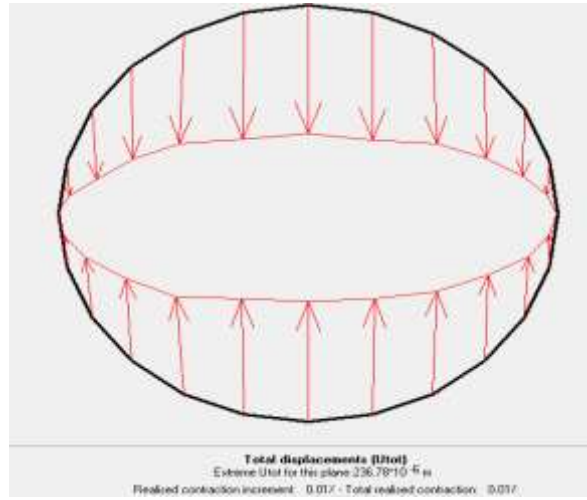
جدول ۷. لنگر خمشی تونل تحت اثر فشار و تراوش

$\frac{H}{D}$	نمونه $\frac{h}{H}$	لنگر خمشی تونل (Kn.m/m)		میزان اختلاف (%)
		تحت فشار	تحت فشار و تراوش	
2.0	0.25	7.03E-01	6.98E-01	<b>0.62</b>
	0.50	6.52E-01	5.52E-01	<b>15.4</b>
	0.75	3.74E-01	3.55E-01	<b>5</b>
	1.0	3.35E-01	3.16E-01	<b>5.69</b>
3.0	0.25	7.91E-01	6.09E-01	<b>23.1</b>
	0.50	6.27E-01	6.01E-01	<b>4.11</b>
	0.75	5.95E-01	4.82E-01	<b>19</b>
	1.0	4.49E-01	4.32E-01	<b>3.69</b>
4.0	0.25	1.43E+00	8.58E-01	<b>40</b>
	0.50	9.00E-01	7.63E-01	<b>15.2</b>
	0.75	7.72E-01	6.74E-01	<b>12.6</b>
	1.0	6.44E-01	5.83E-01	<b>9.38</b>
5.0	0.25	1.11E+00	1.09E+00	<b>1.80</b>
	0.50	1.06E+00	1.05E+00	<b>9.43</b>
	0.75	9.63E-01	9.10E-01	<b>5.83</b>
	1.0	7.62E-01	7.45E-01	<b>2.22</b>

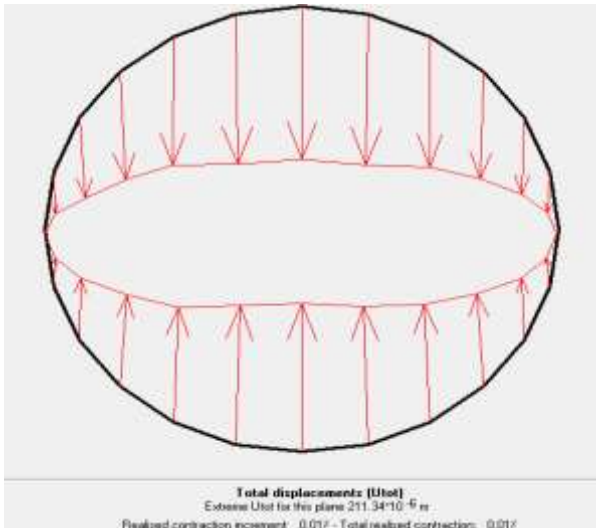
در شکل (۱۰) نمودار تغییر مکان قسمت جلویی تونل های مورد مطالعه به ترتیب تحت اثر فشار و فشار و تراوش توامان قابل مشاهده است. نتایج نشان می دهد در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار وارد بر تونل، میزان تغییر مکان وارده روند کاهشی به خود گرفته است. همچنین با افزایش تراز سطح آب زیر زمینی، بر خلاف روند افزایشی که تغییر مکان تحت اثر زیاد شدن نسبت  $\frac{h}{D}$  پیدا می کند، تغییر مکان کاهش یافته است. نمودار تغییر مکان تونل با  $\frac{H}{D} = 5.0$  در سطوح مختلف تراز سطح آب ( $\frac{h}{H}$ ) در شکل (۹) نمایش داده شده است (عبدالمالکی، ۱۳۹۱).



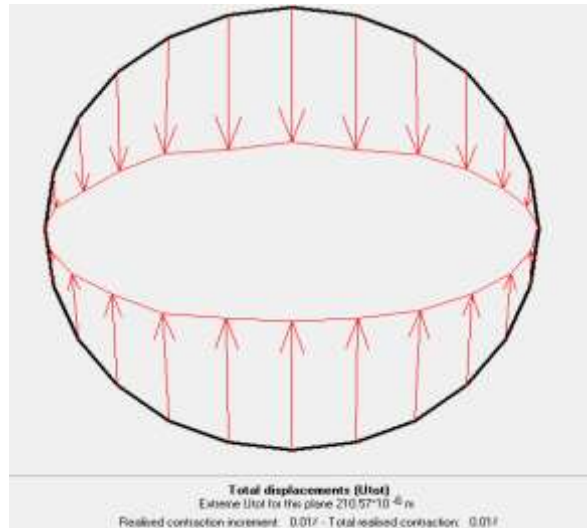
ب- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.25$



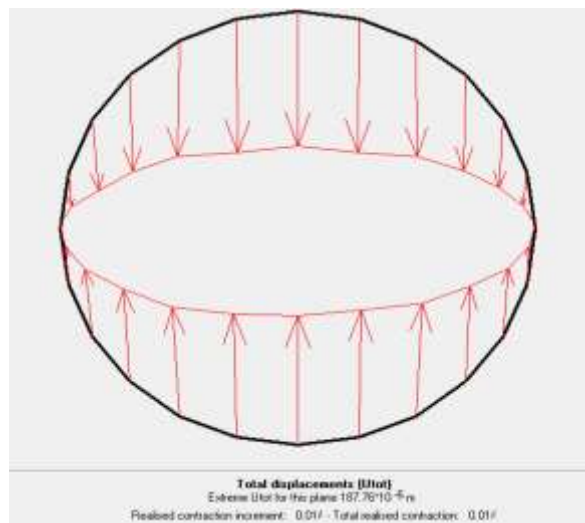
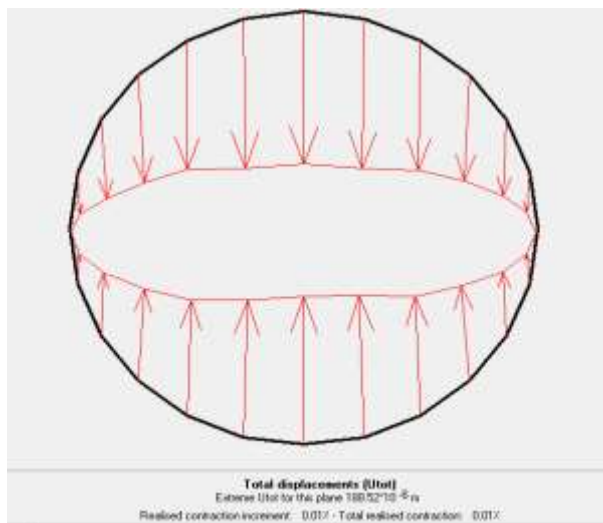
الف- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.25$



د- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.50$

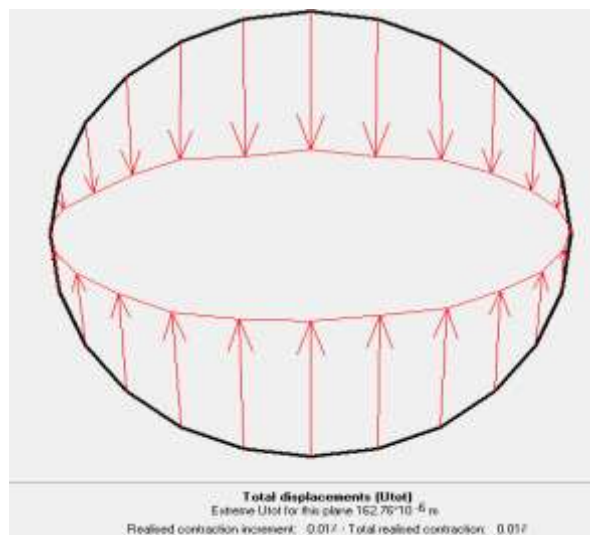
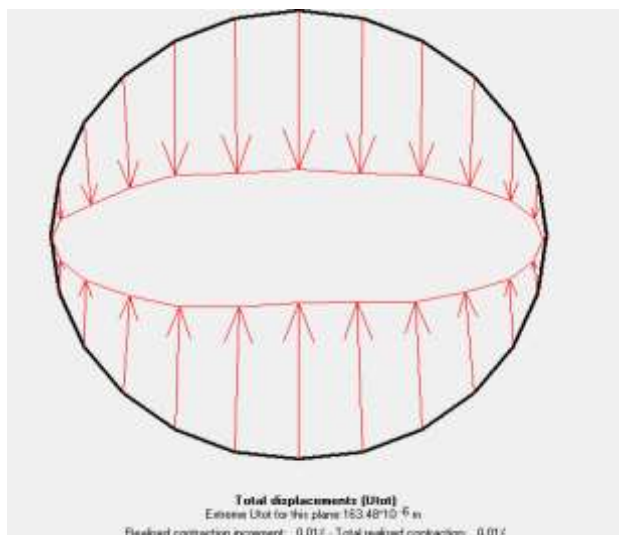


ج- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.50$



و- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 0.75$

ه- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 0.75$



ح- تونل تحت فشار و تراوش  $\frac{h}{H} = 1.0$

ز- تونل تحت فشار  $\frac{h}{H} = 1.0$

شکل ۱۰. تغییر مکان قسمت جلوی تونل با نسبت  $\frac{H}{D} = 5.0$  و نسبت های متفاوت تراز آب به سربرار

### ۵- نتیجه گیری

در این تحقیق ابتدا به ارزیابی نتایج حاصل از تحلیل اجزاء محدود تونل های تحت فشار همچون تغییر شکل (تغییر مکان) و تنش های وارده بر نمونه ها بر مبنای تغییر میزان تراز سطح آب زیر زمینی و سربرار تونل پرداخته شد، سپس کرنش کلی، کرنش برشی و در نهایت نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی نمونه های مورد مطالعه و عملکرد میخ ها و دیواره ها بر اساس

تغییرات نسبت ارتفاع سربرار به قطر تونل ( $\frac{H}{D}$ ) و نسبت تراز آب زیر زمینی به ارتفاع سربرار تونل ( $\frac{h}{H}$ ) مورد بررسی قرار گرفت. نتایج به دست آمده نشان دادند که:

- با افزایش نسبت تراز سطح آب به سربرار تونل ( $\frac{h}{H}$ )، تغییر شکل کلی تونل با روند نزولی داشته است. به عبارت دیگر با نزدیک شدن تراز سطح آب زیر زمینی به سطح زمین، تغییر شکل تونل های مورد بررسی کاهش یافته است.
- اگر تونل با نسبت  $\frac{h}{H} = 0.25$  با تغییر شکل  $0/119$  میلی متر به عنوان نمونه شاهد لحاظ گردد، با افزایش نسبت تراز سطح آب زیرزمینی به سربرار به  $0/5$ ،  $0/75$  و  $1/0$ ، تغییر شکل نمونه ها نسبت به نمونه شاهد به ترتیب  $8/59\%$ ،  $15/98\%$  و  $23/95\%$  کاهش پیدا کرده است.
- در نمونه های با نسبت های متفاوت سربرار به قطر تونل ( $\frac{H}{D}$ )، با افزایش نسبت تراز سطح آب به سربرار تونل ( $\frac{h}{H}$ )، این روند کاهشی مشاهده می گردد. به طوریکه در نسبت  $\frac{H}{D} = 3.0$ ، ماکزیمم کاهش تغییر شکل تونل نسبت به مدل شاهد ( $\frac{h}{H} = 0.25$ )،  $32/04\%$  می باشد. همچنین در نسبت های  $\frac{H}{D} = 4.0, 5.0$ ، بیشترین تغییر شکل نسبت به مدل اولیه به ترتیب برابر  $36/12\%$  و  $32/05\%$  می باشد.
- با افزایش نسبت سربرار به قطر تونل ( $\frac{H}{D}$ )، میزان تغییر شکل ها به دست آمده روند افزایشی را طی خواهد کرد. به گونه ای که در تونل با نسبت  $\frac{h}{H} = 0.25$ ، با افزایش نسبت عمق تونل به  $3$ ،  $4$  و  $5$ ، میزان تغییر شکل یا جابجایی کل آن نسبت به مدل با نسبت عمق  $2$ ، به ترتیب  $33/48\%$ ،  $50/98\%$  و  $61/96\%$  افزایش پیدا کرده است.
- نتایج نشان می دهد میزان اختلاف تغییر شکل ها میان تونل ها تحت اثر حالت فشار و حالت فشار و تراوش، با افزایش نسبت  $\frac{H}{D}$  افزایش پیدا می کند، به طوریکه در نسبت  $\frac{H}{D} = 5.0$  میزان اختلاف به حدود  $11\%$  رسیده است. همچنین در صورت افزایش یافتن  $\frac{h}{H}$  از  $0/5$  به  $1/0$ ، میزان اختلاف تغییر شکل ها روند صعودی به خود گرفته است.
- با توجه به نتایج حاصله، در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش و فشار، تنش کل نسبت به صرف لحاظ فشار، افزایش پیدا کرده است. به طوریکه میزان اختلاف تنش های وارده بر تونل ها تحت اثر حالت فشار و حالت فشار و تراوش، با افزایش نسبت  $\frac{H}{D}$  افزایش پیدا می کند، به طوریکه در نسبت  $\frac{H}{D} = 5.0$  میزان اختلاف به طور میانگین  $1/4\%$  رسیده است.
- نتایج نشان می دهد در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش و فشار، کرنش کل روند نزولی و کرنش برشی روند افزایشی را نسبت به صرف لحاظ فشار، پیدا کرده است. به طوریکه میزان اختلاف کرنش کل و کرنش برشی میان تونل ها تحت اثر حالت فشار و حالت فشار و تراوش، با افزایش نسبت  $\frac{H}{D} = 5.0$  میزان اختلاف در کرنش کل و کرنش برشی به ترتیب حدودا  $12/33\%$  و  $3/30\%$  رسیده است.
- در صورت در نظر گرفتن اثر تراوش همراه با فشار وارد بر تونل، میزان نیروهای محوری، برشی و لنگر خمشی وارده بر تونل ها روند کاهشی به خود گرفته است. همچنین با افزایش تراز سطح آب زیر زمینی، بر خلاف روند افزایشی که نیروها تحت اثر زیاد شدن نسبت  $\frac{H}{D}$  پیدا می کند، نیروی محوری، برشی و لنگر خمشی کاهش یافته است.

#### ۵-۱-پیشنهادهات

در همین راستا، در حوزه مطالعات انجام شده در این پژوهش پیشنهادهات زیر برای انجام تحقیقات آتی ارائه می گردد:

- ارزیابی و طراحی هندسی بهینه تونل های انتقال آب با در نظر گرفتن کاهش مقاومت زمین.
- ارزیابی تاثیر تراز سفره آب زیرزمینی در حفاری تونل های شهری بر روی میزان نشست سطحی زمین.
- بررسی عوامل موثر بر توزیع فشار آب حفره ای در پوشش تونل دایروی عمیق دارای سیستم زهکشت تحت تراوش پایدار.

## مراجع:

۱. انجمن تونل ایران، ۱۳۹۳، نشریه انجمن تونل ایران، شماره ۲۲.
۲. رحمان نژاد، رضا، ۱۳۸۹، طراحی تونل های تحت فشار با در نظر گرفتن نفوذپذیری بتن و اندرکنش توده سنگ و سازه، دانشگاه شهید باهنر کرمان.
۳. صالح زاده، حسین، ۱۳۸۸، مهندسی و طراحی تونل و شفت در سنگ، قرارگاه سازندگی خاتم الانبیا (ص)، قرب نوح (ع).
۴. فهیمی فر، احمد؛ حامد قدمی و مسعود احمدوند، ۱۳۹۳، تحلیل الاستوپلاستیک تونل های زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن اثر تراوش، پژوهشنامه حمل و نقل ۱۱- (۱).
۵. فهیمی فر، احمد؛ حامد قدمی؛ آروین عبدالمالکی و مسعود احمدوند، ۱۳۹۱، مدلی تحلیلی عددی با در نظر گرفتن تراوش و اندرکنش هیدرولیکی- مکانیکی برای تونل های تحت فشار، دومین کنفرانس ملی یافته های نوین در مهندسی عمران، نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد.
۶. فهیمی فر، احمد؛ حامد قدمی؛ مجتبی نوری و مسعود احمدوند، ۱۳۹۲، بررسی مدل های مختلف تراوش و فشار آب حفره ای در تونل های حفاری شده در زیر سطح آب زیرزمینی، اولین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک، اردبیل، دانشگاه محقق اردبیلی.
۷. فهیمی فر، احمد؛ حامد قدمی؛ مسعود احمدوند و آروین عبدالمالکی، ۱۳۹۱، ارائه مدلی جدید برای تراوش و فشار آب منفذی در تونل های تحت فشار زیر سطح آب زیرزمینی با در نظر گرفتن کوپل هیدرومکانیکی توده سنگ، دومین کنفرانس ملی سازه، زلزله و ژئوتکنیک، بابل سر، موسسه آموزش عالی پردیسان.
۸. فهیمی فر، احمد؛ حامد قدمی؛ مسعود احمدوند و آروین عبدالمالکی، ۱۳۹۲، مدلی الاستوپلاستیک برای تحلیل تونل تحت فشار نیروگاه کارون چهار با در نظر گرفتن اثر تراوش، هفتمین کنگره ملی مهندسی عمران، زاهدان، دانشگاه سیستان و بلوچستان
۹. فهیمی فر، احمد؛ محمدرضا زارعی فرد، ۱۳۹۲، تحلیل پایداری تونل های تحت فشار زیر سطح آب زیر زمینی با در نظر گرفتن نیروهای تراوش، دهمین کنفرانس ملی تونل، تهران.
۱۰. قدمی، حامد، ۱۳۹۰، تحلیل پایداری تونل های تحت فشار با در نظر گرفتن اثر تراوش، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه تفرش.

11. Bian. K., Xiao. M., Chen. J. 2009. Study on coupled seepage and stress fields in the concrete lining of the underground pipe with high water pressure. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 24. pp. 287-295.
12. Busari, A., O., Marenco., M. 2012. A Finite Element Model for Optimum Design of Plain Concrete Pressure Tunnels under High Internal Pressure. International Journal of Science and Technology. Vol. 1. No. 5. pp. 216-223.
13. Busari., A. O. 2012. Coupled Stress-Seepage Numerical Design of Pressure Tunnels. IAHR-HK Student Research Forum. the Hong Kong Polytechnic University., China.
14. Busari., A.O. 2013. Numerical Coupling of Stress and Seepage in the Design of Pressure Tunnel under to High Internal Water Pressure. International Journal of Engineering and Technology. Vol. 3. No. 3. pp. 235-244.

15. Fahimifar, A., Ghadami., H., Ahmadvand., M., Abdolmaleki., A., 2013. Analysis of Underwater Tunnels Considering Strain-Softening Behavior in Plastic Zone. Tunneling & Underground Space Engineering. Vol. 1. No. 1. pp. 13-28.
16. Perazzelli, P., Leone., T., Anagnostou., G. 2014. Tunnel face stability under seepage flow conditions. Tunnelling and Underground Space Technology. Vol. 43.pp. 459-469.
17. Williams, O. 1997. Engineering and Design Tunnels and Shafts in Rock. Department of the Army.U.S. Army Corps of Engineers.Washington, DC 20314-1000.

# Numerical Evaluation of Pressure and Water Leakage in the Design of Pressure Tunnels

Alireza Pishkari Ahmadabad<sup>1</sup>, Akbar Mokhtarpour<sup>2</sup>, Omid Tavasoli<sup>3</sup>

1. *Islamic Azad University Tehran East- master's Degree-Major: Civil Engineering- Specialty: Water and Hydraulic Structures*

2. *PhD Student, Science and Research Branch, Specialty: Water*

3. *PhD- Specialty: Geotechnics*

---

## Abstract

Pressure tunnels and shafts were initially used in the hydroelectric industry (hydroelectric power plants), but are now used to transport consuming water and waste water. But still the most common use of pressure tunnels and shafts is the design of hydroelectric power plants to transfer water from the upstream to the downstream power plant. In this thesis, in order to clarify the main purpose of the research, which is the numerical evaluation of the effect of pressure and water leakage in the design of pressure tunnels by finite element method using the 3DPLAXIS software, several structural systems of the pressure tunnel with various levels of groundwater and different overheads under the influence of pressure and leakage are modeled and analyzed. A total of 32 models, including 4 overhead height ratio to tunnel diameter (H/D) and 4 groundwater level ratios to tunnel overhead height (h/ H) were analyzed. In this research, firstly, the evaluation of the results of the analysis of the limited components of pressure tunnels such as deformation (displacement) and tensions on samples based on changes in the rate of groundwater level and tunnel overhead were studied, then, the general strain, shear strain and finally the axial , shear forces and bending anchor of the studied samples and the performance of the nails and walls based on changes in the ratio of overhead height to tunnel diameter (H/D) and the ratio of groundwater level to tunnel overhead height (h/H) were studied .

**Keywords:** Underground Tunnel, Pressure, Water Leakage, Finite Element Method, PLAXIS Software.

---