



## مدل سازی و تحلیل دو بعدی خاک - سازه ایستگاه اندشت قطار شهری مشهد با در نظر گرفتن اندرکنش خاک و سازه

رضا محمدنژاد بیدخت<sup>۱</sup>، مصطفی صاحب‌دل<sup>۲</sup>، مرتضی مهمی<sup>۳\*</sup>، دانیال محمدزاده شادمهری<sup>۴</sup>

۱- دانشجوی دکتری مدیریت امور شهری، دانشگاه آزاد اسلامی واحد مشهد

[murl2.rmb@gmail.com](mailto:murl2.rmb@gmail.com)

۲- کارشناسی ارشد عمران، آب و سازه هیدرولیکی، مدرس گروه عمران، موسسه آموزش عالی وحدت تربت جام

[sahebdel@vahdat.ac.ir](mailto:sahebdel@vahdat.ac.ir)

۱- کارشناسی ارشد عمران - زلزله، دانشگاه علم و صنعت ایران

[m.mohemmy@yahoo.com](mailto:m.mohemmy@yahoo.com)

۴- کارشناس ارشد عمران - ژئوتکنیک، دانشگاه فردوسی مشهد، مشاور عالی انجمن مخترعین خراسان رضوی

[dmhz1989@yahoo.com](mailto:dmhz1989@yahoo.com)

### چکیده

احداث خطوط قطار شهری به عنوان یک نیاز اساسی شهرهای بزرگ و در حال توسعه مطرح و احداث تونل در شهرها اجتناب ناپذیر است. به دلیل اهمیت تونل‌های و ایستگاه‌های مترو، این سازه‌ها باید به دقت مورد تحلیل قرار گیرند. در این تحقیق مدل‌سازی و تحلیل دوبعدی توده خاک- سازه ایستگاه اندشت قطار شهری مشهد مورد بررسی قرار می‌گیرد. به منظور مدل‌سازی دو بعدی از روش هشاش و اندرکنش تغییر مکان استفاده می‌شود. که پس از محاسبه دوران میدان آزاد و اعوجاج جانبی توده خاک، این دوران در نرم افزار اجزا محدود PLAXIS به توده خاک وارد شده و در نهایت کانتورهای تنش، تغییر مکان و همچنین نمودار لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری سازه بدست آمده است.

واژگان کلیدی: مدل‌سازی، توده خاک- سازه، PAXIS، ایستگاه، قطار شهری مشهد



## ۱- مقدمه

امروزه به دلیل گسترش شهرها و افزایش جمعیت شهری، نیاز بیشتری به وسایل حمل و نقل عمومی احساس می‌شود. در بین وسایل حمل و نقل عمومی، شبکه قطار شهری جایگاه ویژه‌ای دارد. احداث مترو به روش سطحی هزینه کمتری دارد؛ اما به دلیل افزایش تراکم سطحی، تردد خودروها و کمبود فضا، خطوط مترو بیشتر به صورت زیرزمینی ساخته می‌شوند. از طرفی به علت عمق کم تونل‌ها و ایستگاه‌های زیرزمینی مترو معمولاً در زمینهای نرم (خاکهای سست سطحی) احداث می‌شوند. بنابراین، اجرای بهینه و تامین ایمنی اینگونه فضاهای زیرزمینی در هنگام ساخت و پایداری دراز مدت آنها از جمله عواملی است که باید توسط طراحان سازه‌های زیرزمینی مورد توجه قرار گیرد. در میان این سازه‌های زیرزمینی تونل‌های حمل و نقل از اهمیت بسیار زیادی برخوردار می‌باشند. تا قبل سال 1995 تونل‌ها در مقابل بارهای دینامیکی طراحی نمی‌شدند. اما زلزله‌های دهه ۱۹۹۰ میلادی باعث خرابی‌های جدی در برخی تونل گردیدند. که بعنوان مثال می‌توان به زلزله سال 1999 Chi chi تایوان و خسارت وارده به تونل‌های کوهستانی مرکز تایوان، زلزله سال 1999 Duzce ترکیه که باعث خرابی بخشی از تونل‌های دوقلوی Bolu گردید و ریزش ایستگاه Diakia متروی Kobe ژاپن در سال 1995 اشاره کرد [1]. شارما (Sharma) و جوود (Judd) در سال 1990 [2]، 192 مورد گزارش رفتار سازه‌های زیرزمینی را در برابر 85 زلزله در سراسر جهان مورد بررسی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که آسیب پذیری یک سازه زیر زمینی را می‌توان بر حسب عمق روباره و پارامترهای زلزله منطقه ارزیابی نمود. همچنین آسیب دیدگی و خرابی تونل‌ها با افزایش عمق روباره کاهش می‌یابد [1]. هشاش (Hashash) در سال 2001 در مقاله‌اش به این نکته مهم اشاره نمود که سازه تونل باید از نظر شکل پذیری و مقاومت در برابر اثرات زلزله بررسی شود. همچنین برای تامین شکل پذیری کافی در پوشش تونل در هنگام زلزله، فاکتور کاهش نیرو معادل شکل پذیری در تونل است [3]. در این تحقیق به مدل‌سازی دو بعدی ایستگاه‌های قطار شهری مشهد به روش هشاش و اندرکنش تغییر مکان در دوسطح زلزله و در نرم‌افزار PLAXIS پرداخته می‌شود، و نتایج تحلیل دو بعدی بصورت کانتورهای تغییر مکان و تنش و همچنین منحنی‌های لنگر خمشی نیروی برشی و نیروی محوری ارائه می‌گردد.

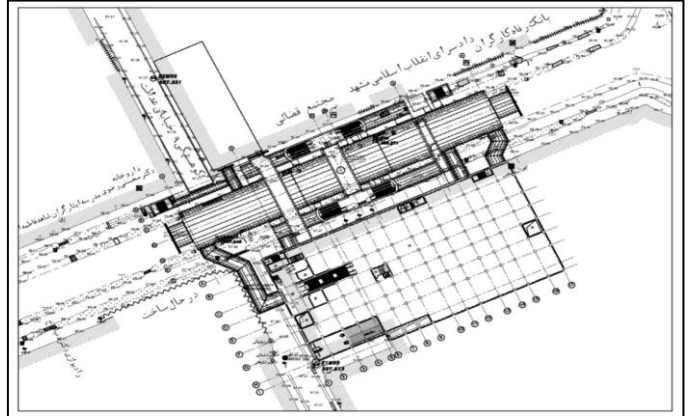
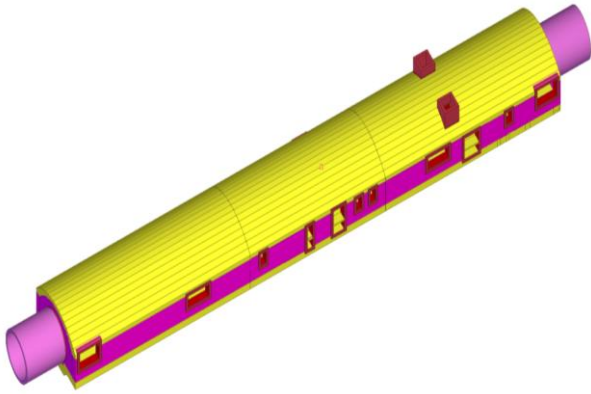
## ۲- معرفی ایستگاه

مسیر خط 2 قطار شهری مشهد از انتهای بلوار طبرسی شمالی تا جنوب میدان فضل بن شاذان جمعاً به طول 12.985 کیلومتر کشیده شده است. شیب عمومی زمین از سمت جنوب به سمت شمال است. ایستگاه‌های قطار در حد فاصل میدان الندشت و خیابان کوهسنگی نهم (عدالت) واقع شده است و موقعیت محلی آن در میدان الندشت شهر مشهد بوده و دهمین ایستگاه از 12 ایستگاه این مسیر می‌باشد. محور ایستگاه الندشت، در کیلومتر 10+512.27 مسیر خط دو قطار شهری مشهد واقع خواهد شد. همچنین دو سکو با عرض تقریباً 4 متر و طول 100 متر در طرفین ریل از دیگر مشخصات فیزیکی ایستگاه الندشت می‌باشد. وضعیت قرارگیری ایستگاه تقریباً شمال شرقی- جنوب غربی می‌باشد. به لحاظ ارتفاعی، ایستگاه از نوع زیرزمینی بوده و عمق ریل در محل ایستگاه نسبت به سطح خیابان حدود 20 متر و از سطح دریا 976.89 متر می‌باشد.





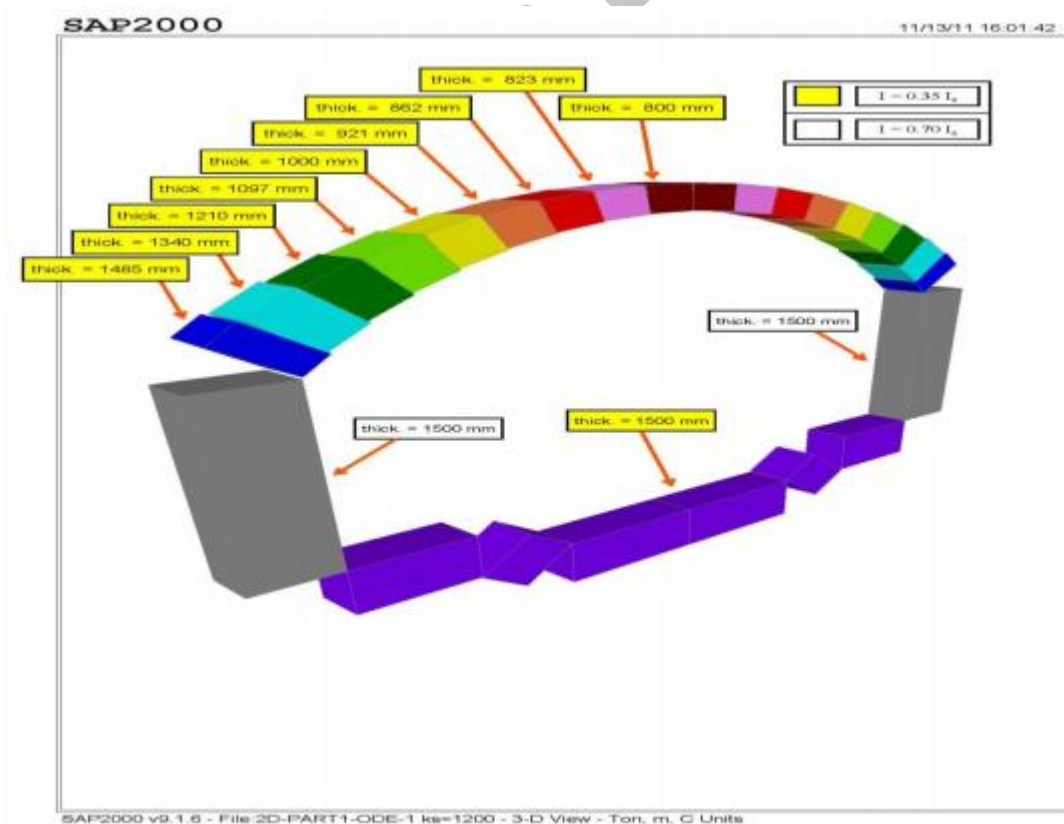
شیب خط پروژه ریل، در ناحیه ایستگاه حدود 2 در هزار بوده و در پروفیل طولی، جهت نزولی شیب ریل به سمت شمال شرقی است. شکل های (۱) و (۲) پلان و نمای فوقانی ایستگاه اندشت را نشان می دهد.



شکل ۲: نمای فوقانی ایستگاه اندشت

شکل ۱: پلان مسیر در محل ایستگاه اندشت

### ۳- هندسه و مشخصات مدل



شکل ۳: نمای مدل دوبعدی (زلزله MDE)



جدول ۱: مشخصات مصالح

مصالح	بتن	میلهگرد
مقاومت	$F_c=250 \text{ Mpa}$	$F_y=4000 \text{ Mpa}$

### ۳- روش مدلسازی خاک سازه

#### ۳-۱- روش Hashash [4]

روش Hashash بر مبنای تحمیل تغییر مکانی مشخص به سازه مدفون در خاک می‌باشد. بر مبنای این روش، دوران توده خاک بر اساس پارامترهای لرزه‌ای خاک مشخص شده و بر اساس نسبت سختی سازه به سختی خاک، ضریب تشدید دوران تحمیلی به سازه مدفون در خاک نسبت به دوران توده خاک مشخص شده و بر اساس الگوی بارگذاری مشخصی این تغییر مکان به سازه اعمال می‌گردد. این روش با «میانی طراحی سازه ایستگاه‌های خط ۲ قطار شهری مشهد» هماهنگی دارد. پارامترهای ژئودینامیکی مورد نیاز در این روش جهت برآورد بارهای وارد بر ایستگاه به شرح زیر می‌باشد:

(۱) سرعت انتشار موج برشی: مقدار  $C_s$  خاک بر اساس گزارش ژئوتکنیک در محل هر ایستگاه در محدوده قرارگیری سازه و متوسط‌گیری بین اعداد تعیین می‌شود. (۲) مدول برشی دینامیکی توده خاک: مدول برشی دینامیکی توده خاک ( $G_m$ ) نیز می‌بایست از مطالعات ژئوتکنیکی تعیین گردد. لیکن در صورت عدم وجود این اطلاعات می‌توان از رابطه (۱) مدول برشی دینامیکی را محاسبه نمود.

$$G_m = \rho \times C_s^2 \quad (1)$$

رفتار توده خاک پیرامون ایستگاه به صورت الاستیک خطی فرض می‌شود و به دلیل وابسته بودن مدول برشی دینامیکی به سطح کرنش و با توجه به سطح کرنش‌های متداول در حین وقوع زلزله، مدول برشی دینامیکی مؤثر خاک برابر با  $G_e = 0.6G_m$  در نظر گرفته می‌شود.

(۲) حداکثر کرنش برشی توده خاک بکر: حداکثر کرنش برشی توده خاک بکر  $\gamma_{\text{free-field}}$  با رابطه (۲) محاسبه می‌شود.

$$\gamma_{\text{free-field}} = \frac{PGV}{C_s} \quad (2)$$

$PGV$ : حداکثر سرعت انتشار ذرات خاک در عمق ایستگاه می‌باشد.

در صورت محاسبه این پارامتر در مطالعات لرزه‌خیزی می‌توان مستقیماً از این پارامتر در محاسبه  $\gamma_{\text{free-field}}$  استفاده نمود. در غیر این صورت به روش تقریبی زیر می‌توان میزان  $PGV$  را در عمق ایستگاه تعیین نمود:

(۳) محاسبه  $PGA$  در عمق ایستگاه در دوره بازگشت مورد نظر در عمق متوسط قرارگیری ایستگاه بر اساس گراف‌های توزیع

شتاب در پروفیل خاک.



۴) محاسبه PGV از روی PGA با توجه به فاصله ایستگاه از گسل، نوع خاک و بزرگی زلزله مورد انتظار در عمر مفید سازه بر اساس جدول (۲) است.

جدول (۲): تغییرات نسبت PGV به PGA با فاصله از گسل و نوع خاک

Ratios of peak ground velocity to peak ground acceleration at surface in rock and soil (after Power et al., 1996)			
Moment magnitude ( $M_w$ )	Ratio of peak ground velocity (cm/s) to peak ground acceleration (g)		
	Source-to-site distance (km)		
	0-20	20-50	50-100
<b>Rock<sup>a</sup></b>			
6.5	66	76	86
7.5	97	109	97
8.5	127	140	152
<b>Stiff soil<sup>a</sup></b>			
6.5	94	102	109
7.5	140	127	155
8.5	180	188	193
<b>Soft soil<sup>a</sup></b>			
6.5	140	132	142
7.5	208	165	201
8.5	269	244	251

<sup>a</sup>In this table, the sediment types represent the following shear wave velocity ranges: rock  $\geq 750$  m/s; stiff soil is 200-750 m/s; and soft soil  $< 200$  m/s. The relationship between peak ground velocity and peak ground acceleration is less certain in soft soils.

در گزارش تحلیل خطر لرزه‌ای پروژه، زلزله مبنای طراحی (زلزله هدف) برابر ۶/۸ در مقیاس ریشتر در بازه ۶/۳ تا ۷/۳ معرفی شده است. لیکن به لحاظ معرفی گسل شاندیز به عنوان گسل با توان لرزه‌زایی تا ۷/۱ ریشتر در بازه فاصله تا ۲۰ کیلومتری پروژه، مقدار ۷/۱ ریشتر مبنای عمل جهت تعیین نسبت سرعت انتشار موج به شتاب حداکثر لرزه برای کل پروژه مبنا قرار خواهد گرفت. بنابراین داریم:

$$PGV=122 \text{ PGA (for Stiff Soil \& SSD=0-20 km \& Mw=7.1)}$$

میزان اعوجاج تحمیلی به ایستگاه بوسیله رابطه (۳) محاسبه می‌شود.

$$\gamma_{structure} = R \times \gamma_{free-field} \quad (3)$$

ضریب R که نسبت بین اعوجاج وارده به سازه نسبت به اعوجاج محیط خاک می‌باشد تابع نسبت سختی سازه و خاک بوده و از روش اندرکنش تغییر مکان به دست آید.





## ۲-۳- روش اندرکنش تغییر مکان

در این روش اعوجاج اعمال شده به سازه زیرزمینی با لحاظ اندرکنش سازه و توده زمین با استفاده از روش‌های تحلیلی و یا نیمه تحلیلی در نظر گرفته می‌شود. در این روش با در نظر گرفتن نسبت سختی سازه جایگزین با توده زمین حذف شده از محیط، می‌توان تقریب خوبی از اندرکنش زمین - سازه و اعوجاج اعمال شده به سازه در اثر بروز زلزله به دست آورد.

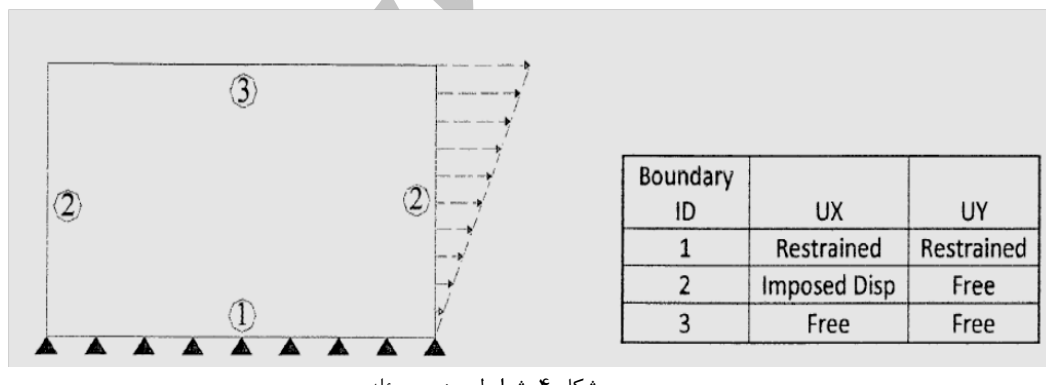
جهت انجام تحلیل اندرکنش می‌بایست مدلسازی در نرم‌افزارهای اندرکنشی خاک و سازه مانند PIAXIS انجام گیرد. مراحل و فرضیات مدلسازی به شرح زیر است:

مدلسازی به صورت دوبعدی در حالت کرنش مسطح انجام می‌گیرد؛ محیط خاک الاستیک فرض می‌شود؛  $G_e = 0.6 G_m$  فرض می‌شود؛ کلیه تنش‌های برجا اعم از افقی و قائم برابر صفر در نظر گرفته می‌شود؛ عرض مدل حداقل ۱۰ برابر عرض سازه و عمق آن حداقل یک چهارم طول موج برشی در نظر گرفته شود؛ شرایط مرزی مدلسازی به صورت زیر در نظر گرفته شود؛ مدلسازی سازه پوشش نهایی با استفاده از المان تیر خمشی با رفتار الاستیک انجام می‌شود؛ اتصال المان‌های سازه با خاک از طریق المان‌های واسط (interface) مناسب به صورت الاستوپلاستیک با ۶۰٪ مشخصات مقاومتی محیط در حالت استاتیک در نظر گرفته می‌شود؛ برای انجام این تحلیل نیاز به ساخت دو مدل محاسباتی الف) مدل خاک بکر و ب) مدل خاک - سازه می‌باشد که در ادامه تشریح می‌گردد:

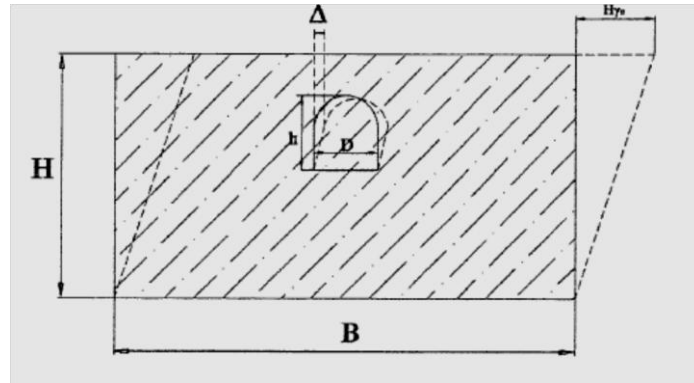
الف) مدل خاک بکر:

در این مرحله مدل خاک بکر بدون در نظر گرفتن سازه تحت تغییر مکان اجباری با اندازه  $\Delta_{free-field}$  مشابه شکل زیر قرار

می‌گیرد. (شکل‌های ۳ و ۴)



شکل ۴: شرایط مرزی مسئله



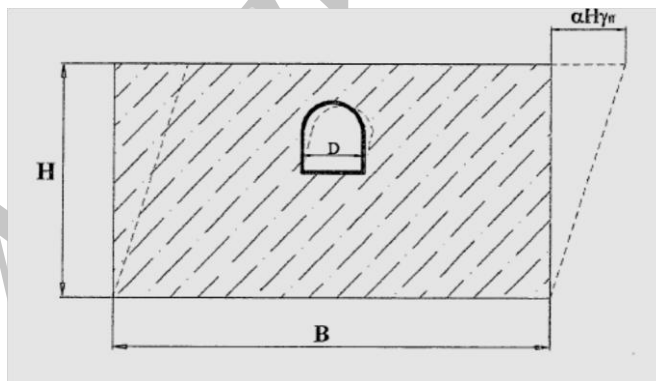
شکل ۵: تغییر مکان اجباری سازه

در ادامه تغییر مکان نسبی بالاترین و پایین ترین نقطه محل احداث سازه در توده خاک بکر اندازه گیری می شود (رابطه ۴)

$$\gamma = \Delta/h \quad \alpha = Y_{\text{free-field}}/\gamma \quad (4)$$

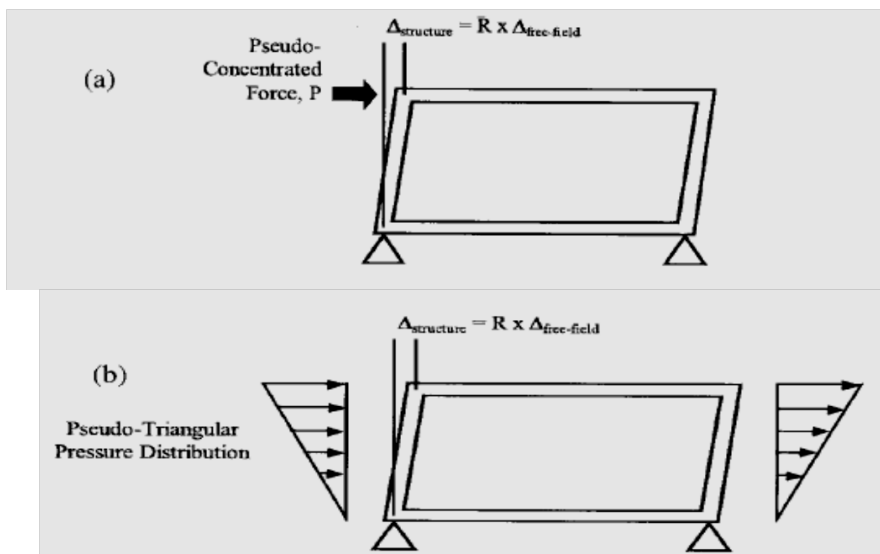
(ب) مدل خاک و سازه:

در این مدل، توده خاک و سازه، به صورت توأم مدلسازی شده و تحت تغییر مکان مثلثی اجباری با اندازه  $\alpha\Delta_{\text{free-field}}$  در مرزهای قائم توده خاک مشابه شکل (۵) قرار می گیرد.



شکل ۶: تغییر مکان مثلثی اجباری به توده خاک و سازه

پس از محاسبه تغییر مکان تحمیلی به سازه و با اعمال این تغییر شکل با توجه به عمق ایستگاه به یکی از الگوهای بارگذاری اشاره شده در ذیل می توان مقادیر نیروهای داخلی جهت طراحی اعضای سازه ایستگاه را تعیین نمود. برای ایستگاه های با سربار بیش از ۳۰ متر از الگوی بارگذاری شکل (۶- a) و برای ایستگاه های با سربار کمتر از ۳۰ متر از الگوی بارگذاری شکل (۶- b) می بایست استفاده گردد.



شکل ۷: انواع الگوهای بارگذاری [5]

در تحلیل سازه در برابر زلزله، تحلیل سازه با طول واحد (برای بخشی بدون بازشوی کناری در دیوار) و یا با طولی محدود در دو طرف بازشویهای دیواره جانبی انجام خواهد شد و نتایج حاصله به صورت دستی با نتایج تحلیل‌های استاتیک ترکیب شده و تقویت آرماتورهای سازه در محل‌های لازم صورت خواهد گرفت. بدیهی است مدلسازی سازه به صورت سه‌بعدی عملاً تطابق با فرضیات هاشاش نداشته و عملکرد صلب دیوارهای طرفین ایستگاه، عملاً امکان ایجاد اعوجاج در همه طول ایستگاه را نخواهند داد.

همچنین در طراحی اجزای سازه‌ای فرضیات ذیل در نظر گرفته خواهد شد:

- در تمام تحلیل‌ها از سختی مؤثر مقاطع بتنی (مقاطع ترک‌خورده) استفاده می‌شود.
- ضریب رفتار سازه  $R = 1$  در نظر گرفته می‌شود.

#### ۴- بارگذاری لرزه‌ای

به منظور انجام تحلیل به روش اندرکنش تغییر مکان، از نرم‌افزار PLAXIS 8.2 [6] استفاده شده است. این نرم‌افزار قادر به مدلسازی دوبعدی مراحل حفاری و نصب سیستم نگهداری با در نظر گرفتن اثرات اندرکنش خاک و سازه<sup>۱</sup> می‌باشد. روش حل عددی در این برنامه روش المان محدود<sup>۲</sup> بوده و قادر به تحلیل محیط پیوسته با رفتار ارتجاعی خطی و ارتجاعی - خمیری<sup>۳</sup> به صورت کرنش مسطح<sup>۴</sup> می‌باشد.

همان طور که پیشتر شرح آن رفت، بر طبق مبانی خط ۲ مشهد، مدلسازی به صورت دوبعدی، در حالت کرنش مسطح،

<sup>1</sup> Soil-Structure Interaction  
<sup>2</sup> Finite Elements  
<sup>3</sup> Elasto-Plastic  
<sup>4</sup> Plane Strain





انجام می‌شود که در آن محیط خاک الاستیک و  $G_e = 0.6 G_m$  فرض می‌گردد. برای این مدلسازی از المان‌های سه‌گره‌ای برای محیط خاک استفاده شود. کلیه تنش‌های برجا در مدل اعم از تنش‌های افقی و قائم برابر صفر در نظر گرفته می‌شود. همچنین کلیه مدلسازی‌ها در غالب یک فاز واحد انجام می‌شود. محاسبات لازم جهت مدل دوبعدی ایستگاه‌اندشت به شرح روابط (۵) تا (۱۰) است.

$$C_s = 695 (m/s), \quad \rho = 2.0 \quad (5)$$

$$G_m = \rho C_s^2 = 2.0 \times 725^2 = 966050 \text{ kPa}, \quad (6)$$

$$G_e = 0.6 G_m = 579630 \text{ kPa}$$

در وضعیت ODE :

$$PGA = 0.17, \quad PGV = 122 \text{ PGA} = 0.207 (m/s) \quad (7)$$

$$Y_{free-field} = \frac{PGV}{C_s} = \frac{0.207}{695} = 2.978 \times 10^{-4}, \quad (8)$$

$$Y_{free-field} = 2.978 \times 10^{-4}$$

در وضعیت MDE :

$$PGA = 0.37, \quad PGV = 122 \text{ PGA} = 0.45 (m/s) \quad (9)$$

$$Y_{free-field} = \frac{PGV}{C_s} = \frac{0.45}{695} = 6.455 \times 10^{-4}, \quad (10)$$

$$Y_{free-field} = 6.455 \times 10^{-4}$$

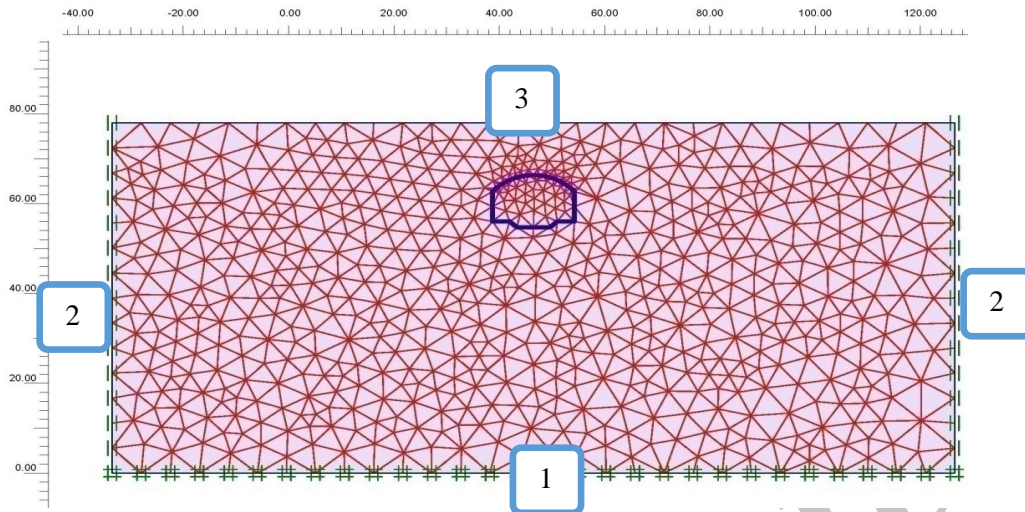
ابعاد مدل باید به گونه‌ای انتخاب شود که بتواند شرایط محیط را با تقریب خوبی مدلسازی کند. بدین منظور عرض محیط ۱۰ برابر عرض مقطع سازه انتخاب می‌گردد. عمق مدل نیز حداقل برابر یک چهارم طول موج برشی در نظر گرفته می‌شود. مدلسازی سازه ایستگاه و سازه نگهبان در محل مورد نظر با استفاده از المان تیر خمشی با رفتار الاستیک<sup>۵</sup> انجام می‌شود. همچنین پوشش به صورت ترک‌خورده مدلسازی می‌گردد. شرایط مرزی مدل مطابق شکل زیر اعمال گردیده است.

## ۵- شرایط مرزی

در شکل (۸) و جدول (۳) شرایط مرزی نمونه مدلسازی شده نشان داده شده است.

<sup>5</sup> Elastic Beam





شکل ۸: نحوه اعمال شرایط مرزی بر مدل دوبعدی

جدول ۳: شرایط مرزی مدل

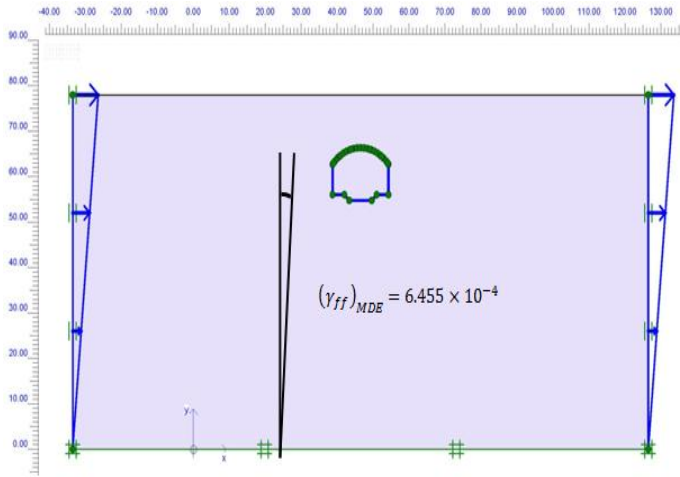
Boundary ID	Ux	Uy
1	Restrained	Restrained
2	Imposed Displacement	Free
3	Free	Free

## ۶- نتایج تحلیل

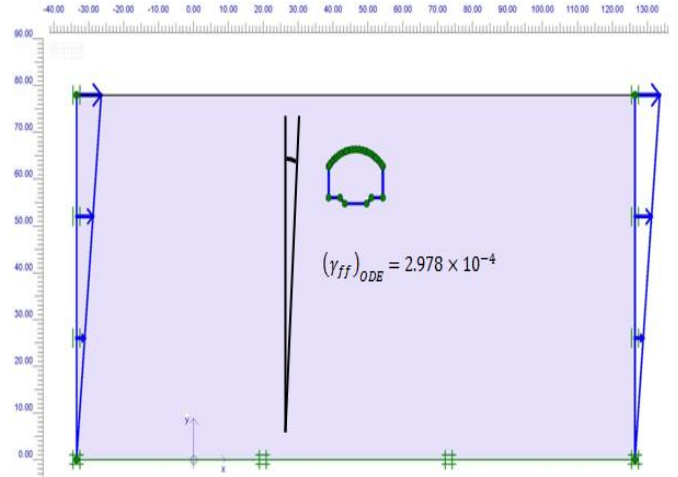
در این بخش نتایج تحلیل مدل سازی دو بعدی خاک-سازه مورد بررسی قرار می‌گیرد. با توجه به دوران های بدست آمده در وضعیت ODE ( $\gamma_{free-field} = 6.455 \times 10^{-4}$ ) و MDE ( $\gamma_{free-field} = 2.978 \times 10^{-4}$ ) در بخش ۴، توده خاک تحت این دوران قرار گرفته، شکل‌های (۹) و (۱۰)، اعمال تغییر مکان جانبی را به توده خاک در نرم افزار PLAXIS و در شرایط زلزله ODE و MDE نشان می‌دهد. در اشکال (۱۱) و (۱۲) تغییر شکل توده خاک مش بندی شده در هر دو حالت شرایط زلزله ODE و MDE مشاهده می‌شود، به منظور بررسی دقیق تر باید نمودار های تنش و تغییر شکل استخراج شود. در اشکال (۱۳) و (۱۴) کانتورهای تغییر مکان میدان آزاد توده خاک در شرایط زلزله ODE و MDE مشاهده می‌شود. همانطور که مشاهده می‌شود تغییر مکان در گوشه‌های بالا مقادیر حداکثر را داشته و این مقادیر تقریباً به 54.18 میلی متر در زلزله ODE و 108.36 میلی متر در زلزله MDE رسیده است. همچنین با توجه به کانتورهای تنش متوسط بدست آمده از تحلیل، که در شکل‌های (۱۵) و (۱۶) مشاهده می‌شود، حداکثر تنش متوسط در توده خاک تحت زلزله ODE، 1490 KN/m<sup>2</sup> و حداکثر تنش در توده خاک در حالت زلزله MDE، تقریباً 2840 KN/m<sup>2</sup> بدست آمده است. پس از تحلیل مدل خاک سازه تحت اعوجاج جانبی نمودارهای لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری بدست آمده است که در شکل‌های (۱۷) و (۱۸) که نمودار لنگر خمشی در هر دو شرایط زلزله ODE و MDE را نشان می‌دهد حداکثر لنگر خمشی در حالت ODE، 1580KN.m و در حالت MDE 2670 KN.m بدست آمده است. شکل های (۱۹) و (۲۰) نمودار نیروی برشی و



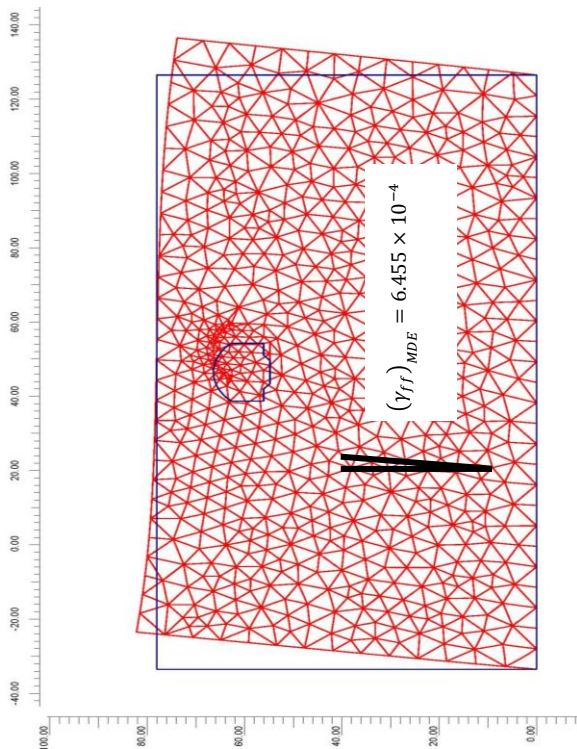
شکل‌های (۲۰) و (۲۱) نمودار نیروی محوری سازه تحت زلزله‌های ODE و MDE نشان می‌دهد. در این نمودارها حداکثر نیروی برشی و حداکثر نیروی محوری به ترتیب 2000KN و 2330KN بدست آمده است.



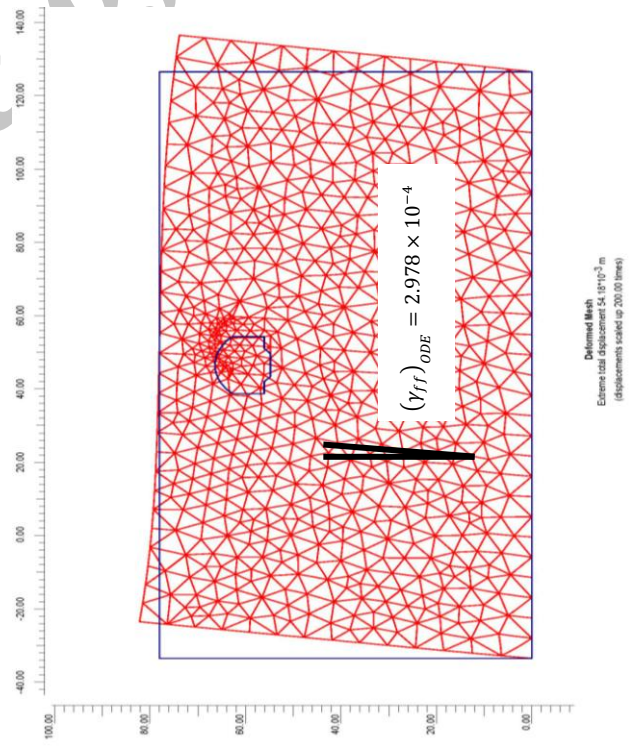
شکل ۱۰: مدل دوبعدی اعمال تغییرمکان میدان آزاد توده خاک در حالت MDE



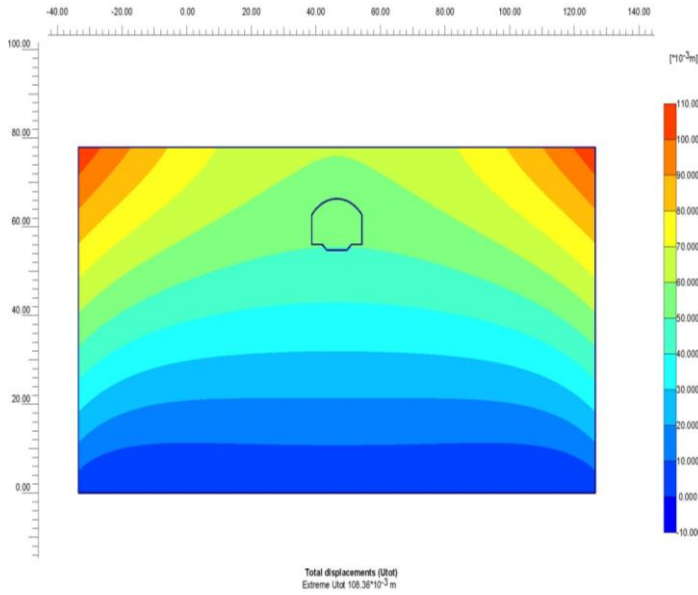
شکل ۹: مدل دوبعدی اعمال تغییرمکان میدان آزاد توده خاک در حالت ODE



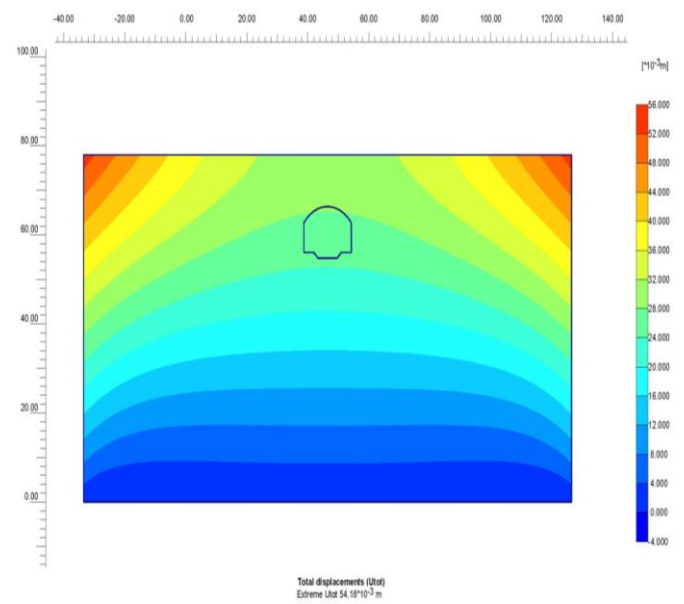
شکل ۱۲: مدل تغییرمکان یافته میدان آزاد توده خاک در حالت MDE



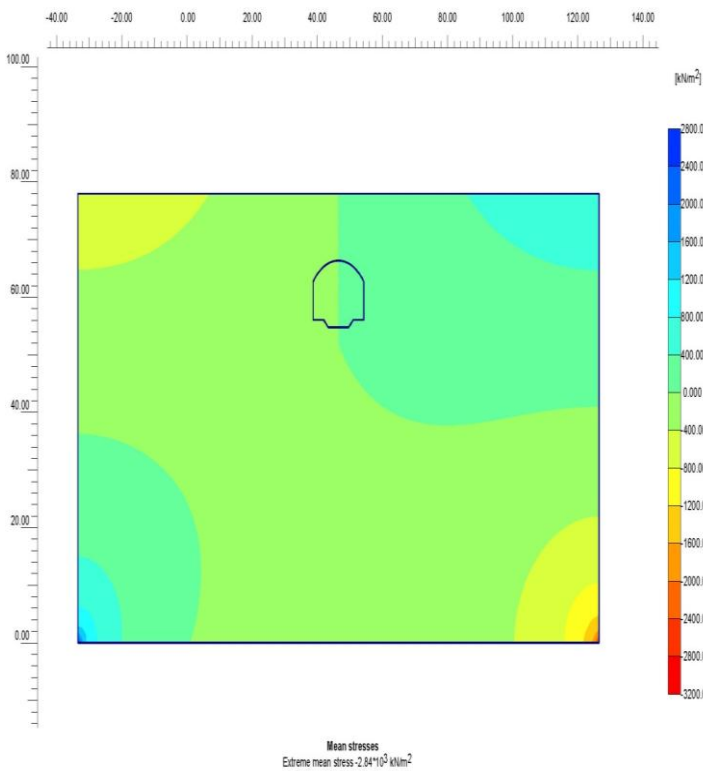
شکل ۱۱: مدل تغییرمکان یافته میدان آزاد توده خاک در حالت ODE



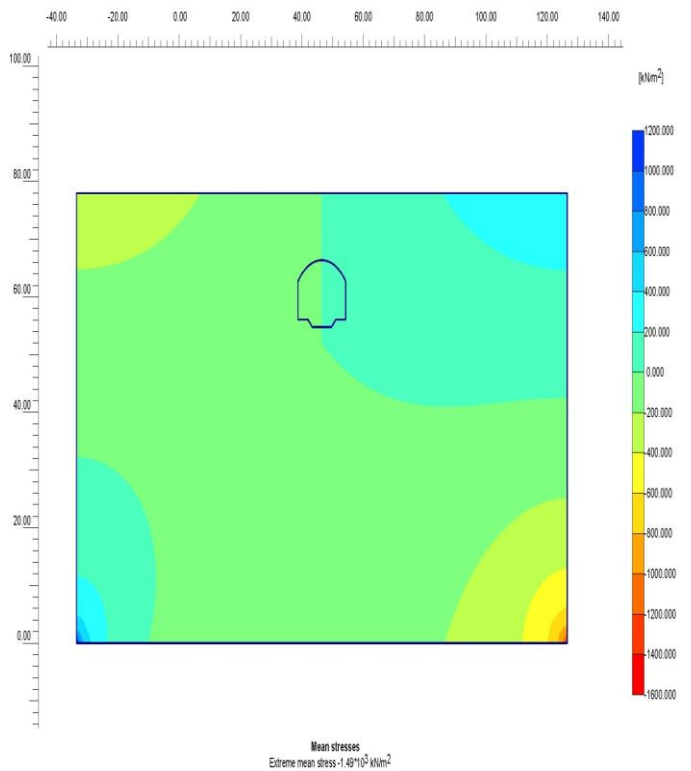
شکل ۱۴: کانتور تغییر مکان میدان آزاد توده خاک در حالت MDE



شکل ۱۳: کانتور تغییر مکان میدان آزاد توده خاک در حالت ODE

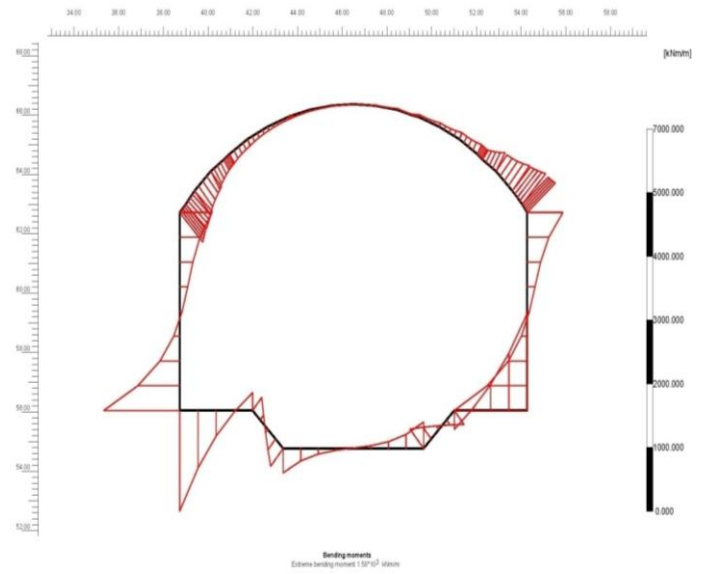
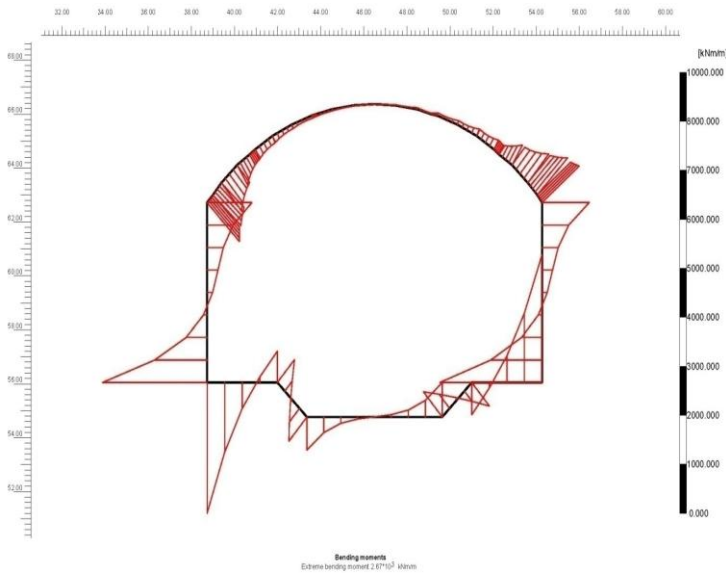


شکل ۱۶: کانتور تنش متوسط میدان آزاد توده خاک در حالت MDE



شکل ۱۵: کانتور تنش متوسط میدان آزاد توده خاک در حالت ODE



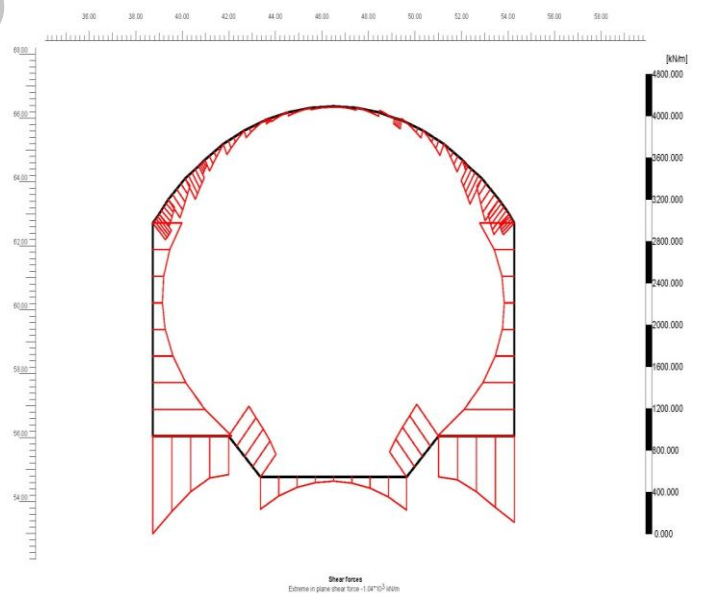
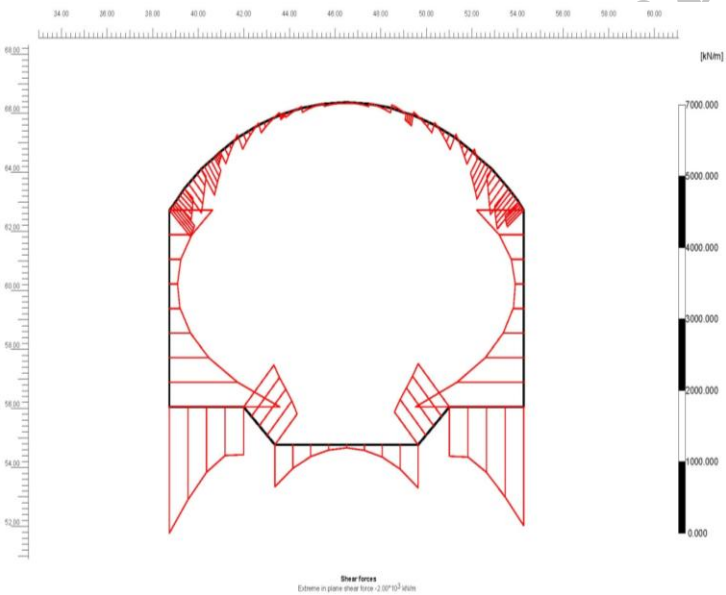


شکل ۱۸: دیاگرام لنگرهای (بدون ضریب) سازه اصلی تحت اثر اعوجاج جانبی توده

خاک و سازه در حالت MDE

شکل ۱۷: دیاگرام لنگرهای (بدون ضریب) سازه اصلی تحت اثر اعوجاج جانبی توده

خاک و سازه در حالت ODE



شکل ۲۰: دیاگرام برش (بدون ضریب) سازه اصلی تحت اثر اعوجاج جانبی توده خاک و

سازه در حالت MDE

شکل ۱۹: دیاگرام برش (بدون ضریب) سازه اصلی تحت اثر اعوجاج جانبی توده

خاک و سازه در حالت ODE





شکل ۲۲: دیاگرام نیروی محوری (بدون ضریب) سازه اصلی تحت اثر اعوجاج جانبی

توده خاک و سازه در حالت MDE



شکل ۲۱: دیاگرام نیروی محوری (بدون ضریب) سازه اصلی تحت اثر اعوجاج

جانبی توده خاک و سازه در حالت ODE

## ۷- نتیجه گیری

در این تحقیق به تحلیل دو بعدی خاک-سازه ایستگاه آندشت قطار شهری مشهد پرداخته شد. به منظور مدل سازی از برنامه اجزا محدود PLAXIS و همچنین از روش هشاش و اندرکنش تغییر مکان برای مدل سازی توده خاک-سازه استفاده گردید. در این روش ها دوران میدان آزاد و همچنین اعوجاج جانبی توده خاک تحت شرایط زلزله ODE و MDE بدست آمده و سپس طبق یک الگوی بار مثلی به توده خاک-سازه اعمال میگردد. و سپس تحت دوران میدان آزاد، کانتورهای تغییر مکان و تنش در توده خاک و تحت اعوجاج جانبی نمودارهای لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری سازه بدست آمده است. همانطور که در نتایج مشاهده گردید، حداکثر تغییر مکان توده خاک و حداکثر تنش در توده خاک تحت زلزله MDE بوده و این مقادیر به ترتیب 108.36mm و  $2840 \text{ KN/m}^2$  بدست آمده است. و همچنین نمودارهای لنگر خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری از تحلیل توده خاک تحت اعوجاج جانبی بدست آمده است که مقادیر حداکثر به ترتیب 2670 KN.m، 2000KN و 2330KN تحت زلزله MDE را نشان می دهد.



## مراجع

- [1] Pakbaz, M. C., & Yareevand, A. 2-D Analysis of Circular Tunnel Against Earthquake Loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(5), 411-417. (2005).
- [2] Judd, S. S.. Underground opening damage from earthquake. *Engineering Geology*, 30, 263-276. (13 de June de 1990).
- [3] Hashash, Y. M. A., Hook, J. J., Schmidt, B., & Yao, J. I-C. "Seismic Design and Analysis of Underground Structure". *Tunnelling and Underground Space Technology*, 16(4), 247-293. [http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798\(01\)00051-7](http://dx.doi.org/10.1016/S0886-7798(01)00051-7). (2001).
- [4] Hashash, Y.M.A., Park, D., Yao, J.I.C. "Ovaling Deformations of Circular Tunnels Under Seismic Loading, an Update on Seismic Design and Analysis of Underground Structures". *Tunnelling and Underground Space Technology*. 20(5): p. 435-441. (2005).
- [5] Wang, J. N. "Seismic Design of Tunnels: A State-of-the-Art Approach. New York": Parsons Brinckerhoff Quade & Douglas, Inc. <http://www.pbworld.com/pdfs/publications/monographs/wang.pdf>. (1993).
- [6] Plaxis v8.2, "Finite element code for soil and rock analyse, user manual", Delft University of Technology and Plaxis b.v., The Netherlands. , 2000

