

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشکده مهندسی معدن، نفت و ژئوفیزیک

پایان نامه کارشناسی ارشد مهندسی معدن گرایش تونل و فضاهای زیرزمینی

بررسی عددی تاثیر پارامترهای خاک بر پاسخ لرزه‌ای قطعات پیش ساخته بتنی پوشش های تونل

نگارنده:

علیرضا جنگی

استاد راهنما:

دکتر مجید نیکخواه

شهریور ماه ۱۳۹۶

تقدیم به:

تقدیم بابوسه به دستان استوارترین تکیه گاهانم، پدر و مادر فداکار و عزیزتر از جانم...

که هر آن چه آموختم در کتب عشق شما آموختم و هر چه بگو شتم قطره ای از دریای بی کران مهربانی تان را پاس نتوانم بگویم!

تقدیم به همسر و همراه همیشگی زندگیم! کسی که وجودش باعث آرامش و اطمینانم است.

پروردگارا...

حسن عاقبت، سلامت و سعادت را برای عزیزانم مقدر بفرما...

تقدیر و تشکر:

شکر شایان نثار ایزد منان که توفیق را رفیق راهم ساخت تا این پایان نامه را به پایان برسانم. از استاد فاضل و اندیشمند جناب آقای دکتر مجید نیکخواه به عنوان استاد راهنما که همواره نگارنده را مورد لطف و محبت خود قرار داده اند، کمال تشکر را دارم.

چکیده

امروزه با توجه به روند رو به افزایش جمعیت جهان و همچنین نیاز به جابه‌جایی و حمل و نقل افراد در محیط‌های شهری استفاده از سازه‌های زیرزمینی روز به روز افزایش می‌یابد. به منظور جابه‌جایی افراد در زیر سطح زمین، از قطارهای زیرزمینی استفاده می‌شود. در ایران نیز در کلان‌شهرهایی چون تهران، مشهد، تبریز، شیراز و ... از این تونل‌ها استفاده شده است.

یکی از عواملی که باعث ایجاد نیروهای محوری و برشی و همچنین گشتاور خمشی در پوشش بتنی تونل می‌شود، زمین‌لرزه است. با وجود این که تونل‌ها نسبت به سازه‌های احداث شده روی سطح زمین، از امنیت بالایی برخوردارند، آسیب‌های اخیر وارد آمده به دلیل زمین‌لرزه به برخی از این تونل‌ها ضرورت لحاظ بار دینامیکی در طراحی سازه‌های زیرزمینی را پررنگ کرده است.

با توجه به اینکه ایران از کشورهای لرزه‌خیز جهان محسوب می‌شود، بررسی پایداری این تونل‌ها در برابر بار زمین‌لرزه از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عوامل مختلفی بر میزان خسارت ناشی از زمین‌لرزه مؤثر است که از جمله آن‌ها می‌توان به محتوای فرکانسی امواج زمین‌لرزه، پارامترهای محیط درون‌گیر و پوشش نگهداری تونل و همچنین ابعاد آن اشاره کرد.

هدف از این پژوهش بررسی پارامترهای مربوط به محیط درون‌گیر تونل به روش عددی و مقایسه این نتایج با روش‌های تحلیلی است. به همین منظور تاثیر پارامترهای محیط دربرگیرنده تونل بر عملکرد و پاسخ قطعات بتنی پوشش تونل‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد بررسی قرار گرفته است. در این راستا تحلیل‌های عددی در محیط‌های متفاوت خاک و به روش تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام شده است. نرم‌افزار FLAC3D قابلیت مدل‌سازی رفتار سازه‌های احداث شده در خاک، سنگ و دیگر مواد را دارد.

به منظور بررسی موضوع پژوهش، پاسخ دینامیکی قطعات بتنی بر اساس تغییرات نیروی محوری، نیروی برشی و گشتاور خمشی مورد مطالعه قرار گرفته و مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با روش‌های تحلیلی ارائه شده که برای پوشش نگهداری پیوسته توسعه داده شده‌اند صورت گرفته است. به‌طور کلی نتایج حاصل از پژوهش نشان می‌دهد که با افزایش مدول تغییرشکل‌پذیری مقدار گشتاور خمشی بیشینه و نیروی محوری بیشینه ایجاد شده در پوشش بتنی تونل کاهش و مقدار نیروی برشی افزایش می‌یابد.

با افزایش ضخامت پوشش نگهداری تونل گشتاور خمشی به طور چشمگیری افزایش می‌یابد ولی تغییری در نیروی محوری و برشی بیشینه ایجاد نمی‌شود. همچنین با افزایش تعداد قطعات بتنی پوشش نگهداری، گشتاور خمشی بیشینه، نیروی محوری و نیروی برشی بیشینه کاهش می‌یابند.

کلمات کلیدی : تحلیل دینامیکی، روش‌های عددی، تونل، قطعات پیش‌ساخته بتنی، زمین‌لرزه

فهرست مطالب

۱ کلیات و تعاریف ۱

۱-۱- مقدمه ۲

۲-۱- عنوان تحقیق ۲

۳-۱- تاریخچه‌ای از موضوع تحقیق ۳

۴-۱- ضرورت تحقیق ۵

۵-۱- هدف کلی و آرمانی تحقیق ۶

۶-۱- روش انجام تحقیق ۶

۷-۱- ساختار پایان نامه ۷

۹ فصل ۲: مروری بر مطالعات پیشین ۹

۱-۲- مقدمه ۱۰

۲-۲- مطالعات اوون و شول ۱۰

۳-۲- مطالعات شارما و جوود ۱۳

۴-۲- مطالعات دودینگ و روزن ۱۵

۵-۲- مطالعات ونگ ۱۶

۶-۲- روش‌های تحلیلی ۱۶

۲-۶-۲- روش‌های تحلیلی تحت بارهای استاتیکی ۱۹

۱-۲-۶-۲- روش حل بدون لغزش ۱۹

۲-۲-۶-۲- روش حل لغزش کامل ۲۱

۳-۶-۲- روش‌های تحلیلی تحت بارگذاری لرزه‌ای ۲۱

- ۲۲.....۱-۳-۶-۲- روش ونگ
- ۲۳.....۲-۳-۶-۲- روش پیزن و همکاران
- ۲۴.....۳-۳-۶-۲- روش پیزن
- ۲۶.....۴-۳-۶-۲- روش بوبت
- ۲۷.....۵-۳-۶-۲- روش پارک، تانتایوپین و همکاران
- ۲۸.....۶-۳-۶-۲- روش کوریلینو و همکاران
- ۳۰.....۷-۳-۶-۲- روش کورتزیز
- ۳۱.....۸-۳-۶-۲- روش پییر پائولو اورست
- ۳۱.....۷-۲- روش‌های عددی
- ۳۱.....۱-۷-۲- مقدمه
- ۳۲.....۲-۷-۲- تحلیل‌های شبه دینامیکی
- ۳۲.....۱-۲-۷-۲- بلوری بزاز و بشارت
- ۳۳.....۲-۲-۷-۲- سدارت و همکاران
- ۳۵.....۳-۲-۷-۲- تورکاتو و همکاران
- ۳۵.....۳-۷-۲- تحلیل‌های دینامیکی
- ۳۵.....۱-۳-۷-۲- پاک‌باز و یاوری‌وند
- ۳۷.....۲-۳-۷-۲- کونتو و همکاران
- ۳۹.....۳-۳-۷-۲- فهمیمی فر و وکیل‌زاده
- ۴۱.....۴-۳-۷-۲- شهرور
- ۴۱.....۵-۳-۷-۲- اسلیتین و همکاران

۴۲	.....انگوک اندو، دنیل دیاس و همکاران
۴۴	.....جمع‌بندی
فصل ۳: تاثیر پارامترهای خاک بر پاسخ لرزه ای قطعات پیش‌ساخته بتنی	
۴۵	..... پوشش‌های تونل
۴۶	..... ۱-۳- مقدمه
۴۶	..... ۲-۳- پارامترهای خاک
۴۸	..... ۳-۳- نگهداری بتنی سگمندی
۵۰	..... ۴-۳- مشخصات سیستم نگهداری
۵۳	..... ۵-۳- نرم‌افزار FLAC3D
۵۳	..... ۱-۵-۳- مقدمه
۵۴	..... ۲-۵-۳- مراحل حل مساله در FLAC3D
۵۵	..... ۳-۵-۳- تحلیل دینامیکی در FLAC3D
۵۵	..... ۱-۳-۵-۳- مقدمه
۵۶	..... ۲-۳-۵-۳- مشکلات عمده برای حل عددی یک تحلیل دینامیکی
۵۶	..... ۳-۳-۵-۳- مراحل تحلیل دینامیک در FLAC3D
۵۸	..... ۴-۳-۵-۳- بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی
۶۰	..... ۵-۳-۵-۳- زمین‌لرزه‌سنجی
۶۱	..... ۶-۳-۵-۳- تصحیحات مبنا
۶۲	..... ۷-۳-۵-۳- شرایط مرزی
۶۳	..... ۸-۳-۵-۳- میرایی مکانیکی

۶۵	۳-۵-۴- فرکانس طبیعی محیط
۶۶	۳-۶- پاسخ دینامیکی قطعات بتنی
۶۶	۳-۷- بررسی پارامترهای محیط خاک دربرگیرنده تونل
۶۶	۳-۷-۱- مقدمه
۷۲	۳-۷-۲- گشتاور خمشی
۷۲	۳-۷-۳- نیروی محوری
۷۲	۳-۷-۴- نیروی برشی
۷۳	۳-۸-۱- بررسی پارامترهای پوشش بتنی
۷۳	۳-۸-۱- مقدمه
۷۳	۳-۸-۲- ضخامت سیستم نگهداری
۷۵	۳-۸-۳- تعداد قطعات بتنی سیستم نگهداری
۹۱	۳-۹- جمع بندی
۹۳	فصل ۴: جمع بندی، نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۴	۴-۱- مقدمه
۹۴	۴-۲- جمع بندی و نتیجه گیری
۹۵	۴-۳- پیشنهادات
۹۷	منابع
۱۰۱	پیوست

فهرست شکل‌ها

- شکل (۱-۲) انواع امواج لرزه‌ای ۱۱
- شکل (۲-۲) تغییر شکل سازه‌های زیرزمینی در اثر بارهای لرزه‌ای ۱۲
- شکل (۳-۲) تونل با مقطع دایره‌ای ۱۸
- شکل (۴-۲) بارگذاری لرزه‌ای برشی و بارگذاری استاتیکی معادل ۱۸
- شکل (۵-۲) نمودار تنش نرمال بر حسب فاصله از منبع زمین‌لرزه برای مقادیر مختلف GSI و بیشینه شتاب برای شدت زمین‌لرزه ثابت ۶/۵ ۳۱
- شکل (۶-۲) مقایسه روش عددی و تحلیلی برای اندرکنش تونل و خاک ۳۳
- شکل (۷-۲) نیروی محوری کلی با کرنش برشی ۰.۵٪ خاک : (a) ضریب اصطکاک $f = 1$ و (b) حالت بدون لغزش؛ جابه‌جایی با فاکتور بزرگ‌نمایی ۲۰ برابر، نسبت انعطاف‌پذیری $F = 143$ ، ضخامت سیستم نگهداری $t = 0.36$ m ضریب فشار جانبی زمین $K0 = 1$ (Sedarat et al., 2009) ۳۳
- شکل (۸-۲) نیروی محوری و گشتاور خمشی در سیستم نگهداری با کلی با کرنش برشی ۰.۵٪ خاک : (a) ضریب اصطکاک $f = 0$ و (b) $f = 1$ ؛ نسبت انعطاف‌پذیری $F = 143$ ، ضخامت سیستم نگهداری $t = 0.36$ m ضریب فشار جانبی زمین $K0 = 1$ ۳۴
- شکل (۹-۲) افزایش نیروی محوری در مقابل کرنش برشی در خاک تحت ضرایب اصطکاک مختلف $f = 0, 0.5, 0.8, 1$ نسبت انعطاف‌پذیری $F = 143$ ، ضخامت سیستم نگهداری $t = 0.36$ m ضریب فشار جانبی زمین $K0 = 1$ ۳۴
- شکل (۱۰-۲) مقایسه $Tmax$ برای روش عددی (CA2) در حالت بدون لغزش و روش تحلیلی در حالت لغزش کامل بر حسب انعطاف‌پذیری ۳۵
- شکل (۱۱-۲) تاثیر شتاب بیشینه بر $Mmax$ و $Tmax$ برای روش عددی (CA2) ۳۶
- شکل (۱۲-۲) تاثیر شتاب بیشینه بر $Tmax$ برای روش عددی (CA2) ۳۶
- شکل (۱۳-۲) مقایسه $Mmax$ برای روش عددی (CA2) در حالت بدون لغزش و روش تحلیلی در حالت لغزش کامل بر حسب انعطاف‌پذیری ۳۶
- شکل (۱۴-۲) توزیع (a) نیروی محوری، (b) گشتاور خمشی بیشینه و (c) تنش برشی در اطراف سیستم نگهداری تونل در زمان $t = 10s$ (تحلیل دینامیکی) ۳۸
- شکل (۱۵-۲) توزیع (a) نیروی محوری، (b) گشتاور خمشی بیشینه و (c) تنش برشی در اطراف سیستم نگهداری تونل در زمان $t = 10s$ (تحلیل شبه استاتیک) ۳۹
- شکل (۱۶-۲) مقایسه $Tmax$ برای روش عددی و تحلیلی بر حسب ضریب انعطاف‌پذیری ۴۰
- شکل (۱۷-۲) مقایسه $Mmax$ برای روش عددی و تحلیلی بر حسب ضریب انعطاف‌پذیری ۴۰
- شکل (۱۸-۲) گشتاور خمشی حاصل از تغییر شکل‌های پلاستیک و الاستیک ۴۱

- شکل (۲-۱۹) توزیع نیروهای حاصل از بارگذاری لرزه‌ای در سیستم نگهداری تونل ۴۲
- شکل (۲-۲۰) مقایسه روش Wang و روش عددی (الف: نیروهای عمودی ب: گشتاور خمشی) برای حالت بدون لغزش و لغزش کامل ۴۳
- شکل (۲-۲۱) مقادیر گشتاور خمشی بیشینه و کمینه بر حسب تعداد درزهای عرضی پوشش بتنی برای فاکتور فشار جانبی ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ ۴۳
- شکل (۲-۲۲) مقادیر نیروهای بیشینه و کمینه بر حسب تعداد درزهای عرضی پوشش بتنی برای فاکتور فشار جانبی ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ ۴۳
- شکل (۲-۲۳) نمودار گشتاور خمشی بیشینه و نیروهای عمودی بیشینه بر حسب مدول یانگ خاک در برگیرنده تونل ۴۴
- شکل (۳-۱) شماتیک چهار حلقه بتنی ۴۸
- شکل (۳-۲) نمای جانبی انواع مختلف حلقه‌های بتنی ۴۹
- شکل (۳-۳) سیستم نگهداری با حلقه پیوسته ۵۱
- شکل (۳-۴) سیستم نگهداری با حلقه شامل ۳ قطعه بتنی پیش‌ساخته ۵۱
- شکل (۳-۵) سیستم نگهداری با حلقه شامل ۵ قطعه بتنی پیش‌ساخته ۵۲
- شکل (۳-۶) سیستم نگهداری با حلقه شامل ۷ قطعه بتنی پیش‌ساخته ۵۲
- شکل (۳-۷) نمونه‌ای از مدل شاخته شده به همراه ابعاد و مرزهای دینامیکی ۵۳
- شکل (۳-۸) الگوریتم حل مساله در نرم‌افزار FLAC3D (Itasca, 2000) ۵۵
- شکل (۳-۹) دامنه فوریه بدست آمده از نرم‌افزار SeismoSignal برای زمین‌لرزه السنترو ۵۸
- شکل (۳-۱۰) انواع بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی موجود در FLAC3D - الف) پایه منعطف ب) پایه صلب ۵۹
- شکل (۳-۱۱) تاریخچه زمانی سرعت زمین‌لرزه السنترو ۶۱
- شکل (۳-۱۲) تاریخچه زمانی شتاب زمین‌لرزه السنترو ۶۱
- شکل (۳-۱۳) تاریخچه زمانی تنش برشی زمین‌لرزه السنترو ۶۱
- شکل (۳-۱۴) نمودار جابه‌جایی - زمان محیط با استفاده از تحریک سیستم تحت شتاب جاذبه ۶۵
- شکل (۳-۱۵) مقایسه گشتاور خمشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل - سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۳۰ سانتی‌متر) ۶۹
- شکل (۳-۱۶) مقایسه نیروی محوری بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۳۰ سانتی‌متر) ۶۹
- شکل (۳-۱۷) مقایسه نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل (ضخامت سیستم نگهداری ۳۰ سانتی‌متر) ۶۹
- شکل (۳-۱۸) مقایسه گشتاور خمشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل - سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۴۰ سانتی‌متر) ۷۰

- شکل (۳-۱۹) مقایسه نیروی محوری بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۴۰ سانتی‌متر) ۷۰
- شکل (۳-۲۰) مقایسه نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل (ضخامت سیستم نگهداری ۴۰ سانتی‌متر) ۷۰
- شکل (۳-۲۱) مقایسه گشتاور خمشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۵۰ سانتی‌متر) ۷۱
- شکل (۳-۲۲) مقایسه نیروی محوری بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۵۰ سانتی‌متر) ۷۱
- شکل (۳-۲۳) نمودار تنش برشی - ضخامت سیستم نگهداری ۵۰ سانتی‌متر ۷۱
- شکل (۳-۲۴) نمودار گشتاور خمشی - ضخامت سیستم نگهداری (سیستم نگهداری پیوسته) ۷۴
- شکل (۳-۲۵) نمودار نیروی محوری - ضخامت سیستم نگهداری (سیستم نگهداری پیوسته) ۷۴
- شکل (۳-۲۶) نمودار نیروی برشی - ضخامت سیستم نگهداری (سیستم نگهداری پیوسته) ۷۵
- شکل (۳-۲۷) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW متراکم ۷۷
- شکل (۳-۲۸) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW متراکم ۷۸
- شکل (۳-۲۹) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW متراکم ۷۸
- شکل (۳-۳۰) کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم ۷۹
- شکل (۳-۳۱) کنتور نیروی محوری پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم ۸۰
- شکل (۳-۳۲) کنتور نیروی برشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم ۸۰
- شکل (۳-۳۳) کنتور گشتاور خمشی پوشش با ۳ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم ۸۱
- شکل (۳-۳۴) کنتور نیروی محوری پوشش با ۳ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم ۸۱
- شکل (۳-۳۵) کنتور نیروی برشی پوشش با ۳ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم ۸۲
- شکل (۳-۳۶) کنتور گشتاور خمشی پوشش با ۵ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم ۸۲
- شکل (۳-۳۷) کنتور نیروی محوری پوشش با ۵ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم ۸۳

- شکل (۳-۳۸) کنتور نیروی برشی پوشش با ۵ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای خاک
 GW متراکم ۸۳
- شکل (۳-۳۹) کنتور گشتاور خمشی پوشش با ۷ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای خاک
 GW متراکم ۸۴
- شکل (۳-۴۰) کنتور نیروی محوری پوشش با ۷ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای خاک
 GW متراکم ۸۴
- شکل (۳-۴۱) کنتور نیروی برشی پوشش با ۷ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای خاک
 GW متراکم ۸۵
- شکل (۳-۴۲) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW غیرمتراکم ۸۵
- شکل (۳-۴۳) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW غیرمتراکم ۸۶
- شکل (۳-۴۴) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW غیر متراکم ۸۶
- شکل (۳-۴۵) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP متراکم ۸۶
- شکل (۳-۴۶) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP متراکم ۸۷
- شکل (۳-۴۷) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP متراکم ۸۷
- شکل (۳-۴۸) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP غیر متراکم ۸۷
- شکل (۳-۴۹) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP غیر متراکم ۸۸
- شکل (۳-۵۰) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP غیر متراکم ۸۸
- شکل (۳-۵۱) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GM متراکم ۸۸
- شکل (۳-۵۲) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک GM متراکم ۸۹
- شکل (۳-۵۳) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GM متراکم ۸۹
- شکل (۳-۵۴) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک CH متراکم ۸۹
- شکل (۳-۵۵) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک CH متراکم ۹۰
- شکل (۳-۵۶) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک CH متراکم ۹۰
- شکل (۳-۵۷) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک CL متراکم ۹۰
- شکل (۳-۵۸) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک CL متراکم ۹۱
- شکل (۳-۵۹) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک CL متراکم ۹۱

فهرست جداول

- جدول (۱-۲) اطلاعات مربوط به ضخامت روباره و خسارت وارد بر تونل ۱۳
- جدول (۲-۲) اطلاعات مربوط به ماکزیمم شتاب زمین و خسارت وارد بر تونل ۱۴
- جدول (۳-۲) اطلاعات مربوط به فاصله از مرکز زلزله و خسارت وارد بر تونل ۱۵
- جدول (۴-۲) اطلاعات مربوط به سیستم نگهداری و خسارت وارد بر تونل ۱۵
- جدول (۵-۲) پارامترها و توضیحات مربوط به روابط ارائه شده توسط ونگ ۲۳
- جدول (۶-۲) پارامترها و توضیحات مربوط به روابط ارائه شده توسط پینزن ۲۶
- جدول (۷-۲) پارامترها و توضیحات مربوط به روابط ارائه شده توسط کوریلپانو و همکاران ۲۹
- جدول (۱-۳) پارامترهای انواع خاک‌های مورد استفاده در پژوهش ۴۷
- جدول (۲-۳) پارامترهای قطعات بتنی پیشساخته مورد استفاده در تحقیق ۵۰
- جدول (۳-۳) مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی
بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل برای ضخامت قطعات بتنی پوشش نگهداری ۳۰
سانتی‌متر ۶۷
- جدول (۴-۳) مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی
بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل برای ضخامت قطعات بتنی پوشش نگهداری ۴۰
سانتی‌متر ۶۷
- جدول (۵-۳) مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی
بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل برای ضخامت قطعات بتنی پوشش نگهداری ۵۰
سانتی‌متر ۶۷
- جدول (۶-۳) مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی
بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل برای پوشش بتنی پیوسته ($n = 1$) ۷۳
- جدول (۷-۳) مقادیر بیشینه گشتاور خمشی برای تعداد مختلف قطعات بتنی و ضخامت‌های
متفاوت پوشش بتنی ۷۶
- جدول (۸-۳) مقادیر بیشینه نیروی محوری برای تعداد مختلف قطعات بتنی و ضخامت‌های
متفاوت پوشش بتنی ۷۶
- جدول (۹-۳) مقادیر بیشینه نیروی برشی برای تعداد مختلف قطعات بتنی و ضخامت‌های متفاوت
پوشش بتنی ۷۷

کلیات و تعاریف

۱-۱- مقدمه

ساخت تونل‌ها با کاربری‌های مختلف سال‌های سال است که توسط انسان انجام می‌شود. این مهم نشان می‌دهد که سازه‌های زیرزمینی تا چه اندازه در زندگی روزمره بشر رخنه کرده است. طبیعت غیر قابل پیش‌بینی زمین و همچنین مخاطراتی که همواره طبیعت برای انسان‌ها داشته است، ایجاب می‌کند تا این سازه‌های زیرزمینی را تا آنجا که ممکن است ایمن و محکم احداث کند. این امر مستلزم نگاه دقیق‌تر و طراحی مهندسی است.

از ابتدا روش‌های متفاوتی با دقت‌های متفاوت برای بررسی پایداری و رفتار این سازه‌ها در مقابل بارهای استاتیکی و دینامیکی مطرح شده است. از جمله این روش‌ها می‌توان به روش‌های تحلیلی فرم بسته^۱، روش‌های عددی^۲، روش‌های فیزیکی^۳ اشاره کرد. در این تحقیق از روش تفاضل محدود^۴ که جزو روش‌های عددی پر کاربرد در مباحث ژئوتکنیکی است، به منظور بررسی تاثیر پارامترهای محیط درون‌گیر تونل بر رفتار لرزه‌ای سیستم نگهداری قطعات پوشش بتنی استفاده شده است. در فصل پیش رو به کلیاتی در مورد موضوع پژوهش پرداخته شده است.

۱-۲- عنوان تحقیق

سال‌هاست که به منظور نگهداری و ایمنی تونل‌های حفر شده به صورت تمام مقطع از قطعات بتنی پیش‌ساخته^۵ استفاده می‌شود. رفتار این قطعات بتنی پیش‌ساخته در برابر بارهای استاتیکی ناشی از روباره، توسط محققین بسیاری مورد مطالعه قرار گرفته است. اما رفتار لرزه‌ای این نوع از سیستم‌های نگهداری با توجه به اهمیت آن‌ها موضوعی است که نسبتاً کمتر مورد مطالعه قرار گرفته است. موضوعی که در این پایان‌نامه مطرح و مورد مطالعه قرار گرفته است، بررسی تاثیر پارامترهای خاک بر پاسخ لرزه‌ای قطعات پیش‌ساخته بتنی پوشش‌های تونل است.

¹ Closed form solutions

² Numerical methods

³ Physical tests

⁴ Finite difference method

⁵ Precast concrete segments

۱-۳- تاریخچه‌ای از موضوع تحقیق

درک رفتار سازه‌های زیرزمینی، به‌خصوص تونل‌ها در طول زمین‌لرزه‌ها همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌ها در مهندسی ژئوتکنیک^۱ بوده است. با وجود این‌که تونل‌ها نسبت به سازه‌های احداث شده روی سطح زمین، در برابر زلزله از امنیت بالاتری برخوردارند، آسیب‌های اخیر وارد آمده به برخی از این تونل‌های مهم از جمله زمین‌لرزه کوبه در ژاپن (۱۹۹۵)، زمین‌لرزه چی‌چی در تایوان (۱۹۹۹)، زمین‌لرزه بلو در ترکیه (۱۹۹۹)، زمین‌لرزه بلده در ایران (۲۰۰۴)، زمین‌لرزه سیچوان در چین (۲۰۰۸) و زمین‌لرزه اخیر والپارایزو در شیلی (۲۰۱۴) ضرورت لحاظ بار دینامیکی در طراحی سازه‌های زیرزمینی را پررنگ کرده است (Pakbaz & Yareevand, 2005; Sedarat, Kozak, Hashash,) (Shamsabadi, & Krimotat, 2009).

اوون^۲ و شوول^۳، معتقد بودند که رفتار یک سازه زیرزمینی در طول رویداد لرزه‌ای را می‌توان با یک تیر الاستیک مرتبط با تغییر شکل اعمالی از زمین درون‌گیر آن تقریب زد (Owen & Scholl, 1981). پینزن^۴ (۲۰۰۰) و حشاش^۵ و همکاران (۲۰۰۵)، نشان دادند که به‌جز در حالتی که تونل توسط یک گسل قطع شده باشد، مؤلفه‌ای که بیش‌ترین تأثیر را رفتار پوشش نگهداری تونل تحت بارهای لرزه‌ای دارد، تغییر شکل در سطح مقطع تونل است که با انتشار موج برشی ایجاد می‌گردد (Penzien, 2000)، (Hashash, Park, John, & Yao, 2005). تغییر شکل در سطح مقطع عموماً در دو بعد و به‌صورت کرنش صفحه‌ای و شبه استاتیک ساده‌سازی شده و همچنین بدون در نظر گرفتن اندرکنش لرزه‌ای مدل‌سازی می‌شود. به سبب این ساده‌سازی‌ها، راه‌حل‌های الاستیک^۶ و فرم بسته‌ی^۷ متعددی به‌منظور تعیین نیروهای سازه‌ای ایجاد شده تحت بارهای لرزه‌ای در پوشش نگهداری تونل-های با مقطع دایره توسعه‌یافته است. به عنوان مثال می‌توان به کارهای انجام‌شده توسط ونگ (۱۹۹۳)، پینزن و وو^۸ (۱۹۹۸)، پینزن (۲۰۰۰)، بوبت^۹ (۲۰۰۳)، پارک^۱ و همکاران (۲۰۰۹) و

¹ Geotechnical Engineering

² Owen

³ Scholl

⁴ Penzien

⁵ Hashash

⁶ Elastic Solutions

⁷ Closed Form

⁸ wu

⁹ Bobet

کوریلیانو^۲ و همکاران (۲۰۱۱) اشاره کرد.

حشاش و همکاران اختلاف روش‌های کار شده توسط ونگ و پنزین و Wu را مورد بررسی قرار داده و با همان فرض‌ها از مدل‌سازی عددی برای درک بهتر این اختلاف‌ها و دلایل ایجاد آن‌ها تلاش کرده است. مقایسه‌ها به روشنی نشان می‌دهد که راه‌حل ونگ تخمین واقعی‌تری برای نیروها در پوشش نگهداری و در شرایط بدون لغزش ارائه می‌دهد. این موضوع نشان می‌دهد که روش پینزن را نباید در حالت بدون لغزش به کاربرد (Hashash et al., 2005). این اختلاف‌ها همچنین توسط پارک و همکاران و بزاز و بشارت نیز گزارش شده است (Park, Tantayopin, & Tontavanich, 2006). (Bazaz & Besharat, 2008).

ونگ نخستین کسی است که راه‌حلی فرم بسته تعیین نیروهای ایجاد شده در پوشش نگهداری تونل تحت بارهای لرزه‌ای ارائه کرده است. او روابطی را برای تعیین نیروی نرمال و گشتاور خمشی در شرایط بدون لغزش به دست آورده است (Wang, 1993). اخیراً، کورتزیز^۳ و همکاران، به منظور بهبود روش ارائه شده توسط ونگ رابطه دیگری را برای تعیین بیشینه گشتاور خمشی در شرایط بدون لغزش پیشنهاد کرده‌اند (Kouretzis, Sloan, & Carter, 2013).

با توجه به پیشرفت روزافزون در عرصه فناوری و رایانه‌ها در سال‌های اخیر، به‌منظور بررسی رفتار تونل‌ها تحت بارهای لرزه‌ای تمایل به استفاده از روش‌های عددی و مدل‌سازی دوبعدی و سه‌بعدی بیشتر شده است. لی^۴ و همکاران (۲۰۰۹)، هانگ و همکاران (۲۰۰۹) و رومرو و کائوفیلد (۲۰۱۲) پیشنهاد کرده‌اند که یک بار استاتیکی معادل نسبت به بار دینامیکی، نیروهای سازه‌ای کمتری را در پوشش نگهداری ایجاد می‌کند. تورکاتو و همکاران، به منظور بررسی تأثیر لایه‌بندی محیط درون‌گیر تونل مدل‌سازی عددی تحت بارهای لرزه‌ای انجام داده‌اند که در آن ابعاد تونل و ضخامت پوشش نگهداری را نیز لحاظ کرده‌اند (Torcato, 2010). لازم به ذکر است که در تمامی مطالعات ذکر شده در بالا، پوشش نگهداری به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شده است.

همچنین پاک‌باز و یاری‌وند (۲۰۰۵)، به منظور بررسی تأثیر بار زلزله بر تونل با مقطع دایره و در محیط درون‌گیر با رفتار الاستوپلاستیک، مدل‌سازی و تحلیل عددی دو بعدی را با استفاده از نرم‌افزار CA2 انجام داده‌اند. آن‌ها برای نشان دادن تفاوت‌ها و شباهت‌های روش عددی و راه‌حل‌های فرم

¹ park

² corigliano

³ Kouretzis

⁴ Lee

بسته، نتایج حاصل از مدل‌سازی را با راه‌حل‌های فرم بسته مقایسه کردند. در تجزیه و تحلیل به‌روش عددی در گذشته، بارهای لرزه‌ای به‌صورت شبه‌استاتیکی در نظر گرفته می‌شدند. متأسفانه تمامی تحلیل‌های شبه‌استاتیک در مطالعات پیشین، با فرض‌های ساده‌کننده‌ای که در روش‌های فرم بسته نیز در نظر گرفته شده است، انجام گرفته‌اند و دارای محدودیت‌هایی در کاربرد هستند. مهم‌ترین نقطه ضعف مدل‌های شبه‌استاتیک آن است که تغییرات وابسته به زمان رفتار سازه در آن‌ها در نظر گرفته نمی‌شود. اما همان‌طور که اشاره شد، با پیشرفت رایانه‌ها امروزه می‌توان تغییرات وابسته به زمان رفتار سازه‌ها را تحت بارهای لرزه‌ای به‌صورت دینامیکی بررسی کرد.

۴-۱- ضرورت تحقیق

امروزه با توجه به روند رو به افزایش جمعیت جهان و همچنین نیاز به جابه‌جایی و حمل و نقل افراد در محیط‌های شهری استفاده از تونل‌ها روز به روز افزایش می‌یابد. سیستم نگهداری مورد استفاده در این تونل‌ها قطعات بتنی پیش‌ساخته می‌باشد که با نصب در کنار یکدیگر حلقه‌های بتنی^۱ را تشکیل می‌دهند. حلقه‌ها به یکدیگر در راستای عرضی قطعات پیچ شده و پوشش بتنی تونل را شکل می‌دهند. طراحی چنین سیستم پوششی بایستی ملزومات اساسی برای پایداری سازه‌ای، دوام و هزینه را برآورده سازد. برای دستیابی به ملزومات طراحی، ضروری است که بتوان نیروهایی را که پوشش بتنی در طول عمر بهره‌برداری متحمل می‌شود، تعیین کرد. یکی از عواملی که باعث ایجاد نیروهای محوری و برشی و همچنین گشتاور خمشی در پوشش بتنی تونل می‌شود، زمین‌لرزه است. با وجود این‌که تونل‌ها نسبت به سازه‌های احداث شده روی سطح زمین، از امنیت بالاتری برخوردارند، آسیب‌های اخیر وارد آمده به دلیل زمین‌لرزه به برخی از این تونل‌های ضرورت لحاظ بار دینامیکی در طراحی سازه‌های زیرزمینی را پررنگ کرده است.

¹ Segmental ring

۱-۵- هدف کلی و آرمانی تحقیق

علی‌رغم مطالعات بسیاری که در طی سال‌ها انجام شده، رفتار پوشش بتنی نگهداری تونل‌ها تحت بار-های لرزه‌ای ناشی از زلزله همچنان ناشناخته مانده است. علاوه بر این روش‌های تحلیلی صرفاً یک دید اولیه و تخمینی از بارهای لرزه‌ای وارد بر پوشش نگهداری ارائه داده و با محدودیت‌هایی همراه هستند. از این رو ضرورت بهبود روش‌های موجود و بررسی دقیق‌تر این موضوع به روشنی احساس می‌شود. علاوه بر این توسعه‌ی مدل‌های عددی جدیدتر با در نظر گرفتن پارامترهای محیط درون‌گیر تونل و برای زلزله‌های مختلف می‌تواند دید روشنی از رفتار سازه و سیستم نگهداری ارائه کرده و به طراحی مهندسی تونل تحت بارهای لرزه‌ای ناشی از زلزله کمک کند.

با توجه به اینکه ایران از کشورهای لرزه‌خیز جهان محسوب می‌شود، بررسی پایداری این تونل-ها در برابر بار زلزله از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. عوامل مختلفی بر میزان خسارت ناشی زلزله موثر است که از جمله آن‌ها می‌توان به محتوای فرکانسی امواج، پارامترهای محیط درون‌گیر و سیستم نگهداری تونل و همچنین ابعاد آن اشاره نمود. هدف از این تحقیق بررسی تاثیر پارامترهای مربوط به محیط درون‌گیر تونل به روش عددی و مقایسه این نتایج با روش‌های تحلیلی بر روی قطعات بتنی پوشش تونل است.

۱-۶- روش انجام تحقیق

در این تحقیق تاثیر محیط دربرگیرنده تونل بر عملکرد و پاسخ قطعات بتنی پوشش تونل‌ها تحت بارگذاری لرزه‌ای مورد بررسی قرار خواهد گرفت. در این راستا تحلیل‌های عددی در محیط‌های متفاوت خاک تحت بارهای ناشی از زمین‌لرزه به روش تفاضل محدود¹ و با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام گرفته است.

یکی از نکات اساسی در طراحی سازه‌های زیرزمینی عدم قطعیت در پارامترهای زلزله و نیز خصوصیات فیزیکی و مکانیکی خاک‌ها می‌باشد. در این پژوهش یک تونل مشخص با روش‌های مختلف تحلیلی و فرم بسته برای گروه‌های مختلف خاک تحلیل شده است.

¹ Finite Difference Method

به منظور بررسی موضوع تحقیق، پاسخ دینامیکی قطعات بتنی بر اساس تغییرات نیروی محوری، نیروی برشی و گشتاور خمشی با مطالعه‌ی تاثیر پارامترهایی چون مدول تغییرشکل پذیری، ضریب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی، ضخامت پوشش نگهداری و تعداد قطعات بتنی مورد مطالعه قرار گرفته و مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با روش‌های تحلیلی¹ ارائه شده که برای پوشش‌هایی به صورت یک حلقه کامل و بدون اتصال توسعه داده شده‌اند صورت گرفته است.

۱-۷- ساختار پایان نامه

پژوهش پیش رو در قالب پنج فصل و به صورتی که در زیر آمده، ارائه شده است:

- در فصل آغازین این پایان‌نامه در مورد کلیات پژوهش انجام شده سخن به میان آمده است. مواردی که در این فصل بیان شده‌اند شامل: عنوان تحقیق، تاریخچه‌ای از موضوع تحقیق، تعریف موضوع تحقیق، هدف یا هدف‌های کلی و آرمانی تحقیق و روش انجام تحقیق هستند.
- در دومین فصل از پایان‌نامه، مروری بر پژوهش‌های پیشین انجام شده، به منظور بررسی جوانب مختلف پژوهش‌های پیشین و همچنین نقاط ضعف و قوت آن‌ها، آورده شده است. در این فصل پس از بیان مقدمه کوتاهی به روش‌های تحلیل رفتار سازه‌های زیرزمینی پرداخته شده است.
- در فصل سوم، روش انتخاب شده برای این پژوهش معرفی و مورد بحث قرار می‌گیرد. دلایل انتخاب این روش بیان شده و ابزار مورد استفاده برای پژوهش که نرم‌افزار Flac3D است معرفی می‌شود.
- فصل چهارم این پایان‌نامه به تجزیه و تحلیل نتایج حاصل از تحقیق و همچنین بررسی روند تغییرات گشتاور خمشی و نیروهای محوری پرداخته می‌شود.

¹ Analytical methods

- در فصل پنجم نتایج نهایی تحقیق و همچنین پیشنهادهایی برای تحقیق‌های آینده ارائه می‌شود.

فصل ۲: مروری بر مطالعات پیشین

۱-۲ - مقدمه

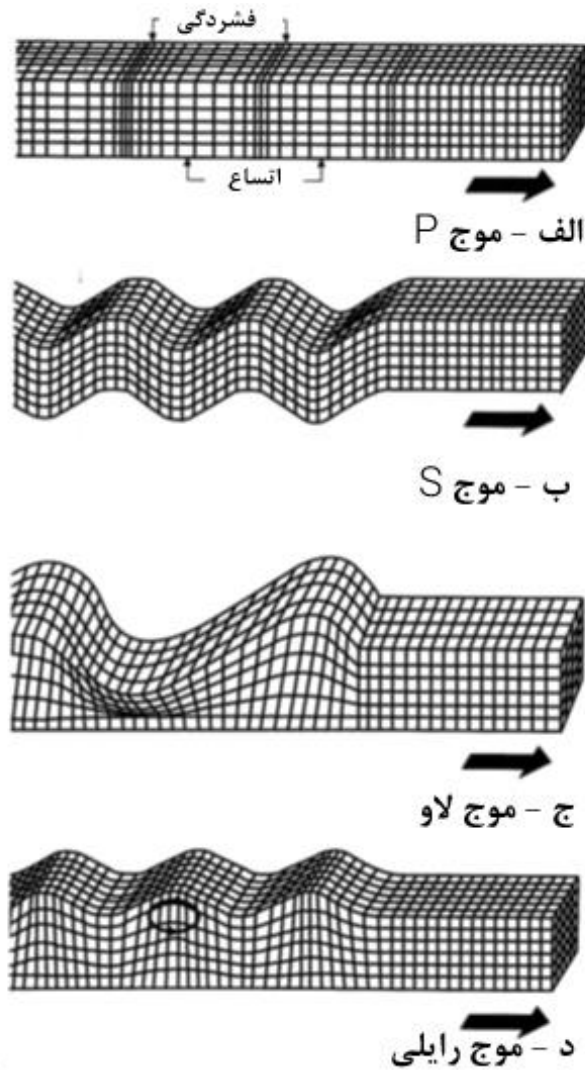
داشتن درک روشنی از رفتار یک سازه زیرزمینی در مقابل بارهای لرزه‌ای ناشی از پدیده‌های مختلف، همواره یکی از مهم‌ترین چالش‌های مهندسی ژئوتکنیک بوده است. با وجود این که سازه‌های زیرزمینی نسبت به سازه‌های سطحی در مقابل بارهای دینامیکی ناشی از زمین‌لرزه از مقاومت و ایمنی بالاتری برخوردار هستند، اما خسارت‌هایی که برخی زمین‌لرزه‌ها به سازه‌های زیرزمینی وارد آورده‌اند، موجب شده است تا پژوهشگران بارهای لرزه‌ای را نیز در طراحی سازه‌های زیرزمینی در نظر بگیرند. به‌طور کلی تاثیر زمین‌لرزه بر سازه‌های زیرزمینی را می‌توان در دو دسته کلی لرزش زمین و گسیختگی زمین دسته‌بندی کرد (Bazaz & Besharat, 2008). لرزش زمین در اثر انتشار موج لرزه‌ای در پوسته زمین ایجاد می‌شود. این لرزش‌ها ممکن است حتی ناحیه‌ای به مساحت صدها مایل مربع از ناحیه شکست گسل را شامل شود. در این فصل به بررسی چند مورد از مطالعات آماری انجام شده در این زمینه پرداخته می‌شود. همچنین مطالعات انجام شده که در آن‌ها از روش‌های فرم بسته و روش‌های عددی استفاده شده است، بررسی می‌شوند.

۲-۲ - مطالعات اوون و شول

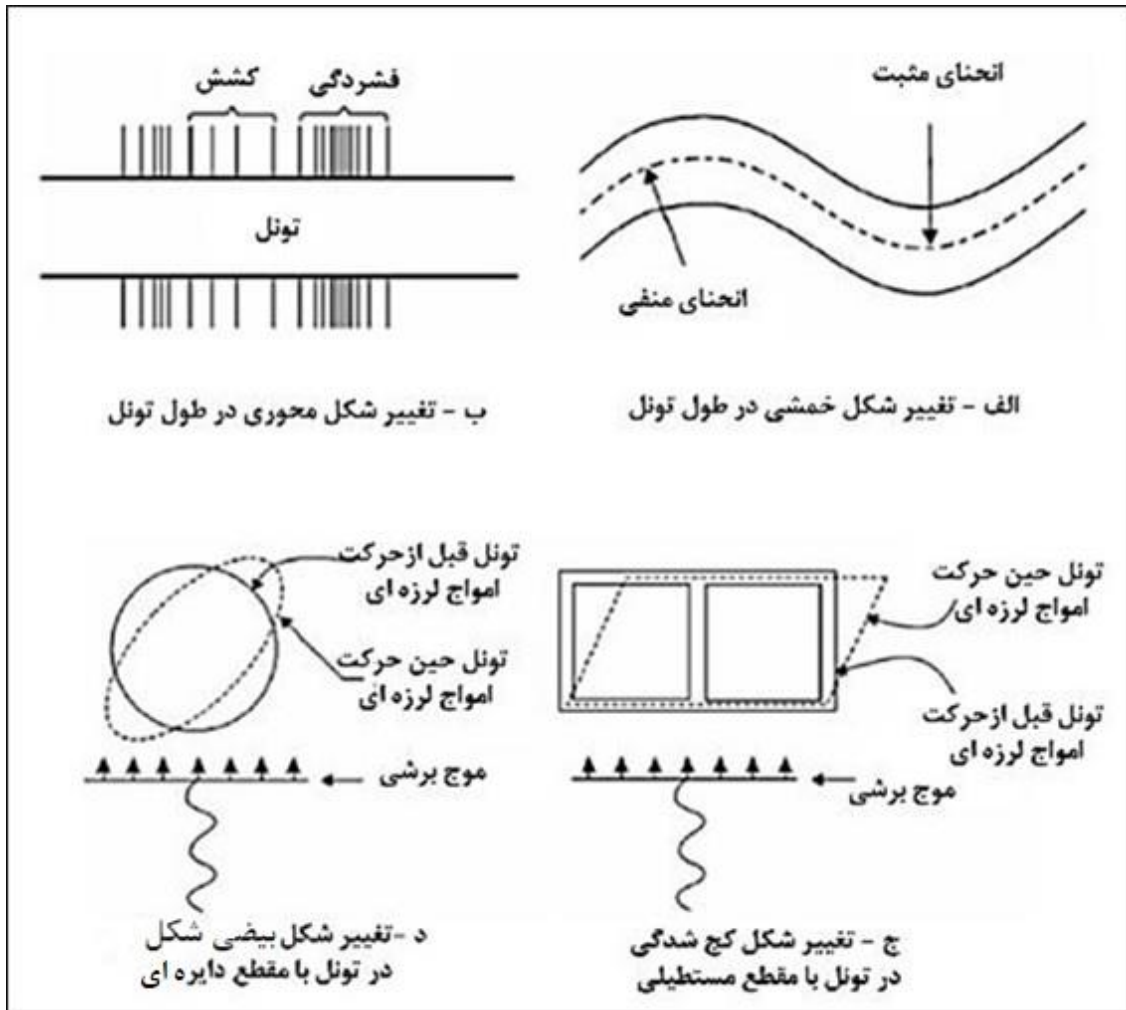
اوون و شول تعداد ۱۲۷ مطالعه موردی شامل گزارش خسارات در تونل‌ها و آبگذرهای احداث شده به روش کند و پوش در خاک و نیز معادن زیرزمینی و شفت‌ها انجام دادند. بر اساس مطالعات آن‌ها خسارات وارد شده به سازه‌های احداثی به روش کند و پوش قابل ملاحظه است. این سازه‌ها در زمین‌های با پوشش خاک کم و شرایط زمینی سست احداث شده‌اند. آن‌ها معتقد بودند که رفتار یک سازه زیرزمینی در طول رویداد لرزه‌ای تحت انواع مختلف امواج لرزه‌ای که در شکل (۱-۲) مشاهده می‌شود، را می‌توان با یک تیر الاستیک مرتبط با تغییر شکل اعمالی از زمین درون‌گیر آن تقریب زد. چهار نوع از تغییر شکل برای پاسخ سازه‌های زیرزمینی به بار-های لرزه‌ای در شکل (۲-۲) بیان گردیده است (Owen & Scholl, 1981).

✓ محوری

- ✓ خمش طولی
- ✓ کج شدگی
- ✓ بیضی شدن سطح مقطع یا تغییر شکل دندانهای



شکل (۱-۲) انواع امواج لرزه‌ای (Wang, 1993)



شکل (۲-۲) تغییر شکل سازه‌های زیرزمینی در اثر بارهای لرزه‌ای (Owen & Scholl, 1981)

نتایج حاصل از پژوهش‌های آن‌ها را می‌توان به این صورت بیان کرد که خسارات وارد شده به سازه‌های احداثی به روش کند و پوش بیشتر به علت فشار جانبی خاکریزی در محیط پیرامون بوده است. مدت زمان وقوع لرزش‌های شدید فاکتور مهمی در تعیین شدت خسارت وارده به سازه است. بدین ترتیب که خرابی‌هایی که منشا ابتدای وقوع آن‌ها حرکت زمین بوده است مانند پدیده گسلش و ریزش شیروانی‌ها در اثر وقوع پدیده واژگونی تنش چند برابر شده است (Owen & Scholl, 1981).

۲-۳- مطالعات شارما و جوود^۱

شارما و جوود مطالعات اوون و شول را گسترش دادند و ۱۹۲ گزارش بین المللی را از وقوع خسارت در اثر زلزله مورد بررسی قرار دادند. آن‌ها آسیب‌پذیری سازه‌های زیرزمینی را بر اساس ۶ فاکتور مهم و تاثیر گذار معرفی کردند.

- ✓ ضخامت روباره
- ✓ نوع سنگ - خاک
- ✓ بیشترین شتاب زمین
- ✓ بزرگای زلزله
- ✓ فاصله کانونی زلزله
- ✓ نوع پوشش تونل

همان طور که در جدول (۱-۲) مشاهده می‌شود، با افزایش روباره خسارات وارده به سازه کاهش می‌یابد. نوع مصالح پیرامونی تاثیر مهمی در خسارات وارده به سازه دارد. چنانچه خسارات وارده به تونل در محیط سنگی کمتر از محیط خاک است.

جدول (۱-۲) اطلاعات مربوط به ضخامت روباره و خسارت وارد بر تونل (Sharma & Judd, 1991)

موارد آسیب دیده	وسعت خرابی					ضخامت روباره
	درصدی از گروه	هیچ	زیاد	متوسط	کم	
درصدی از مجموع						
۳۵	۵۸	۲۴	۱۰	۹	۱۴	۰-۵۰
۵	۲۹	۱۲	۲	۱	۲	۵۰-۱۰۰
۴	۴۰	۶	۱	۰	۳	۱۰۰-۲۰۰
۷	۳۲	۱۳	۱	۲	۳	۲۰۰-۳۰۰
۸	۶۴	۴	۰	۳	۴	۳۰۰-۵۰۰
۱۱	۸۳	۲	۰	۱	۹	۵۰۰-۱۰۰۰
۱	۲۰	۴	۰	۱	۰	۱۰۰۰-۱۵۰۰
۲۹	-	۳۳	۷	۶	۱۴	نامشخص
۱۰۰	-	۹۸	۲۲	۲۳	۴۹	مجموع

¹ Sharma and Judd

با توجه به جدول (۲-۲) رابطه ماکزیمم شتاب زمین^۱ با خسارات حادثه به این صورت است که، برای شتاب کمتر از $0/15$ g ، فقط ۲۰ مورد از ۸۰ مورد گزارش وقوع خسارت داشته‌اند. از بین ۹۴ مورد بررسی شده برای شتاب بیشتر از $0/15$ g ، ۶۵ مورد گزارش خسارت ارائه شده است.

جدول (۲-۲) اطلاعات مربوط به ماکزیمم شتاب زمین و خسارت وارد بر تونل (Sharma & Judd, 1991)

موارد آسیب دیده		وسعت خرابی			شتاب حداکثر	
درصدی از مجموع	درصدی از گروه	هیچ	زیاد	متوسط	کم	(%)
۷	۱۷	۲۹	۰	۲	۵	۰-۵
۱۴	۲۹	۳۱	۲	۵	۶	۵-۱۵
۲۸	۶۰	۱۷	۱۱	۱	۱۴	۱۵-۲۵
۱۱	۶۷	۵	۲	۴	۴	۲۵-۳۵
۶	۵۵	۵	۲	۲	۲	۳۵-۴۵
۲۳	۱۰۰	۰	۱	۸	۱۳	۴۵-۵۵
۱	۵۰	۱	۰	۰	۱	۵۵-۶۵
۱۰۰	-	۹۸	۲۲	۲۳	۴۹	مجموع

بیش از نیمی از گزارش‌های وقوع خسارت مربوط به زلزله با بزرگای بیش از ۷ بوده است. با توجه به اطلاعات موجود در جدول (۲-۳) با کاهش فاصله کانونی زلزله، خسارت افزایش یافته و اگر فاصله مذکور بین ۲۵-۵۰ km باشد تونل در برابر وقوع زلزله بسیار آسیب پذیر است.

از بین ۳۳ مورد تونل با پوشش بتنی، ۲۴ مورد دارای بتن غیر مسلح و ۹ مورد دارای بتن مسلح بودند. در این بین، ۷ مورد بدون خسارت، ۱۶ مورد دارای خسارت جزئی، ۳۰ مورد خسارت متوسط و ۱۱ مورد به طور کلی خسارت دیده بودند (جدول (۲-۴)). نتایج بررسی نشان دهنده آسیب زیاد زلزله به تونل‌های دارای پوشش بود که به علت تعیین دقیق نواحی ترک خوردگی و تشخیص آسان میزان آسیب‌های وارد شده است (Sharma & Judd, 1991).

¹ Peak Ground Acceleration

جدول (۳-۲) اطلاعات مربوط به فاصله از مرکز زلزله و خسارت وارد بر تونل (Sharma & Judd, 1991)

فاصله از مرکز (Km)	وسعت خرابی			موارد آسیب دیده	
	کم	متوسط	زیاد	هیچ	درصدی از گروه
۰-۲۵	۳۰	۱۳	۷	۲۰	۷۱
۲۵-۵۰	۲	۷	۸	۲۵	۴۲
۵۰-۱۰۰	۱۰	۱	۲	۲۶	۳۳
۱۰۰-۱۵۰	۲	۱	۱	۹	۳۱
۲۰۰-۱۵۰	۱	۰	۰	۶	۱۴
۲۰۰-۳۰۰	۰	۰	۰	۳	۰
نامشخص	۴	۱	۴	۹	-
مجموع	۴۹	۲۳	۲۲	۹۸	-

جدول (۴-۲) اطلاعات مربوط به سیستم نگهداری و خسارت وارد بر تونل (Sharma & Judd, 1991)

سیستم نگهداری	وسعت خرابی			موارد آسیب دیده	
	کم	متوسط	زیاد	هیچ	درصدی از گروه
بدون پوشش	۲۱	۱۲	۷	۶۶	۳۸
چوب بست	۱	۱	۱	۰	۱۰۰
مصالح بنایی	۸	۳	۲	۴	۷۶
بتن	۸	۲	۸	۶	۷۹
بتن مسلح	۴	۱	۳	۱	۸۹
نامشخص	۷	۴	۱	۲۱	-
مجموع	۴۹	۲۳	۲۲	۹۸	-

۲-۴- مطالعات دودینگ و روزن^۱

داودینگ و روزن، ۷۱ مورد پاسخ تونل به زلزله را گزارش کرده‌اند. خلاصه آمار آن‌ها به قرار زیر است (Dowding and Rozen, 2005):

- تونل‌های مورد بررسی شامل تونل‌های حمل و نقل ریلی و آب بر با قطرهای ۱۰ تا ۲۰ فوت بوده‌اند.
- اکثر تونل‌ها در سنگ‌های با چگالی‌های متفاوت بنا شده بود.

¹ Dowding and Rozen

- روش اجرایی تونل‌ها و نصب پوشش گسترده‌گی زیادی داشت. پوشش تونل‌ها شامل نواحی بدون پوشش، پوشش چوب، آجرهای بنایی و بتن بوده است.
- تونل‌ها در مقایسه با سازه‌های رو زمینی در برابر بارگذاری لرزه‌ای به مراتب ایمن‌تر هستند.
- تونل‌های عمیق حفر شده در سنگ، ایمن‌تر از تونل‌ها در نواحی کم‌عمق می‌باشند.
- در نواحی با شتاب لرزه‌ای کم‌تر از $0.19g$ ، هیچ خسارتی مشاهده نمی‌شود.
- در بازه تغییرات شتاب $(0.4 - 0.25)g$ عمده خسارات شامل ترک خوردگی آجر یا بتن پوشش تونل و ریزش سنگ‌های شل می‌باشد.
- برای شتاب‌های کم‌تر از $0.5g$ ، در اثر لرزش زمین هیچ خرابی ملاحظه نمی‌شود.
- در نواحی که تونل از گسل عبور می‌کند یا در نواحی دارای تغییر مکان زیاد، خسارات مشاهده شده شدید ولی محلی است و شامل خرابی کلی مقطع می‌باشد.

۲-۵- مطالعات ونگ

با بررسی عملکرد سازه‌های زیرزمینی در زلزله به بزرگای $7/8$ در Tang-Shan و در سال ۱۹۷۶، نتایج زیر گزارش شده است (Wang, 1993).

- تونلی شیب‌دار که با گذر از محیط پیرامونی خاک به ضخامت ۱۳ فوت وارد محیط سنگ آهکی می‌شد ترک‌هایی به پهنای ۲ سانتی‌متر در دیواره جانبی داشت.
- خسارت وارده به سازه‌های زیرزمینی تا عمق ۵۰۰ متر، رابطه‌ای لگاریتمی با عمق زمین دارند.

۲-۶- روش‌های تحلیلی

پینزن و حشاش^۱ و همکاران، نشان دادند که به‌جز در حالتی که تونل توسط یک گسل قطع شده باشد، مؤلفه‌ای که بیش‌ترین تأثیر را بر رفتار پوشش نگهداری تونل تحت بارهای لرزه‌ای دارد، تغییر شکل در سطح مقطع تونل است که با انتشار موج‌برشی ایجاد می‌گردد (Hashash et al., 2005). تغییر شکل در سطح مقطع عموماً در دو بعد و به‌صورت کرنش صفحه‌ای و شبه استاتیک ساده‌سازی شده و

¹ Hashash

همچنین بدون در نظر گرفتن اندرکنش لرزه‌ای مدل‌سازی می‌شود. به سبب این ساده‌سازی‌ها، راه-حل‌های الاستیک و فرم بسته‌ی متعددی به‌منظور تعیین نیروهای سازه‌ای ایجادشده تحت بارهای لرزه‌ای در پوشش نگهداری تونل‌های با مقطع دایره توسعه‌یافته است. به عنوان مثال می‌توان به کارهای انجام‌شده توسط ونگ^۱، پینزن و همکاران^۲، پینزن، بوبت^۳، پارک و همکاران^۴ و کوریلیانو و همکاران^۵ اشاره کرد.

حشاش و همکاران در سال ۲۰۰۵، اختلاف روش‌های کارشده توسط ونگ و پینزن و همکاران را مورد بررسی قرار داده و تحت همان فرض‌ها از مدل‌سازی عددی برای درک بهتر این اختلاف‌ها و دلایل ایجاد آن‌ها تلاش کرده است.

به‌طور کلی راه‌حل‌های فرم بسته با محدودیت‌های زیر مواجه هستند (Sedarat et al., 2009):

- ✓ پوشش نگهداری تونل و همچنین خاک درون‌گیر آن همگن و با رفتار الاستیک خطی است.
- ✓ پوشش نگهداری با مقطع دایره و با ضخامت ثابت است.
- ✓ تأثیر مراحل حفاری تونل در نظر گرفته نشده است.
- ✓ مدل‌های رفتاری مختلف محیط را نمی‌توان در آن‌ها در نظر گرفت.
- ✓ ...

همان‌گونه که در شکل‌های شکل (۲-۳) و شکل (۲-۴) مشاهده می‌شود، با در نظر گرفتن تونلی به شعاع R که به اندازه کافی زیر سطح زمین است و تحت بار دینامیکی ناشی از زمین‌لرزه قرار دارد، تنش‌های حاصل از این بار دینامیکی را می‌تواند از نوع تنش برشی در نظر گرفت. این تنش را می‌توان معادل تنش فشاری و کششی اصلی در زاویه 45° و در جهت تنش برشی خالص در نظر گرفت (Park et al., 2006).

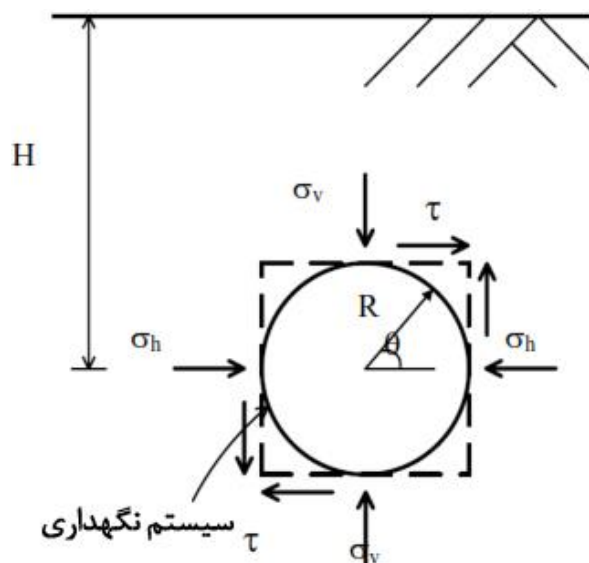
1 Wang

2 Penzein

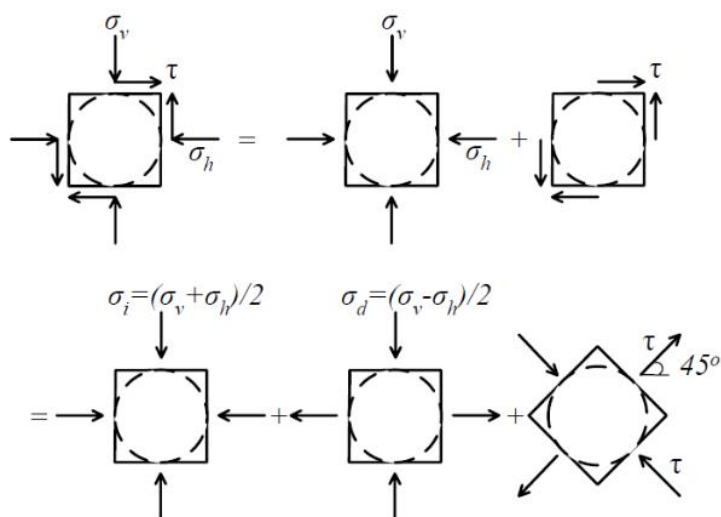
3 Bobet

4 Park et al

5 Corigliano et al



شکل (۳-۲) تونل با مقطع دایره‌ای (Park et al., 2006)



شکل (۴-۲) بارگذاری لرزه‌ای برشی و بارگذاری استاتیکی معادل (Park et al., 2006)

تنش برشی را می‌توان با استفاده از کرنش برشی میدان آزاد γ_c به صورت زیر تخمین زد (Park et al., 2006; Penzien & Wu, 1998).

$$\tau = \frac{E\gamma_c}{2(1+\nu)} \quad (۱-۲)$$

که در این رابطه γ_c را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$\gamma_c = \frac{u(-R, t_c) - u(R, t_c)}{2R} \quad (2-2)$$

یا

$$\gamma_c = \frac{V_{max}}{V_s} \quad (3-2)$$

در روابط بالا $u(y, t_c)$ جابه‌جایی افقی میدان آزاد زمین در عمق y و زمان t_c است که موجب بیشترین جابه‌جایی برشی برشی خاک در عمق $2R$ از تونل مورد نظر می‌شود. V_{max} بیشینه سرعت موج برشی، V_s سرعت حرکت موج برشی در خاک، E مدول تغییرشکل پذیری خاک و ν ضریب پواسون آن است (Park et al. 2009).

۲-۶-۲- روش‌های تحلیلی تحت بارهای استاتیکی

اینشتین و شواترز^۱ در سال ۱۹۹۷ راه‌حلی را بر اساس روش سختی نسبی^۲ برای محاسبه نیروهای سازه‌ای و در دو حالت بدون لغزش^۳ و لغزش کامل^۴ پیشنهاد دادند (Einstein & Schwartz, 1979).

۲-۶-۲-۱- راه حل بدون لغزش

در این حالت در شرایط مرزی بین خاک و سیستم نگهداری هیچ گونه جابه‌جایی برشی نسبی وجود ندارد. این راه‌حل به‌صورت زیر است:

$$\frac{N}{\sigma_v R} = \frac{1}{2} (1 + K_0)(1 - a_0^*) + \frac{1}{2} (1 - K_0)(1 + 2a_2^*) \cos 2\theta \quad (4-2)$$

¹ Einstein and Schwartz

² Relative Stiffness

³ No-Slip

⁴ Full-Slip

$$\frac{M}{\sigma_v R^2} = \frac{1}{4}(1 - K_0)(1 - 2a_2^* + 2b_2^*)\cos 2\theta \quad (5-2)$$

که در این روابط θ موقعیت زاویه‌ای (پاد ساعت‌گرد)، R شعاع تونل، σ_v تنش قائم، K_0 ضریب جانبی تنش، E مدول یانگ توده خاک، ν ضریب پواسون توده خاک و a_0^* ، a_2^* و b_2^* ضرایب بدون بعد هستند.

$$a_0^* = \frac{C^* F^* (1-\nu)}{C^* + F^* + C^* F^* (1-\nu)} \quad (6-2)$$

$$a_2^* = \beta b_2^* \quad (7-2)$$

$$b_2^* = \frac{C^* (1-\nu)}{2[C^* (1-\nu) + 4\nu - 6\beta - 3\beta C^* (1-\nu)]} \quad (8-2)$$

$$\beta = \frac{(6+F^*)C^* (1-\nu) + 2F^* \nu}{3F^* + 3C^* + 2C^* F^* (1-\nu)} \quad (9-2)$$

که در این روابط C^* و F^* به ترتیب نسبت فشردگی^۱ و انعطاف‌پذیری^۲ هستند:

$$C^* = \frac{ER(1-\nu_s^2)}{E_s A_s (1-\nu^2)} \quad (10-2)$$

$$F^* = \frac{ER^3(1-\nu_s^2)}{E_s J_s (1-\nu^2)} \quad (11-2)$$

همچنین E_s مدول یانگ سیستم نگهداری، ν_s ضریب پواسون سیستم نگهداری، A_s میانگین سطح مقطع سیستم نگهداری در واحد طول تونل (برای سیستم نگهداری با ضخامت ثابت t ، $A_s = t$) و J_s گشتاور اینرسی سیستم نگهداری در واحد طول تونل (برای سیستم نگهداری با ضخامت ثابت t ،

¹ Compressibility ratio

² Flexibility ratio

$(J_s = \frac{t^3}{12})$ است (Einstein & Schwartz, 1979).

۲-۲-۶-۲- راه حل لغزش کامل

در این حالت بین خاک و سیستم نگهداری هیچ گونه انتقال تنش برشی وجود ندارد. این راه حل به صورت زیر است:

$$\frac{N}{\sigma_v R} = \frac{1}{2} \{ (1 + K_0)(1 - a_0^*) + (1 + K_0)(1 - 2a_2^*) \cos 2\theta \} \quad (12-2)$$

$$\frac{M}{\sigma_v R^2} = \frac{1}{4} \{ (1 - K_0)(1 - 2a_2^*) \cos 2\theta \} \quad (13-2)$$

که a_0^* و a_2^* ضرایب بدون بعد هستند:

$$a_0^* = \frac{C^* F^* (1 - \nu)}{C^* + F^* + C^* F^* (1 - \nu)} \quad (14-2)$$

$$a_2^* = \frac{(F^* + 6)(1 - \nu)}{2F^*(1 - \nu) + 6(5 - 6\nu)} \quad (15-2)$$

۲-۶-۳- روش های تحلیلی تحت بارگذاری لرزه ای

وَنگ نخستین کسی است که راه حلی فرم بسته برای تعیین نیروهای ایجاد شده در سیستم نگهداری تحت بارهای لرزه ای ارائه کرده است. او روابطی را برای تعیین نیروی محوری^۱ و گشتاور خمشی^۲ در پوشش تونل به دست آورده است. علاوه بر ونگ، پینزن و همکاران، پینزن، بوبت، پارک و همکاران، کوریلیانو و همکاران و کورتزیس نیز روابطی جهت تعیین این نیروها ارائه کرده اند.

¹ Normal Force

² Bending Moment

برای شرایط لغزش کامل روابط زیر را برای محاسبه نیروهای نرمال (T_w) و گشتاور خمشی (M_w) ارائه کرده است (Wang, 1993). این روابط سپس توسط حشاش و همکاران در سال ۲۰۰۵ تکمیل و جمع‌بندی گردید (Hashash et al., 2005).

$$T_w = \frac{1}{6} K_1 \frac{E}{(1+\nu)} R \gamma_{max} \cos \left[2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (۱۶-۲)$$

$$M_w = \frac{1}{6} K_1 \frac{E}{(1+\nu)} R^2 \gamma_{max} \cos \left[2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (۱۷-۲)$$

در این روابط :

$$K_1 = \frac{12(1-\nu)}{2F+5-6\nu} \quad (۱۸-۲)$$

برای شرایط بدون لغزش نیز روابط زیر ارائه گردیده است (Wang, 1993):

$$T_w = K_2 \frac{E}{2(1+\nu)} R \gamma_{max} \cos \left[2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (۱۹-۲)$$

$$M_w = \frac{1}{6} K_1 \frac{E}{(1+\nu)} R^2 \gamma_{max} \cos \left[2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \right] \quad (۲۰-۲)$$

در این رابطه :

$$K_2 = 1 + \frac{F[(1-2\nu)-(1-2\nu)C] - \frac{1}{2}(1-2\nu)^2 + 2}{F[(3-2\nu)+(1-2\nu)C] + C \left[\frac{5}{2} - 8\nu + 6\nu^2 \right] + 6 - 8\nu} \quad (۲۱-۲)$$

¹ Wang

$$C = \frac{E(1-\nu_s^2)R}{E_s t(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (22-2)$$

$$F = \frac{E(1-\nu_s^2)R^3}{6E_s J_s(1+\nu)} \quad (23-2)$$

جدول (۵-۲) پارامترها و توضیحات مربوط به روابط ارائه شده توسط ونگ (Wang, 1993)

واحد	توضیحات	پارامتر
-	ضریب پاسخ سیستم نگهداری لغزش کامل	K_1
-	ضریب پاسخ سیستم نگهداری بدون لغزش	K_2
-	نسبت انعطاف پذیری سیستم نگهداری	F
-	نسبت فشردگی سیستم نگهداری	C
N/m^2	مدول یانگ سیستم نگهداری	E_s
-	نسبت پواسون سیستم نگهداری	ν_s
m	شعاع تونل	R
m	ضخامت سیستم نگهداری	t
m^4/m	گشتاور اینرسی سیستم نگهداری در واحد طول تونل	J_s
N/m^2	مدول یانگ توده خاک	E
-	نسبت پواسون توده خاک	ν
-	بیشینه کرنش برشی میدان آزاد	γ_{max}
rad	زاویه پاد ساعت گرد اندازه گیری شده از دیواره راست تونل	θ

۲-۶-۳-۲ روش پینزن و همکاران

بر اساس پژوهش‌های پینزن و همکاران، تنش برشی را می‌توان با استفاده از کرنش برشی میدان آزاد γ_c به صورت زیر تخمین زد (Penzien & Wu, 1998):

$$\tau = \frac{E\gamma_c}{2(1+\nu)} \quad (24-2)$$

که در این رابطه γ_c را می‌توان از رابطه‌ی زیر محاسبه کرد:

$$\gamma_c = \frac{u(-R, t_c) - u(R, t_c)}{2R} \quad (25-2)$$

$$\gamma_c = \frac{V_{max}}{V_s} \quad (26-2)$$

در روابط بالا $u(y, t_c)$ جابه‌جایی افقی میدان آزاد زمین در عمق y و زمان t_c است که موجب بیشترین جابه‌جایی برشی برشی خاک در عمق $2R$ از تونل مورد نظر می‌شود. V_{max} بیشینه سرعت موج برشی، V_s سرعت حرکت موج برشی در خاک، E مدول تغییرشکل پذیری خاک و ν ضریب پواسون آن است (Penzien & Wu, 1998).

۲-۶-۳-۳- روش پینزن

پینزن بر اساس تحقیقات گذشته در سال ۲۰۰۰، و در جهت تکمیل پژوهش‌های انجام شده در نهایت روشی تحلیلی برای به‌دست آوردن نیروهای سازه‌ای ایجاد شده در سیستم نگهداری ارائه کرده است. او نیز این روابط را برای دو حالت لغزش کامل و بدون لغزش توسعه داده است. بر اساس این روش نیروی محوری (T_{max})، نیروی برشی (V_{max}) و گشتاور خمشی (M_{max}) به‌صورت زیر قابل محاسبه است (Penzien, 2000):

✓ راه حل بدون لغزش

$$T_{max} = \frac{24E_l I \Delta d_{lining}^{no-slip}}{d^3(1-\nu_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right), (\theta = 45^\circ) \quad (27-2)$$

$$M_{max} = \frac{6E_l I \Delta d_{lining}^{no-slip}}{d^2(1-\nu_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right), (\theta = 45^\circ) \quad (28-2)$$

$$V_{max} = \frac{24E_l I \Delta d_{lining}^{no-slip}}{d^3(1-\nu_l^2)} \sin 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right), (\theta = 45^\circ) \quad (29-2)$$

✓ راه حل لغزش کامل

$$T_{max} = \frac{12E_l I \Delta d_{lining}^{full-slip}}{d^3(1-\nu_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right), (\theta = 45^\circ) \quad (30-2)$$

$$M_{max} = \frac{6E_l I \Delta d_{lining}^{full-slip}}{d^2(1-\nu_l^2)} \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right), (\theta = 45^\circ) \quad (31-2)$$

$$V_{max} = \frac{24E_l I \Delta d_{lining}^{full-slip}}{d^3(1-\nu_l^2)} \sin 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right), (\theta = 45^\circ) \quad (32-2)$$

برای به دست آوردن هر کدام از دو دسته روابط بالا نیاز است تا $\Delta d_{lining}^{full-slip}$ و $\Delta d_{lining}^{no-slip}$ از پیش محاسبه شوند (Penzien, 2000):

$$\alpha^{no-slip} = \frac{24E_l I (3-4\nu_{soil})}{d^3 G_{soil} (1-\nu_l^2)} \quad (33-2)$$

$$R^{no-slip} = \frac{4(1-\nu_{soil})}{\alpha^{no-slip} + 1} \quad (34-2)$$

$$\Delta d_{lining}^{no-slip} = \pm R^{no-slip} \cdot \frac{\gamma_{max}}{2} \quad (35-2)$$

$$\alpha^{full-slip} = \frac{24E_l I (5-6\nu_{soil})}{d^3 G_{soil} (1-\nu_l^2)} \quad (36-2)$$

$$R^{full-slip} = \frac{4(1-\nu_{soil})}{\alpha^{full-slip} + 1} \quad (37-2)$$

$$\Delta d_{lining}^{full-slip} = \pm R^{full-slip} \cdot \frac{\gamma_{max}}{2} \quad (38-2)$$

همچنین در روابط بالا داریم :

$$G_{soil} = \rho_{soil} C_s^2 \quad (39-2)$$

$$E_{soil} = 2G_{soil}(1 + \nu_{soil}) \quad (40-2)$$

$$\gamma_{max} = \frac{V_s}{C_s} \quad (41-2)$$

توضیحات مربوط به هر کدام از پارامترهای روابط ارائه شده توسط پینزن در جدول (۶-۲) آورده شده است.

جدول (۶-۲) پارامترها و توضیحات مربوط به روابط ارائه شده توسط پینزن (Penzien, 2000)

پارامتر	توضیحات	واحد
E_I	مدول یانگ سیستم نگهداری	N/m^2
I	گشتاور اینرسی سطح مقطع تونل در واحد طول آن	m^4/m
d	قطر تونل	m
ν_{soil}	نسبت پواسون توده خاک	-
G_{soil}	مدول برشی توده خاک	N/m^2
ν_I	نسبت پواسون پوشش نگهداری تونل	-
γ_{max}	بیشینه کرنش برشی میدان آزاد	-
ρ	دانسیته خاک	Kg/m^3
V_s	بیشینه سرعت موج برشی زمین لرزه	m/s
C_s	سرعت حرکت موج برشی در خاک	m/s
θ	زاویه پاد ساعت گرد اندازه گیری شده از دیواره راست تونل	rad

۲-۶-۳-۴- روش بوبت (۲۰۰۳)

بوبت نیز روابط ریاضی به منظور محاسبه نیروی محوری و لنگر خمشی در تحلیل لرزه‌ای تونل‌ها با در نظر گرفتن اندرکنش زمین - سازه و در شرایط بدون لغزش ارائه کرده است (Bobet, 2003).

$$T_w = -\frac{4(1-\nu_{soil})}{\Delta'} \left\{ F + \left(\frac{1}{2} - \nu_{soil} \right) C + 2 \right\} R\tau \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (42-2)$$

$$M_w = -\frac{4(1-\nu_{soil})}{\Delta'} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2} - \nu_{soil} \right) C \right\} R^2\tau \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (43-2)$$

که در این روابط Δ' از رابطه زیر حاصل می‌شود.

$$\Delta' = F[(3 - 2\nu_{soil}) + (1 - 2\nu_{soil})C] + C \left[\frac{5}{2} - 8\nu_{soil} + 6\nu_{soil}^2 \right] + 6 - 8\nu_{soil} \quad (44-2)$$

۲-۶-۳-۵- روش پارک، تانتایوپین^۱ و همکاران

پارک، تانتایوپین و همکاران نیز در سال ۲۰۰۹ روابطی را برای محاسبه نیروی محوری و گشتاور خمشی در دو حالت بدون لغزش و لغزش کامل به صورت زیر ارائه کرده‌اند (Park et al., 2009):

✓ راه حل بدون لغزش

$$T_w = -\frac{4(1-\nu_{soil})}{\Delta'} \left\{ F + \left(\frac{1}{2} - \nu_{soil} \right) C + 2 \right\} G_s \gamma_s R \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (45-2)$$

$$M_w = -\frac{4(1-\nu_{soil})}{\Delta'} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2} - \nu_{soil} \right) C + 2 \right\} G_s \gamma_s R^2 \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (46-2)$$

که در این روابط Δ' را می‌توان از روش بوبت بدست آورد (Bobet, 2003).

✓ راه حل لغزش کامل

$$T_w = -\frac{4(1-\nu_{soil})}{(2F+5-6\nu_{soil})} \left\{ F + \left(\frac{1}{2} - \nu_{soil} \right) C + 2 \right\} G_s \gamma_s R \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (47-2)$$

¹ Tantayopin

$$M_w = -\frac{4(1-\nu_{soil})}{(2F+5-6\nu_{soil})} \left\{ 1 + \left(\frac{1}{2} - \nu_{soil} \right) C + 2 \right\} G_s \gamma_s R^2 \cos 2\left(\theta + \frac{\pi}{4}\right) \quad (48-2)$$

۶-۳-۶-۲- روش کوریلیانو و همکاران

کوریلیانو و همکاران نیز در سال ۲۰۱۱ روابطی را برای محاسبه نیروی محوری و گشتاور خمشی در دو حالت بدون لغزش و لغزش کامل به صورت زیر ارائه کرده‌اند (Corigliano, Scandella, Lai, & Paolucci, 2011):

✓ راه حل بدون لغزش

$$N_{\vartheta} = \frac{E_g}{2(1+\nu_s)} \gamma_{ffmax} R \left(1 - \frac{\delta}{3} \right) \cos \left[2 \left(\vartheta + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (49-2)$$

$$M_{\vartheta} = \frac{E_g}{2(1+\nu_s)} \gamma_{ffmax} \frac{R^2}{2} \left(1 + \frac{\delta}{3} + \varepsilon \right) \cos \left[2 \left(\vartheta + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (50-2)$$

✓ راه حل لغزش کامل

$$N_{\vartheta} = \frac{E_g}{2(1+\nu_s)} \gamma_{ffmax} R (1 - 2\eta) \cos \left[2 \left(\vartheta + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (51-2)$$

$$M_{\vartheta} = \frac{E_g}{2(1+\nu_s)} \gamma_{ffmax} R^2 (1 - 2\eta) \cos \left[2 \left(\vartheta + \frac{\pi}{4} \right) \right] \quad (52-2)$$

که در این روابط η ، δ و ε به ترتیب به صورت زیر تعریف می‌شوند:

$$\eta = \frac{\left[F^*(1-\nu_s) + 6\left(\frac{1}{2} - \nu_s\right) \right]}{\left[2F^*(1-\nu_s) + 6(5-6\nu_s) \right]} \quad (53-2)$$

$$\delta = \frac{a-2-[4\nu_s+a]\varepsilon}{2+a} \quad (54-2)$$

$$\varepsilon = \frac{\left\{ 2a[1+C^*(1+v_s)] - 6\frac{C^*}{F^*}[a+4] \right\}}{a[4v_s-4-a] + 3\frac{C^*}{F^*}\{4v_s+a-6(1-v_s)[2+a]\} + (1-2v_s)a} \quad (55-2)$$

$$a = C^*(1 - v_s) \quad (56-2)$$

و در این روابط C^* و F^* به صورت زیر قابل محاسبه هستند:

$$C^* = \frac{E_g R (1 - v_s^2)}{E_s A_s (1 - v_g^2)} \quad (57-2)$$

$$F^* = \frac{E_g R^3 (1 - v_s^2)}{E_s I_s (1 - v_g^2)} \quad (58-2)$$

توضیحات مربوط به هر کدام از پارامترهای روابط ارائه شده توسط کوریلیانو و همکاران در

جدول (۷-۲) آمد

جدول (۷-۲) پارامترها و توضیحات مربوط به روابط ارائه شده توسط کوریلیانو و همکاران (Corigliano et al., 2011)

واحد	توضیحات	پارامتر
m	شعاع تونل	R
m^2	مساحت سطح سیستم نگهداری	A_s
m^4/m	گشتاور اینرسی سطح مقطع تونل در واحد طول آن	I_s
N/m^2	مدول یانگ توده خاک	E_g
N/m^2	مدول یانگ پوشش بتنی	E_s
-	نسبت پواسون توده خاک	ν_g
-	نسبت پواسون پوشش بتنی	ν_s
-	نسبت فشردگی	C^*
-	نسبت انعطاف پذیری	F^*
-	اندازه بیشینه کرنش برشی اندازه گیری شده در شرایط میدان آزاد	γ_{ffmax}
rad	زاویه پاد ساعت گرد اندازه گیری شده از دیواره راست تونل	θ

۲-۶-۳-۷- روش کورتزیس

کورتزیس و همکاران رابطه‌ای را برای بیشینه گشتاور خمشی در حالت بدون لغزش و به جهت بهبود روش ارائه شده توسط ونگ (Wang, 1993) به صورت زیر ارائه کرده‌اند (Kouretzis et al., 2013):

$$M_k = \pm(2 - K' - 2K'')\tau_{max} \frac{R^2}{2} \quad (۵۹-۲)$$

که در این رابطه τ_{max} بیشینه تنش برشی لرزه‌ای میدان آزاد است که با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید (Kouretzis et al., 2013):

$$\tau_{max} = \pm V_{max} \sqrt{\rho_{max} G_{max}} \quad (۶۰-۲)$$

که در رابطه بالا ρ_{max} دانسیته خاک و G_{max} بیشینه مدول برشی خاک و V_{max} بیشینه سرعت موج برشی حین انتشار موج است (Kouretzis et al., 2013).

$$K' = 1 + \frac{(1-2\nu)(1-C)F - 0.5(1-2\nu)C + 2}{[(3-2\nu) + (1-2\nu)C]F + [0.5(5-6\nu)](1-2\nu)C + (6-8\nu)} \quad (۶۱-۲)$$

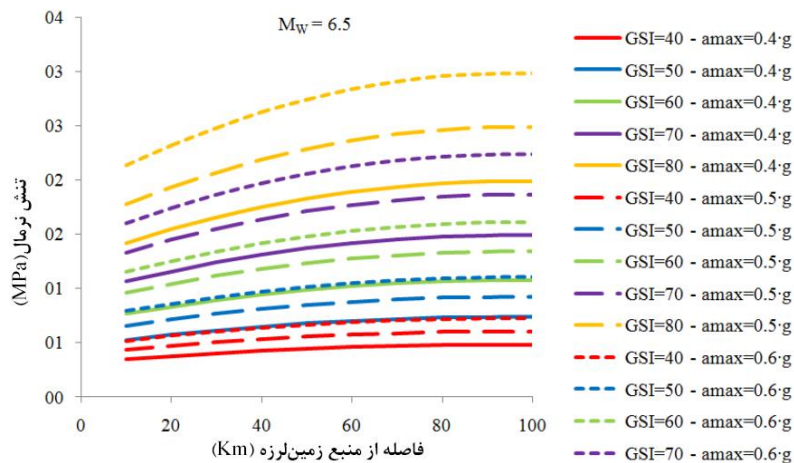
$$K'' = \frac{[1 + (1-2\nu)C]F - [0.5(1-2\nu)C] - 2}{[(3-2\nu) + (1-2\nu)C]F + [0.5(5-6\nu)](1-2\nu)C + (6-8\nu)} \quad (۶۲-۲)$$

$$C = \frac{E(1-\nu_s^2)R}{E_s t(1+\nu)(1-2\nu)} \quad (۶۳-۲)$$

$$F = \frac{E(1-\nu_s^2)R^3}{6E_s J_s(1+\nu)} \quad (۶۴-۲)$$

۲-۶-۳-۸- روش پییرپائولو اورست^۱

استفاده از روش‌های عددی جهت تحلیل تحلیل و بررسی پاسخ لرزه‌ای تونل، می‌تواند روش مفیدی باشد، اما بسیار زمان‌بر است. در عوض روش‌های تحلیلی جهت بدست آوردن نتایج معقول و در زمان مناسب، روش‌های مناسب‌تری هستند (Oreste, 2015). اورست تحلیل‌های پارامتری را با استفاده از روش تحلیلی که اساس آن روش اینشتین و شوارتز^۲ است، انجام داد.



شکل (۲-۵) نمودار تنش نرمال بر حسب فاصله از منبع زمین لرزه برای مقادیر مختلف GSI و بیشینه شتاب برای شدت زمین‌لرزه ثابت ۶/۵ (Oreste, 2015)

نتایج آن‌ها نشان می‌دهد که با افزایش کیفیت توده سنگ و متعاقباً سختی آن، میزان نیروهای وارد بر پوشش بتنی تونل نیز افزایش می‌یابد. آن‌ها همچنین این نمودارها را برای شدت زمین لرزه ۷، ۷/۵، ۸ و ۸/۵ نیز بدست آورده‌اند که نتایج مشابهی را در بر داشته است.

۲-۷- روش‌های عددی

۲-۷-۱- مقدمه

با توجه به پیشرفت روزافزون در عرصه فن‌آوری و رایانه‌ها در سال‌های اخیر، به‌منظور بررسی رفتار تونل‌ها تحت بارهای لرزه‌ای تمایل به استفاده از روش‌های عددی و مدل‌سازی دوبعدی، به‌عنوان مثال

¹ Pierpaolo Oreste

² Einstein and Schwartz

پاک‌باز و یاری‌وند^۱ (۲۰۰۵)، حشاش و همکاران (۲۰۰۵)، پارک و همکاران (۲۰۰۶)، بلوری‌بزاز و بشارت (۲۰۰۸)، سدارت و همکاران^۲ (۲۰۰۹)، فهیمی‌فر و وکیل‌زاده (۲۰۰۹)، چو و همکاران^۳ (۲۰۰۹)، تورکاتو^۴ (۲۰۱۰) و شهرور و همکاران^۵ (۲۰۱۰) و سه‌بعدی، به‌عنوان مثال کرامر و همکاران^۶ (۲۰۰۷) و اسلیتین^۷ (۲۰۱۳) بیشتر شده است.

۲-۷-۲- تحلیل‌های شبه دینامیکی

۲-۷-۲-۱- بلوری‌بزاز و بشارت

بلوری‌بزاز و بشارت، مطالعات عددی المان محدودی را در حالت شبه دینامیکی و کرنش صفحه‌ای^۸ و با استفاده از نرم‌افزار PLAXIS انجام داده‌اند. همچنین روش‌های تحلیلی پنزن و ونگ را نیز به منظور بررسی و مقایسه نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مورد استفاده قرار داده‌اند (Bazaz & Besharat, 2008).

به این منظور، در این تحلیل‌ها پارامترهای^۷ نوع خاک از خاک بسیار نرم تا ماسه بسیار سخت

استفاده شده است. نتایج حاصل از این مطالعات برای یکی از انواع خاک‌های مورد تحلیل در شکل (۲-۶) آمده است. با توجه به مقایسه نتایج حاصل از روش‌های فرم بسته و عددی، تفاوت چشمگیری برای نیروهای محوری محاسبه شده توسط روش ونگ و روش عددی، دیده نمی‌شود. همچنین مشاهده شده است که تغییرات گشتاور خمشی و نیروهای محوری به ضریب انعطاف‌پذیری وابسته است (Bazaz & Besharat, 2008).

¹ Pakbaz and Yareevand

² Sedarat et al

³ Chow et al

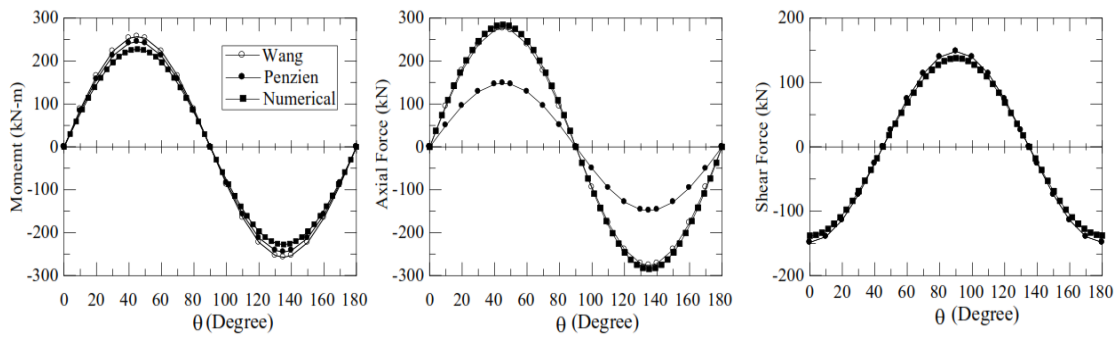
⁴ Torcato

⁵ Shahrour

⁶ Kramer et al

⁷ Sliteen

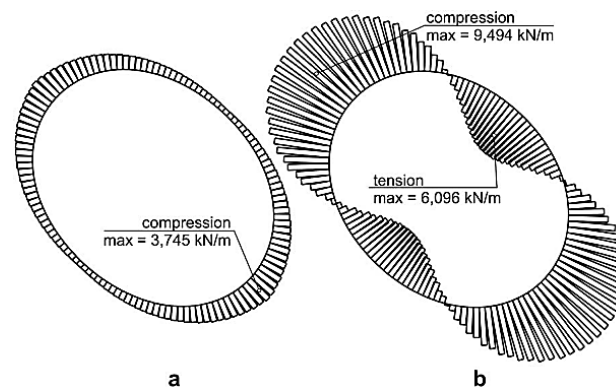
⁸ Plain Strain



شکل (۶-۲) مقایسه روش عددی و تحلیلی برای اندرکنش تونل و خاک (Bazaz & Besharat, 2008)

۲-۲-۷-۲- سدارت و همکاران

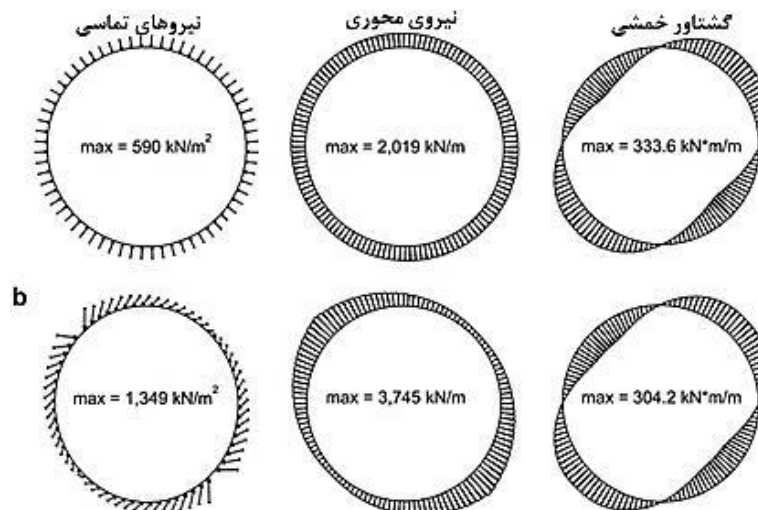
سدارت و همکاران، تحلیل عددی شبه استاتیکی را جهت تحقیق تاثیر سطح تماس تونل دایره‌ای شکل با سیستم نگهداری یک پارچه، انجام دادند. نتایج آن‌ها تأکیدی بر تاثیر خصوصیات سطح تماس بر نیروهای سازه‌ای ایجاد شده در سیستم نگهداری است. نتایج نشان می‌دهد که در حالت بدون لغزش شرایط بدتری از نیروهای محوری را در سیستم نگهداری ایجاد می‌کند (شکل (۷-۲)). نتایج آن‌ها همچنان نشان می‌دهند که ضریب اصطکاک^۱، کرنش برشی خاک^۲ و ضخامت پوشش بتنی بر پاسخ لرزه‌ای تونل اثرات قابل ملاحظه‌ای دارد (Sedarat et al., 2009) (شکل‌های شکل (۷-۲) شکل (۸-۲) و شکل (۹-۲)).



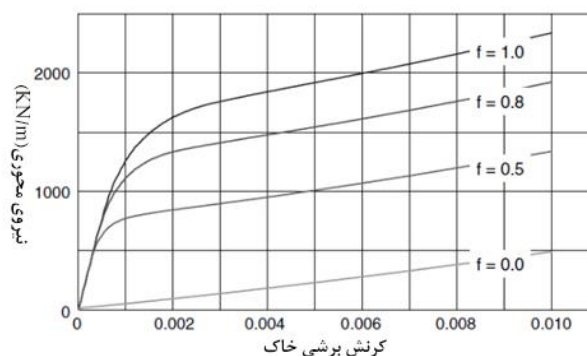
شکل (۷-۲) نیروی محوری کلی با کرنش برشی 0.5% خاک: (a) ضریب اصطکاک $f = 1$ و (b) حالت بدون لغزش؛ جابه‌جایی با فاکتور بزرگنمایی ۲۰ برابر، نسبت انعطاف‌پذیری $F = 143$ ، ضخامت سیستم نگهداری $t = 0.36$ m ضریب فشار جانبی زمین $K_0 = 1$ (Sedarat et al., 2009)

¹ Friction coefficient

² Soil shear strain



شکل (۸-۲) نیروی محوری و گشتاور خمشی در سیستم نگهداری با کلی با کرنش برشی 0.5% خاک : (a) ضریب اصطکاک $f = 0$ و (b) $f = 1$ ؛ نسبت انعطاف‌پذیری $F = 143$ ، ضخامت سیستم نگهداری $t = 0.36 m$ ضریب فشار جانبی زمین $K_0 = 1$ (Sedarat et al., 2009)



شکل (۹-۲) افزایش نیروی محوری در مقابل کرنش برشی در خاک تحت ضرایب اصطکاک مختلف $f = 0, 0.5, 0.8, 1$ نسبت انعطاف‌پذیری $F = 143$ ، ضخامت سیستم نگهداری $t = 0.36 m$ ضریب فشار جانبی زمین $K_0 = 1$ (Sedarat et al., 2009)

۲-۷-۲-۳- تورکاتو و همکاران

تورکاتو و همکاران (۲۰۱۰)، به منظور بررسی تأثیر لایه‌بندی محیط درون‌گیر تونل مدل‌سازی عددی تحت بارهای لرزه‌ای انجام داده‌اند که در آن ابعاد تونل و ضخامت پوشش نگهداری را نیز لحاظ کرده‌اند. لازم به ذکر است که در تمامی مطالعات ذکر شده در بالا پوشش نگهداری به‌صورت پیوسته در نظر گرفته شده است (Torcato, 2010).

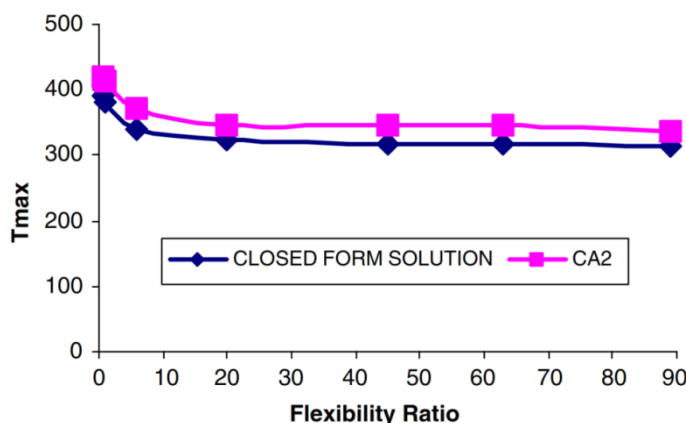
۳-۷-۲- تحلیل‌های دینامیکی

۳-۷-۲-۱- پاک‌باز و یاری‌وند

پاک‌باز و یاری‌وند (۲۰۰۵)، تحلیل عددی دو بعدی را با استفاده از نرم‌افزار CA2، به منظور تخمین تاثیر بار زلزله بر روی تونل با سطح مقطع دایره در محیط دارای رفتار الاستوپلاستیک انجام دادند. آن‌ها تونل را بصورت یک تیر الاستیک مدل‌سازی کردند. در این تحلیل‌ها از رکورد زلزله ناغان فارس استفاده شده بود که شتاب بیشینه این زلزله $0.7g$ و با شدت γ ریشتر است (Pakbaz & Yareevand, 2005).

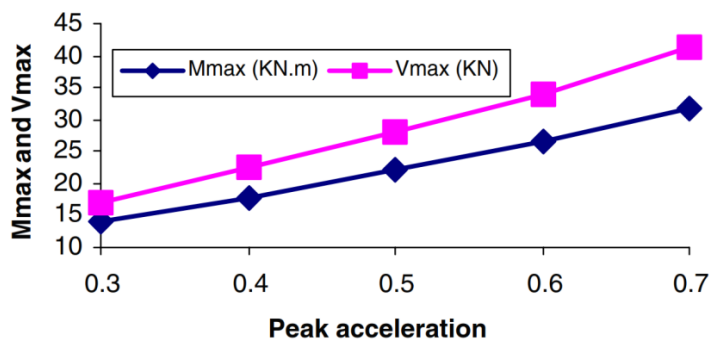
دو دسته تحلیل پارامتری به منظور نشان دادن تغییر تنش بیشینه با شتاب بیشینه زمین و ضریب انعطاف‌پذیری F انجام شده است. برخی از نتایج حاصل از مطالعه آن‌ها عبارت است از (Pakbaz & Yareevand, 2005):

- ✓ تاثیر لرزه بر اندرکنش زمین-سیستم نگهداری به پارامترهای متعددی از جمله شدت، شتاب بیشینه، مدت زمان زمین لرزه و سختی نسبی بین تونل و زمین است.
- ✓ افزایش اندازه پارامترهای سازه‌ای سیستم نگهداری در حالت استاتیکی لزوماً روش مناسبی برای مقابله با زمین لرزه نمی‌باشد. این موضوع به دلیل افزایش سختی سیستم نگهداری با افزایش اندازه سیستم نگهداری است.
- ✓ با افزایش شتاب بیشینه مقادیر نیروی محوری، نیروی برشی و گشتاور خمشی برای روش عددی (CA2) افزایش می‌یابد.

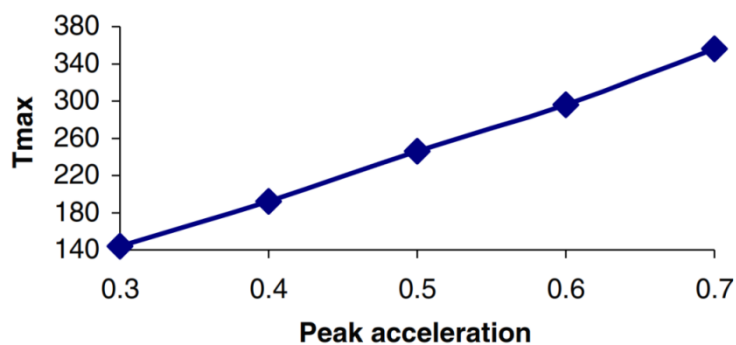


شکل (۲-۱۰) مقایسه T_{max} برای روش عددی (CA2) در حالت بدون لغزش و روش تحلیلی در حالت لغزش

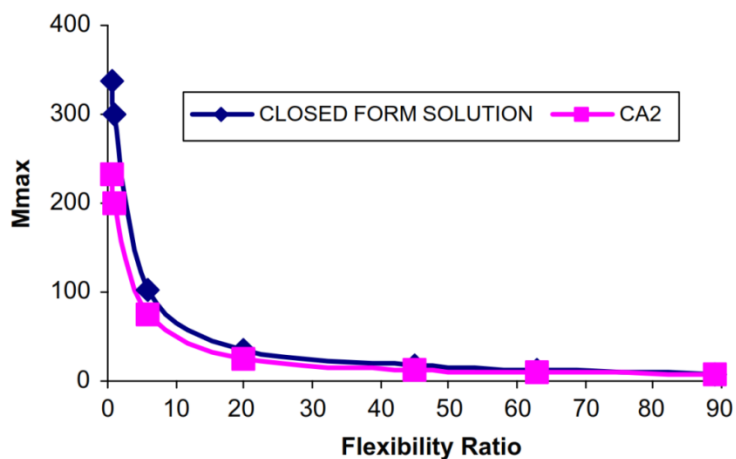
کامل بر حسب انعطاف پذیری (Pakbaz & Yareevand, 2005)



شکل (۱۱-۲) تاثیر شتاب بیشینه بر M_{max} و T_{max} برای روش عددی (CA2) (Pakbaz & Yareevand, 2005)



شکل (۱۲-۲) تاثیر شتاب بیشینه بر T_{max} برای روش عددی (CA2) (Pakbaz & Yareevand, 2005)



شکل (۱۳-۲) مقایسه M_{max} برای روش عددی (CA2) در حالت بدون لغزش و روش تحلیلی در حالت لغزش کامل بر حسب انعطاف پذیری (Pakbaz & Yareevand, 2005)

۲-۷-۳-۲- کونتو و همکاران

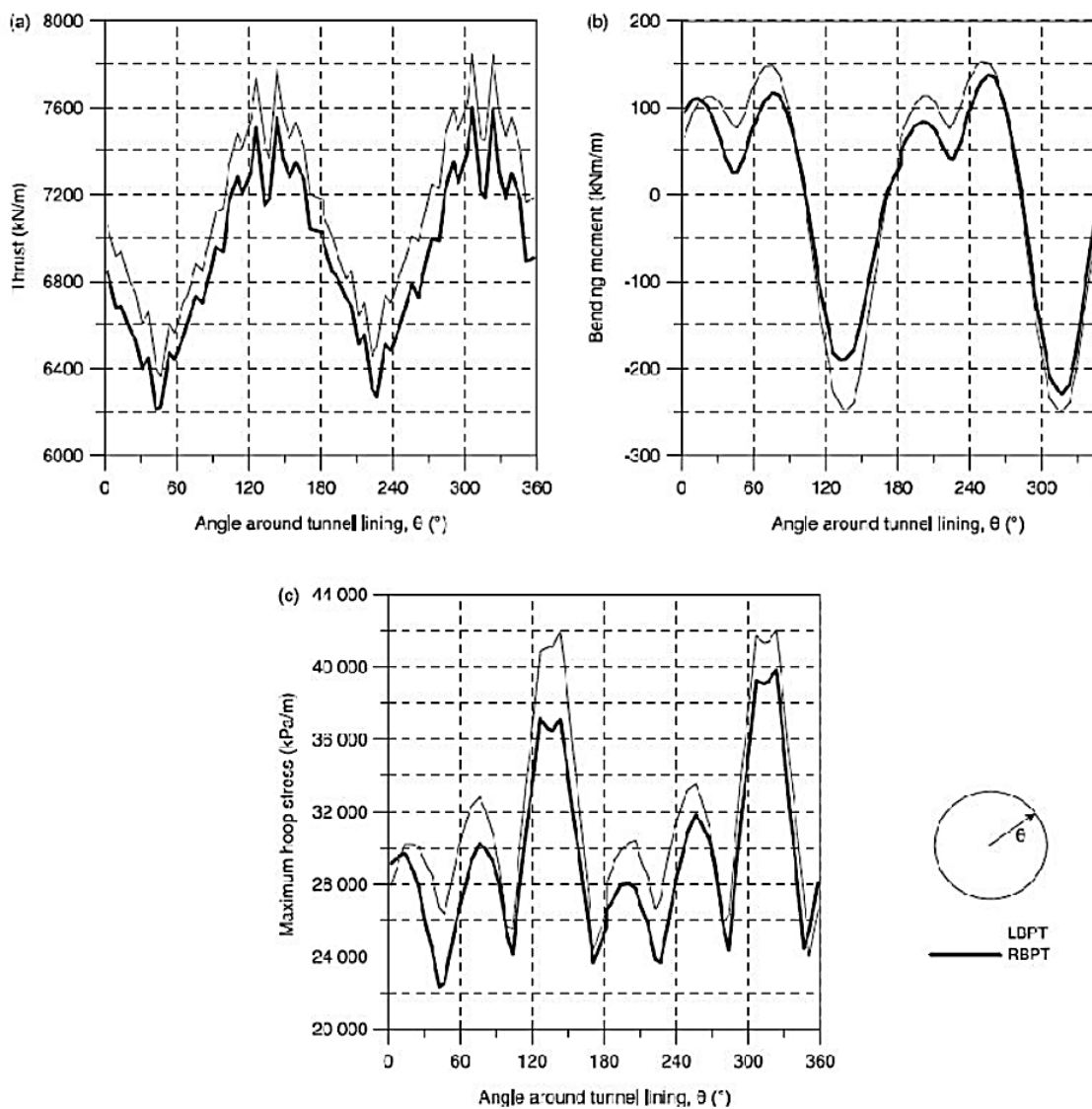
کونتو و همکاران (۲۰۰۸)، مطالعه موردی تونل دوقلوی بولو^۱ که در اثر زمین لرزه دوزجه^۲ ترکیه آسیب شدیدی دیده بود را ارائه کردند. تحلیل عددی المان محدود در حالت استاتیک و دینامیک در حالت کرنش صفحه‌ای به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای تونل و همچنین مقایسه نتایج حاصل شده با حالت تونل قبل از بار دینامیکی انجام گردید. همچنین نتایج حاصل از تحلیل دینامیکی و نتایج حاصل از تحلیل شبه دینامیکی الاستوپلاستیک نیز مقایسه شده‌اند (Kontoe, Zdravkovic, Potts, & Menkiti, 2008).

برخی از نتایج حاصل از این تحقیق عبارتند از :

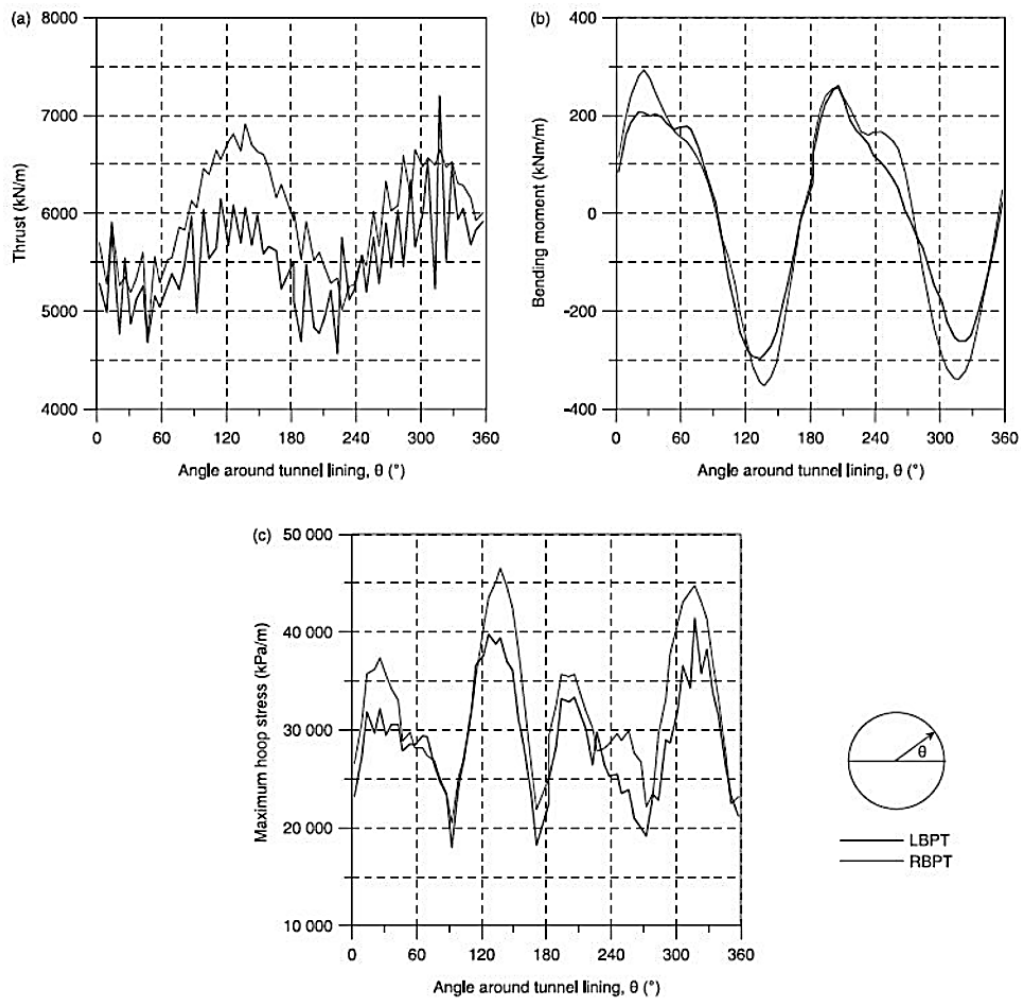
- ✓ نشان داده شده است که تعامل دو تونل و هر بازتاب موجی در دیواره بین آن‌ها تاثیر جزئی بر عملکرد لرزه‌ای آن‌ها دارد.
- ✓ نتایج نشان می‌دهد که مقادیر بدست آمده از روش پینزن برای نیروی محوری و برشی و در حالت بدون لغزش، بسیار کمتر از مقادیر مورد انتظار و بدست آمده از روش عددی است (Kontoe et al., 2008). بنابراین استفاده از این روش در حالت بدون لغزش پیشنهاد نمی‌شود (Hashash et al., 2005; Kontoe et al., 2008).
- ✓ مقایسه بین مقادیر بدست آمده برای نیروی محوری و گشتاور خمشی از تحلیل شبه‌استاتیک و تحلیل دینامیکی اختلاف بسیار زیادی را نشان می‌دهد. این در حالی است که برای نیروی برشی در هر دو حالت توافق منطقی وجود دارد.

¹ Bolu

² Duzce



شکل (۲-۱۴) توزیع (a) نیروی محوری، (b) گشتاور خمشی بیشینه و (c) تنش برشی در اطراف سیستم نگهداری تونل در زمان $t = 10s$ (تحلیل دینامیکی) (Kontoe et al., 2008)

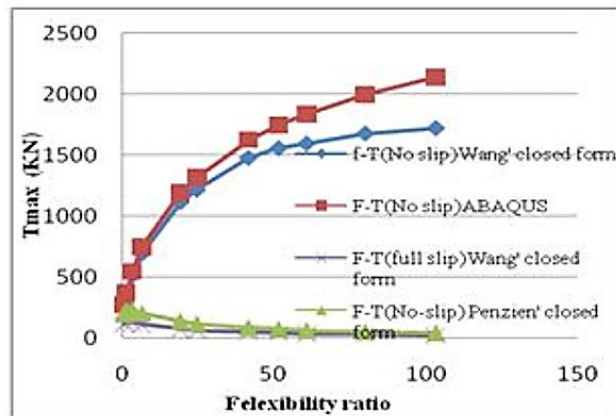


شکل (۲-۱۵) توزیع (a) نیروی محوری، (b) گشتاور خمشی بیشینه و (c) تنش برشی در اطراف سیستم نگهداری تونل در زمان $t = 10s$ (تحلیل شبه استاتیک) (Kontoe et al., 2008)

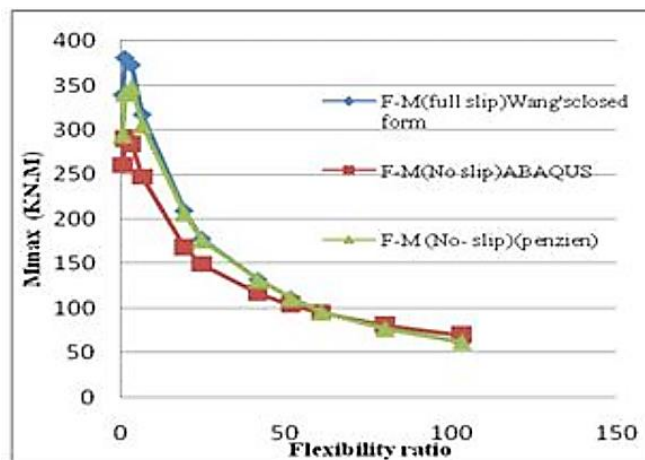
۲-۳-۳-۷-۲- فهمی فر و وکیلزاده

فهمی فر و وکیلزاده (۲۰۰۹)، دو روش تحلیلی ارائه شده توسط ونگ و پینزن را مورد مطالعه قرار داده‌اند. آن‌ها همچنین با استفاده از نرم‌افزار المان محدود ABAQUS، مطالعه عددی را نیز انجام داده و نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی و عددی را با یکدیگر مقایسه نموده‌اند (Penzien & Wu, 1998; Wang, 1993). نتایج حاصل از این مطالعات در شکل (۲-۱۶) و شکل (۲-۱۷) آمده است. این نتایج نشان می‌دهد که مقادیر حاصل از روش‌های تحلیلی تفاوت چشمگیری با نتایج مدلسازی عددی ندارد (Fahimifar & Vakilzadeh, 2009). برخی از نتایج حاصل از مطالعات فهمی فر و وکیلزاده عبارتند از (Fahimifar & Vakilzadeh, 2009):

- ✓ با افزایش مقادیر ضریب انعطاف پذیری، نیروی محوری برای حالت بدون لغزش روش فرم بسته ونگ و برای حالت بدون لغزش روش عددی (آباکوس^۱) افزایش یافته و برای حالت لغزش کامل روش ونگ و بدون لغزش پینزن کاهش یافته است.
- ✓ با افزایش مقادیر ضریب انعطاف پذیری، مقادیر گشتاور خمشی برای حالت لغزش کامل کاهش یافته است.



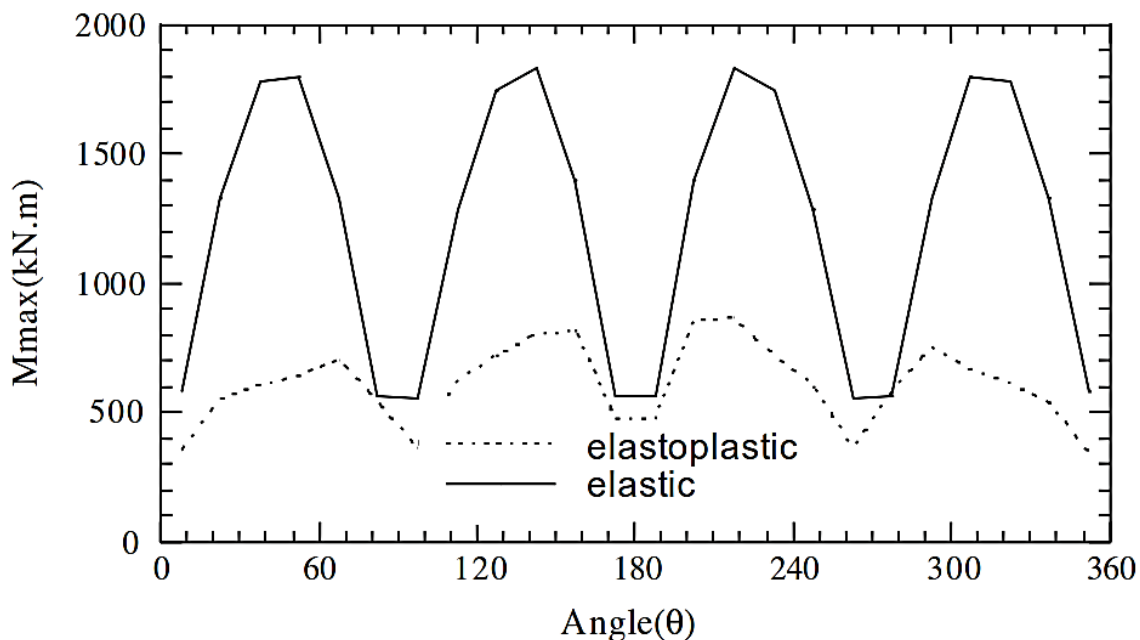
شکل (۲-۱۶) مقایسه T_{max} برای روش عددی و تحلیلی بر حسب ضریب انعطاف پذیری (Fahimifar & Vakilzadeh, 2009)



شکل (۲-۱۷) مقایسه M_{max} برای روش عددی و تحلیلی بر حسب ضریب انعطاف پذیری (Fahimifar & Vakilzadeh, 2009)

¹ ABAQUS

شهرور و همکاران در سال ۲۰۱۰ تحلیل عددی المان محدود الاستوپلاستیکی به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای تونل‌های احداث شده در خاک‌های نرم انجام داده‌اند. آن‌ها رفتار ماده خاک با استفاده از رابطه بنیادی الاستوپلاستیک چرخه‌ای که هردو سخت شوندگی ایزوتروپیک و سینماتیک را در برمی‌گیرد، مدل‌سازی کرده‌اند. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که تغییر شکل‌های پلاستیک حاصل از بار دینامیکی موجب کاهش چشمگیر گشتاور خمشی در تونل می‌شود (Shahrour, Khoshnoudian, Sadek, & Mroueh, 2010) (شکل (۱۸-۲) شکل (۱۸-۲)).



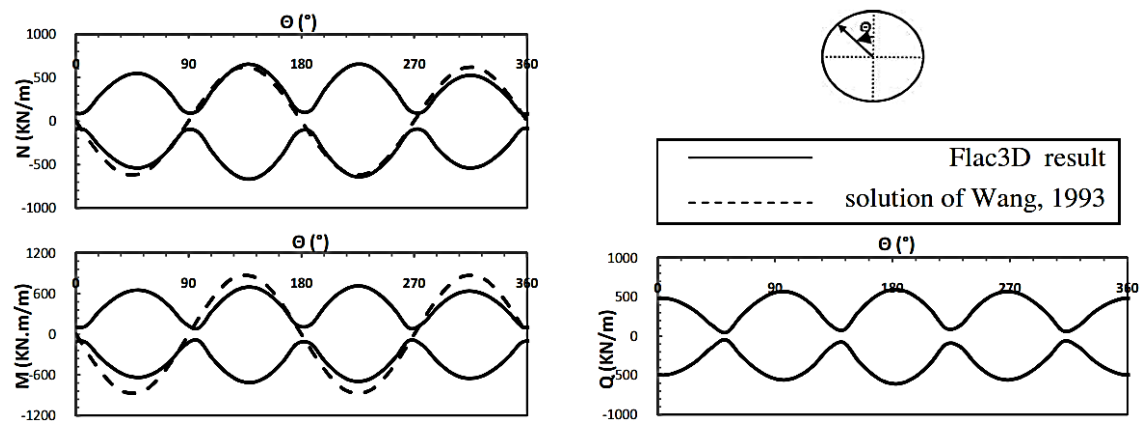
شکل (۱۸-۲) گشتاور خمشی حاصل از تغییر شکل‌های پلاستیک و الاستیک (Shahrour et al., 2010)

اسلیتین و همکاران (۲۰۱۱) به بررسی عددی پاسخ لرزه‌ای تونل با استفاده از مدل سه بعدی و غیر خطی پرداخته‌اند. این مطالعات با استفاده از نرم‌افزار سه بعدی تفاضل محدود FLAC3D انجام شده

¹ Shahrour

² Sliteen

است. آن‌ها در این مطالعات به بررسی نیروهای داخلی ایجاد شده در تونل (نیروهای محوری، گشتاور خمشی و نیروهای برشی) پرداخته‌اند. نتایج حاصل از این مطالعات به نتایج حاصل از مطالعات عددی انجام شده توسط آن‌ها نزدیک است (SLITEEN, MROUEH, & SADEK, 2011). نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که تحلیل الاستیک برای تعیین پاسخ لرزه‌ای پوشش بتنی کافی نیست. تأثیر مراحل حفاری و نصب پوشش بتنی در تونل نیز باید در مدل لحاظ شود تا منجر به تخمین واقع‌گرایانه از نیروی ناشی از بار لرزه‌ای در پوشش تونل شود (SLITEEN et al., 2011). نتایج به‌دست آمده از این مطالعه برای نیروهای محوری، گشتاور خمشی و نیروهای برشی در شکل (۱۹-۲) شکل (۱۹-۲) آمده است.



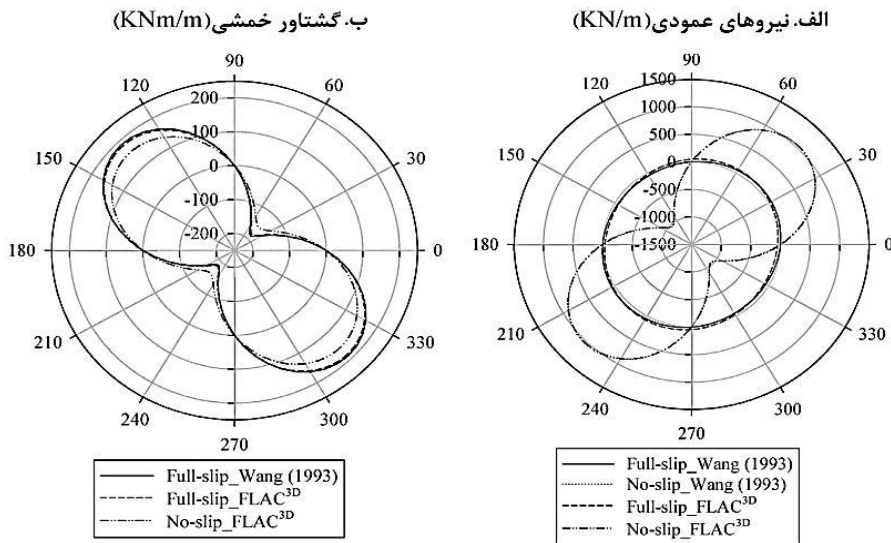
شکل (۱۹-۲) توزیع نیروهای حاصل از بارگذاری لرزه‌ای در سیستم نگهداری تونل (SLITEEN et al., 2011)

۲-۷-۳-۶- انگوک اندو^۱، دنیل دیاس^۲ و همکاران (۲۰۱۵)

مطالعات دیگری توسط انگوک اندو و همکاران نیز بر روی تأثیر تعداد قطعات پوشش بتنی با استفاده از روش تفاضل محدود و در محیط نرم‌افزار FLAC3D انجام گرفته است. نتایج حاصل از این مطالعات نشان می‌دهد که پوشش بتنی قطعه‌ای تحت بار لرزه‌ای عملکرد بسیار بهتری نسبت به پوشش بتنی پیوسته دارد (Do, Dias, Oreste, & Djeran-Maigre, 2015). این نتایج همچنان نشان می‌دهد که تأثیر توزیع درزهای قطعات بتنی، مدول یانگ خاک دربرگیرنده تونل، فاکتور فشار جانبی زمین و بیشینه کرنش برشی نباید چشم‌پوشی کرد (Do et al., 2015). برخی از نتایج حاصل از این مطالعات در شکل‌های شکل (۲۰-۲) شکل (۲۱-۲) شکل (۲۲-۲) و شکل (۲۳-۲) آمده است.

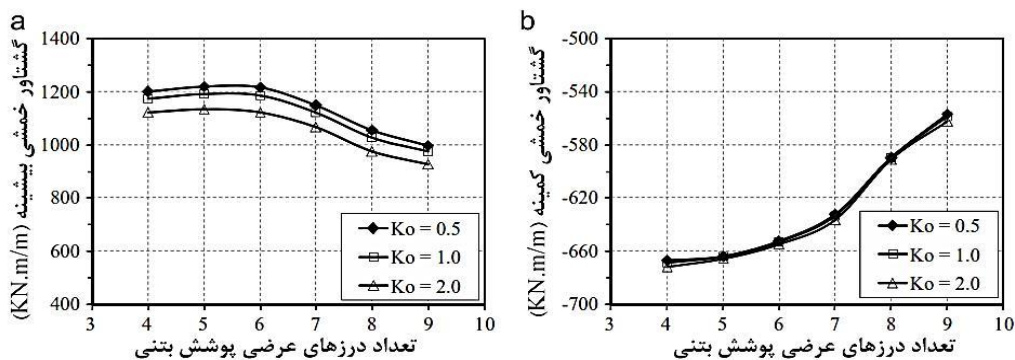
¹ Ngoc-Anh Do

² Daniel Dias

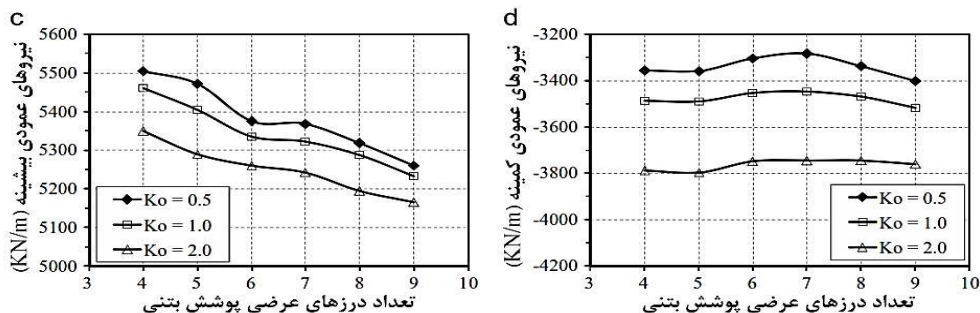


شکل (۲-۲) مقایسه روش Wang و روش عددی (الف: نیروهای عمودی ب: گشتاور خمشی) برای حالت بدون لغزش و لغزش کامل (Do et al., 2015)

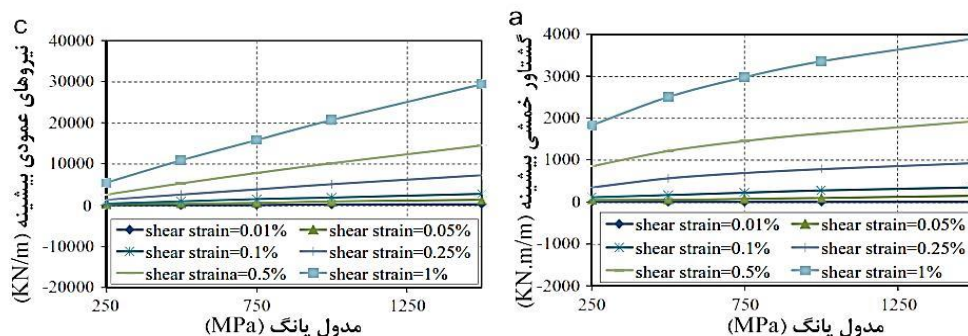
نتایج نشان می‌دهد که مقادیر گشتاور خمشی برای دو روش تحلیلی و عددی به یکدیگر نزدیکی قابل قبولی دارند اما برای نیروهای نرمال مقادیر مربوط به روش عددی و در حالت بدون لغزش مقدار قابل توجهی با حالت‌های دیگر اختلاف دارد.



شکل (۲-۲۱) مقادیر گشتاور خمشی بیشینه و کمینه بر حسب تعداد درزهای عرضی پوشش بتنی برای فاکتور فشار جانبی ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ (Do et al., 2015)



شکل (۲-۲۲) مقادیر نیروهای بیشینه و کمینه بر حسب تعداد درزهای عرضی پوشش بتنی برای فاکتور فشار جانبی ۰/۵، ۱/۰ و ۲/۰ (Do et al., 2015)



شکل (۲-۲۳) نمودار گشتاور خمشی بیشینه و نیروهای عمودی بیشینه بر حسب مدول یانگ خاک در برگیرنده تونل (Do et al., 2015)

نتایج به روشنی نشان می‌دهد که با افزایش تعداد درزهای عرضی پوشش بتنی و در واقع با افزایش تعداد قطعات بتنی در پوشش نگهداری مقادیر گشتاور خمشی و نیروهای عمودی بیشینه کاهش و گشتاور خمشی و نیروهای عمودی کمینه افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش فاکتور فشار جانبی به طور کلی مقادیر پارامترهای مطالعه شده کاهش می‌یابند و همچنین با افزایش مدول یانگ خاک در برگیرنده تونل، نیروهای عمودی و گشتاور خمشی بیشینه افزایش می‌یابد (Do et al., 2015).

۸-۲- جمع بندی

همانطور که گفته شد، به منظور بررسی پاسخ لرزه‌ای پوشش نگهداری تونل‌ها تحت بارهای لرزه‌ای می‌توان از روش‌های تحلیلی، عددی و آماری استفاده کرد. روش‌های تحلیلی و فرم بسته برای استفاده در این راستا، روش‌های مناسبی هستند ولی همواره با محدودیت‌هایی همراه بوده‌اند. روش‌های تحلیلی مورد استفاده در این پژوهش به منظور اعتبار سنجی نتایج عددی، روش ونگ، روش ببوت و روش پیزن هستند. در این روش‌ها پارامترهایی چون مدول الاستیسته خاک و روش نگهداری، نسبت پواسون خاک و سیستم نگهداری و پارامترهای موج برشی موثر هستند.

فصل ۳: تاثیر پارامترهای خاک بر پاسخ لرزه ای

قطعات پیش ساخته بتنی پوشش های تونل

۳-۱- مقدمه

به منظور بررسی موضوع پژوهش، پاسخ دینامیکی قطعات بتنی براساس تغییرات نیروی محوری، نیروی برشی و گشتاور خمشی با مطالعه تاثیر پارامترهایی چون مدول تغییر شکل پذیری، ضریب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ضخامت پوشش نگهداری و تعداد قطعات بتنی مورد مطالعه قرار گرفته است. در نهایت مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدلسازی عددی با روش‌های تحلیلی ارائه شده که برای پوشش‌های بصورت حلقه کامل و بدون اتصال توسعه داده شده‌اند صورت گرفته است، که در فصل آینده به آن پرداخته شده است.

در پژوهشی که انجام شده، تاثیر پارامترهای محیط درون گیر تونل بر عملکرد پاسخ قطعات بتنی پوشش تونل‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. به این منظور تحلیل‌های عددی در محیط‌های مختلف خاک، به روش تفاضل محدود و با استفاده از نرم‌افزار FLAC3D انجام شد.

در فصل پیش رو ابتدا مروری بر انواع خاک‌های مختلف مورد استفاده در تحلیل‌های عددی و همچنین پارامترهای سیستم نگهداری مورد استفاده، انجام شده است. سپس به طرح مدل‌های عددی و همچنین مراحل مدل‌سازی و اجرا پرداخته شده است. همچنین پیش از شروع اجرای مدل‌های عددی نیاز است تا پارامترهای موج لرزه‌ای مورد استفاده، بررسی شده و تصحیحات مورد نیاز انجام گیرد.

۳-۲- پارامترهای خاک

با توجه به موضوع پژوهش، نیاز است تا انواع مختلفی از خاک‌ها مورد بررسی قرار گرفته و در مدلسازی‌های عددی مورد استفاده قرار گیرند. بنابراین از انواع خاک‌های دانه‌ای^۱ و چسبنده^۲ استفاده شده است.

برای نمایش انواع خاک‌های مورد استفاده در این تحقیق از روش طبقه بندی متحد^۳ استفاده شده است. شکل اولیه این سیستم در سال ۱۹۴۲ توسط کاساگرانده^۴ برای ساخت فرودگاه‌های

¹ Granular Soils

² Cohesive

³ Unified Soil Classification System

⁴ Casagrande

نظامی توسط گروه مهندسان ارتش در اثنای جنگ جهانی دوم ارائه شد. این طبقه‌بندی در سال ۱۹۵۲ با همکاری اداره عمران ایالت متحده، مورد تجدید نظر قرار گرفت. در **Error! Reference source not found.** انواع خاک‌ها در سیستم طبقه‌بندی متحد و علائم آن‌ها ارائه شده است (Das & Sobhan, 2013). این سیستم خاک‌ها را به دو طبقه بزرگ تقسیم می‌نماید:

۱. خاک‌های درشت‌دانه با طبیعت شنی و یا ماسه‌ای و درصد عبوری کوچکتر از ۵۰ درصد از الک نمرة ۲۰۰. علامت گروه‌های این طبقه با حرف G یا S شروع می‌شود. علامت G برای شن یا خاک‌های شن‌دار و علامت S برای ماسه یا خاک‌های ماسه‌دار به عنوان حرف اول به کار می‌روند.

۲. خاک‌های ریزدانه با درصد عبوری بزرگتر از ۵۰ درصد از الک نمرة ۲۰۰. علامت گروه‌های این طبقه با حرف M لای غیر آلی و یا C برای رس غیر آلی و O برای لای‌ها و رس‌های آلی شروع می‌شود. علامت Pt برای پیت و ماک^۱ (خاک برگ) و یا سایر خاک‌ها با درجه آلی بالا به کار می‌رود.

انواع خاک‌ها و پارامترهای مورد استفاده در این تحقیق، در جدول (۱-۳) ارائه شده است. به منظور بررسی تاثیر مدول الاستیسیته خاک، در خاک‌های GW، SP و GM از دو نوع خاک با چگالی زیاد و کم استفاده شده است. همچنین از هر سه نوع خاک درشت‌دانه شنی، دانه‌ای ماسه‌ای و ریزدانه موجود در این طبقه‌بندی استفاده شده است.

جدول (۱-۳) پارامترهای انواع خاک‌های مورد استفاده در پژوهش (Brinkgreve & Vermeer, 2002; Das & Sobhan, 2013; Geo Tech Data, 2017; Kézdi, 1980; Memarian, 1998; Obrzud & Truty, 2012)

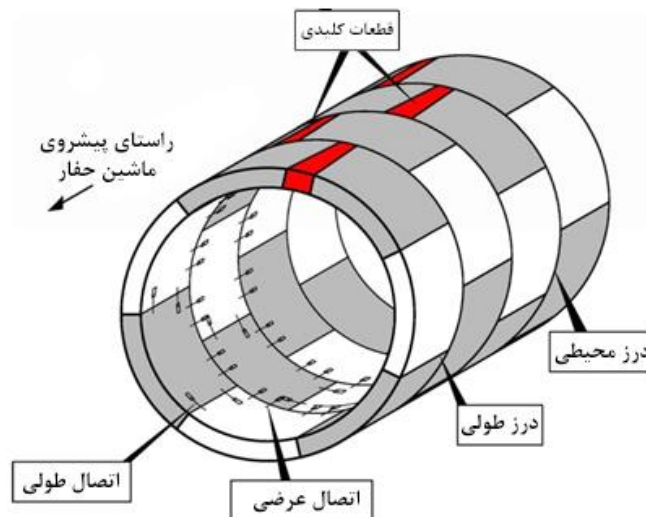
نام خاک	نوع خاک	چگالی	مدول الاستیسیته (MPa)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی ^(۰)	چسبندگی (KPa)
GW	درشت‌دانه شنی	زیاد	۳۲۰	۰/۳	۴۰	۰
GW	درشت‌دانه شنی	کم	۳۰	۰/۳۵	۳۳	۰
SP	دانه‌ای ماسه‌ای	زیاد	۸۰	۰/۳۵	۳۹	۰
SP	دانه‌ای ماسه‌ای	کم	۱۰	۰/۳۵	۳۰	۰
GM	درشت‌دانه شنی	زیاد	۳۰	۰/۴	۴۰	۵۰
GM	درشت‌دانه شنی	کم	۷	۰/۴	۳۰	۲۰
CH	ریزدانه	زیاد	۳۲	۰/۴	۳۱	۱۰۳
CL	ریزدانه	زیاد	۷۰	۰/۴۹	۳۵	۵۰

¹ Peat and Muck

۳-۳- نگهداری بتنی سگمندی

پوشش بتنی پیش‌ساخته مجموعه قطعاتی است که در انتهای جک‌های هیدرولیکی^۱ پیش‌ران در ماشین حفر تونل^۲ تعبیه شده و قبل از پیشروی دستگاه، نصب می‌شود. این قطعات در کنار یکدیگر قرار گرفته و با استفاده از اتصالات طولی و عرضی به یکدیگر متصل شده و حلقه‌های بتنی را تشکیل می‌دهند شکل (۱-۳) (Wittke et al., 2006).

از نقطه نظر هندسی، نمای جانبی حلقه‌های بتنی بخش‌هایی از یک استوانه هستند که می‌توانند دارای سطوح موازی (حلقه مستقیم) و یا غیر موازی (حلقه دوزنقه‌ای) باشند که در شکل (۲-۳) نشان داده شده است (Guglielmetti et al., 2008). طول متوسط حلقه‌ها بین ۰/۶ تا ۲ متر است. هر چند که مقادیر شاخص در نواحی شهری برای تونل‌های راه معمولاً بدلیل وجود منحنی‌های با شعاع کم، بین ۱/۲ تا ۱/۷ متر است. همچنین تعداد قطعات بتنی می‌تواند بطور مستقیم به سیستم فشار TBM، و به‌ویژه تعداد جک‌های فشاری مربوط شود. یک قانون کلی مفید این است که از قرارگیری کفشک‌های فشار^۳ روی درز بین قطعات بتنی اجتناب شود و اطمینان حاصل شود که حداقل تعداد کفشک‌های فشار برابر با تعداد اتصالات بین قطعات محیطی باشد (یعنی تناسبی بین قطعات هر حلقه بتنی و تعداد کفشک‌ها وجود داشته باشد) (Guglielmetti et al., 2008).

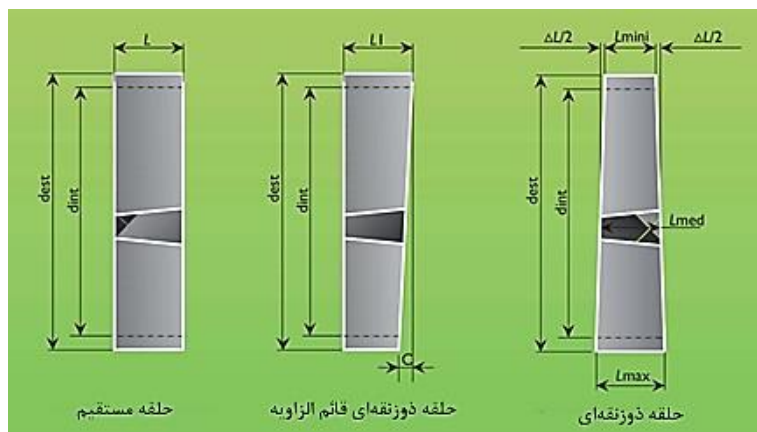


شکل (۱-۳) شماتیک چهار حلقه بتنی (Wittke et al., 2006)

¹ hydraulic Jacks

² TBM

³ Pressure Shoes



شکل (۳-۲) نمای جانبی انواع مختلف حلقه‌های بتنی (Guglielmetti et al., 2008)

پوشش‌های نگهداری قطعه‌ای بایستی بگونه‌ای طراحی شود که تمامی بارهای وارده را با فاکتور ایمنی مناسب تحمل کنند. این بارها عموماً شامل موارد زیر هستند (O'Carroll, 2005):

- ✓ بارهای ناشی از جابجائی قطعات؛
- ✓ نیروی فشاری جکهای سپر ناشی از پیشروی آن؛
- ✓ بارهای وارده در حین عملیات نصب به همراه بارهای ناشی از عملیات تزریق؛
- ✓ بار ناشی از خاک و سنگ بر اساس شرایط آن‌ها؛
- ✓ فشار هیدروستاتیک؛
- ✓ وزن سازه تونل؛
- ✓ بارگذاری خارج از مرکز، ناشی از امکان نصب نادرست قطعات بتنی پوشش نگهداری؛
- ✓ بارهای اضافی ناشی از وجود سازه‌های مجاور.

۳-۴- مشخصات سیستم نگهداری

در این تحقیق به منظور انجام مدل سازی عددی حلقه های بتنی در نرم افزار FLAC3D و همچنین روش های تحلیلی مورد استفاده، یعنی روش های ونگ^۱، پنزین^۲ و بوبت^۳ از پارامترهای ذکر شده در جدول (۲-۳) استفاده شده است. ضخامت قطعات بتنی و همچنین تعداد آنها در حلقه های بتنی متغیر در نظر گرفته شده است تا تاثیر آنها در پاسخ لرزه ای تونل در نظر گرفته شود. در شکل (۳-۳) ، (۴-۳) ، (۵-۳) و (۶-۳) نمایی از حلقه های بتنی با تعداد قطعات ۳، ۵ و ۷ قطعه و حلقه بتنی پیوسته که در نرم افزار FLAC3D مدل سازی و اجرا شده اند، آمده است.

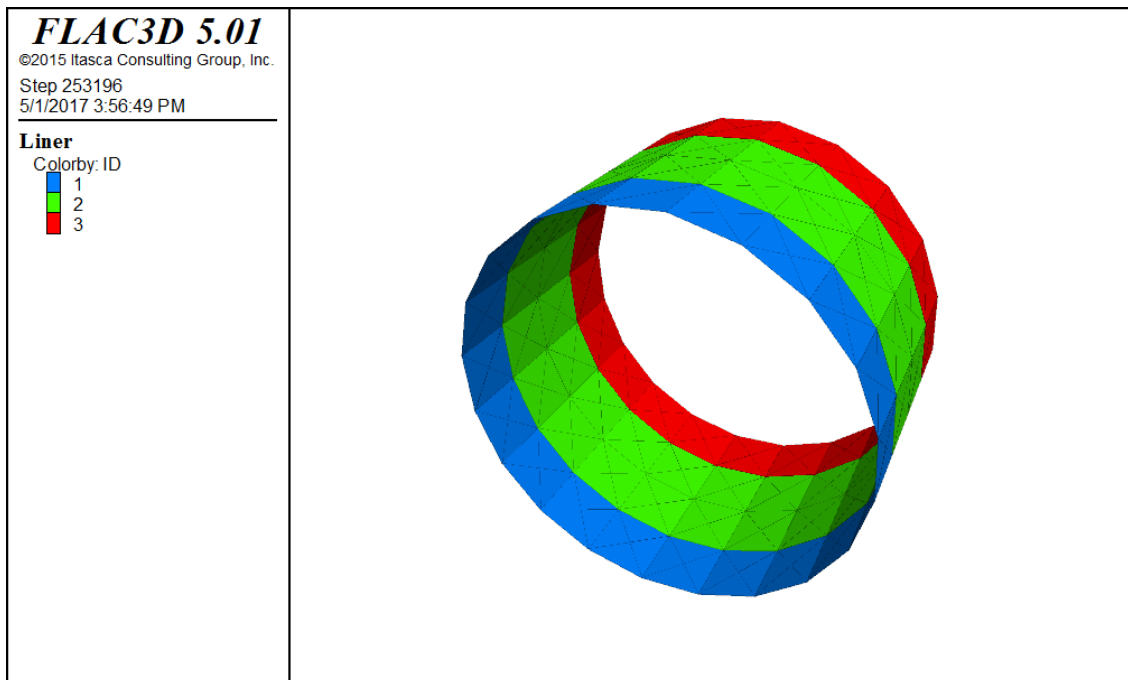
جدول (۲-۳) پارامترهای قطعات بتنی پیش ساخته مورد استفاده در تحقیق

نام پارامتر	مقدار	واحد
مدول الاستیسیته	25×10^9	Pa
ضریب پواسون	۰/۱۵	-
ضخامت	۰/۳ ، ۰/۴ و ۰/۵	m
عرض	۱/۴	m
چگالی	۲۲۰۰	Kg/m ³
تعداد قطعات بتنی	۱ (پیوسته) ، ۳ ، ۵ و ۷	
شعاع حلقه	۳	m

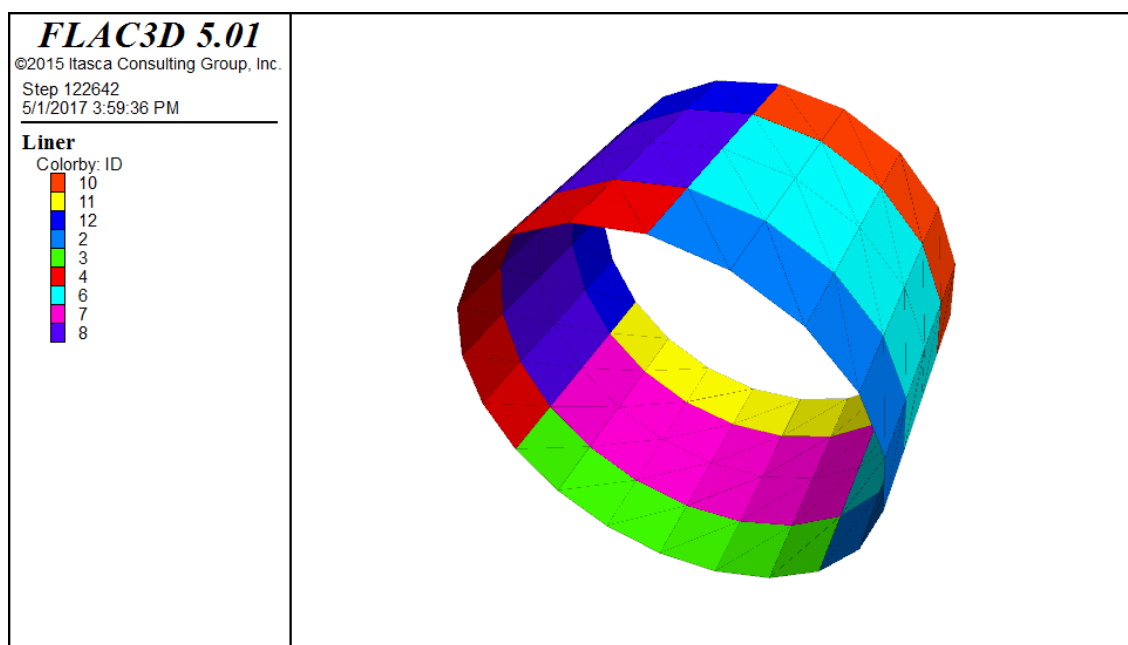
¹ Wang

² Penzein

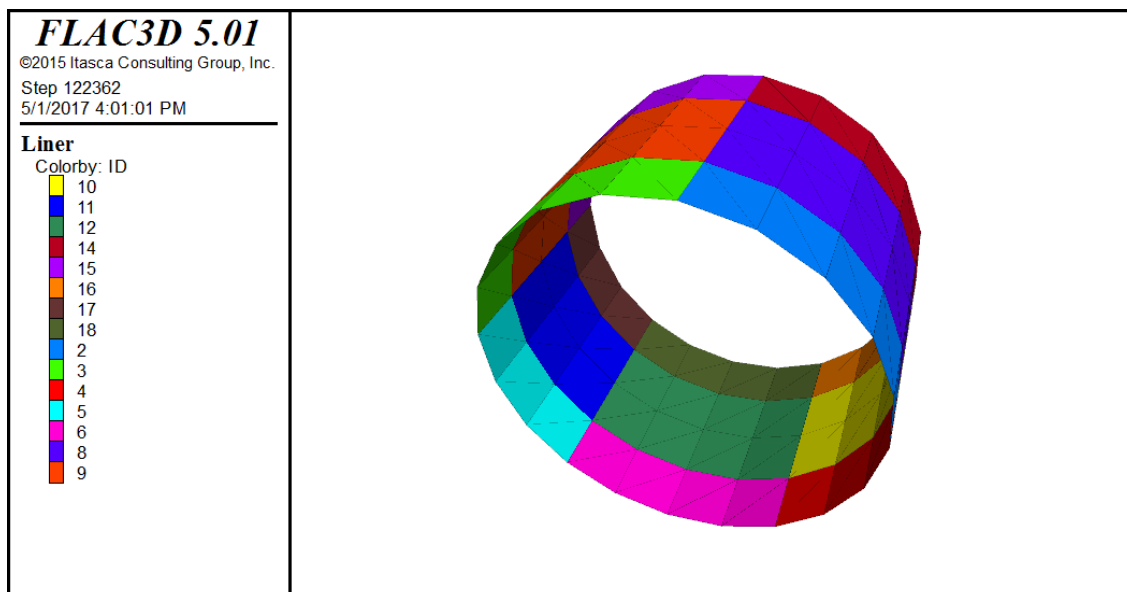
³ Bobet



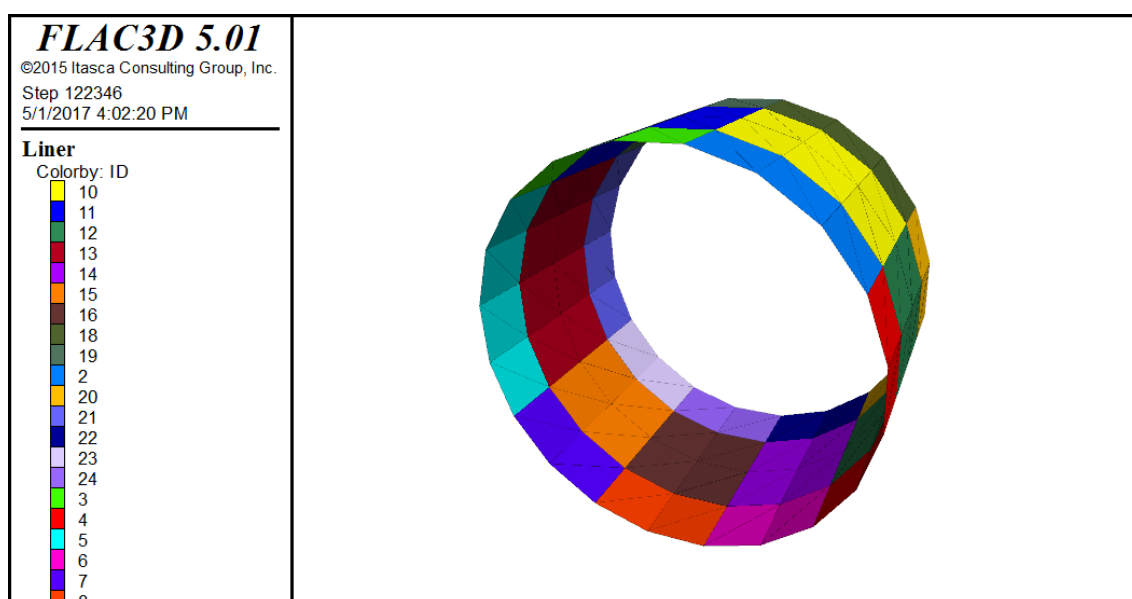
شکل (۳-۳) سیستم نگهداری با حلقه پیوسته



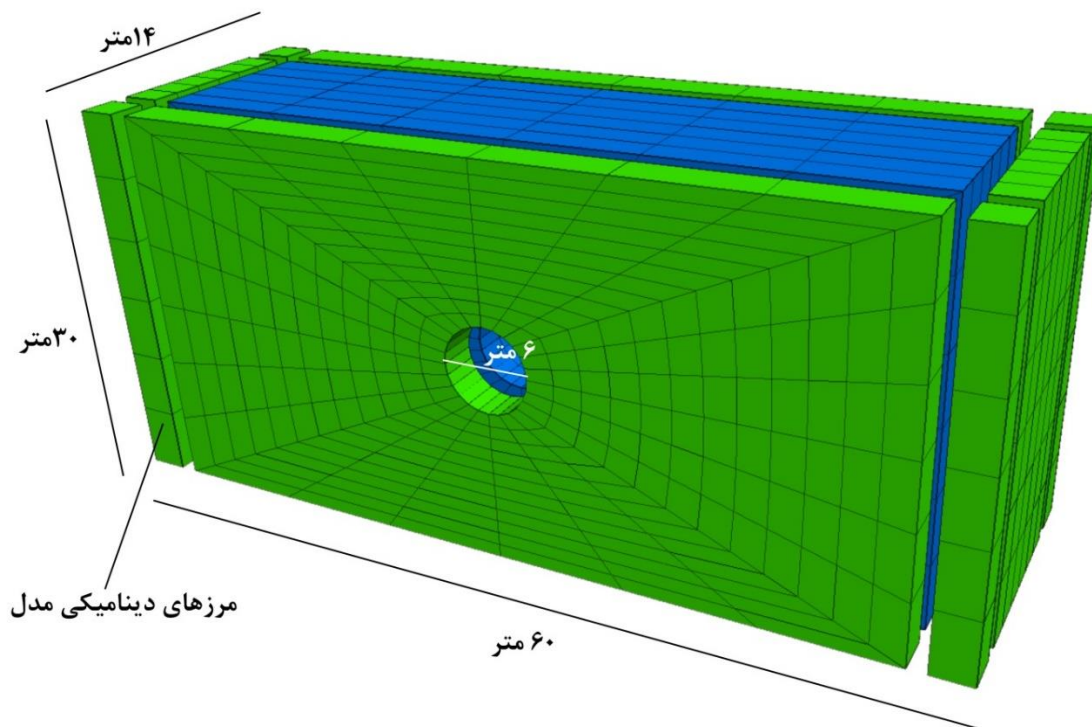
شکل (۴-۳) سیستم نگهداری با حلقه شامل ۳ قطعه بتنی پیش ساخته



شکل (۳-۵) سیستم نگهداری با حلقه شامل ۵ قطعه بتنی پیش ساخته



شکل (۳-۶) سیستم نگهداری با حلقه شامل ۷ قطعه بتنی پیش ساخته



شکل (۷-۳) نمونه‌ای از مدل ساخته شده به همراه ابعاد و مرزهای دینامیکی

۳-۵- نرم افزار FLAC3D

۳-۵-۱- مقدمه

نرم افزار FLAC3D یک برنامه تفاضل محدود از مجموعه نرم افزارهای آیتسکا^۱ است که برای محیط‌های پیوسته به کار می‌رود. این نرم افزار بر پایه تحلیل محاسباتی لاگرانژی استوار است که برای مدل سازی تغییر شکل های بزرگ نیز مناسب است. با این نرم افزار می توان مدل رفتاری سازه های خاکی، سنگی و یا سایر مواد را که دارای جریان پلاستیک در هنگام رسیدن به حد تسلیم هستند، شبیه سازی کرد. در این نرم افزار برای آنالیز تنش ها و تغییر مکان ها، مواد را به صورت شبکه هایی سه- بعدی که از المان های چند وجهی تشکیل شده اند تعریف می کنند (Cundall, 2008).

¹ ITASCA

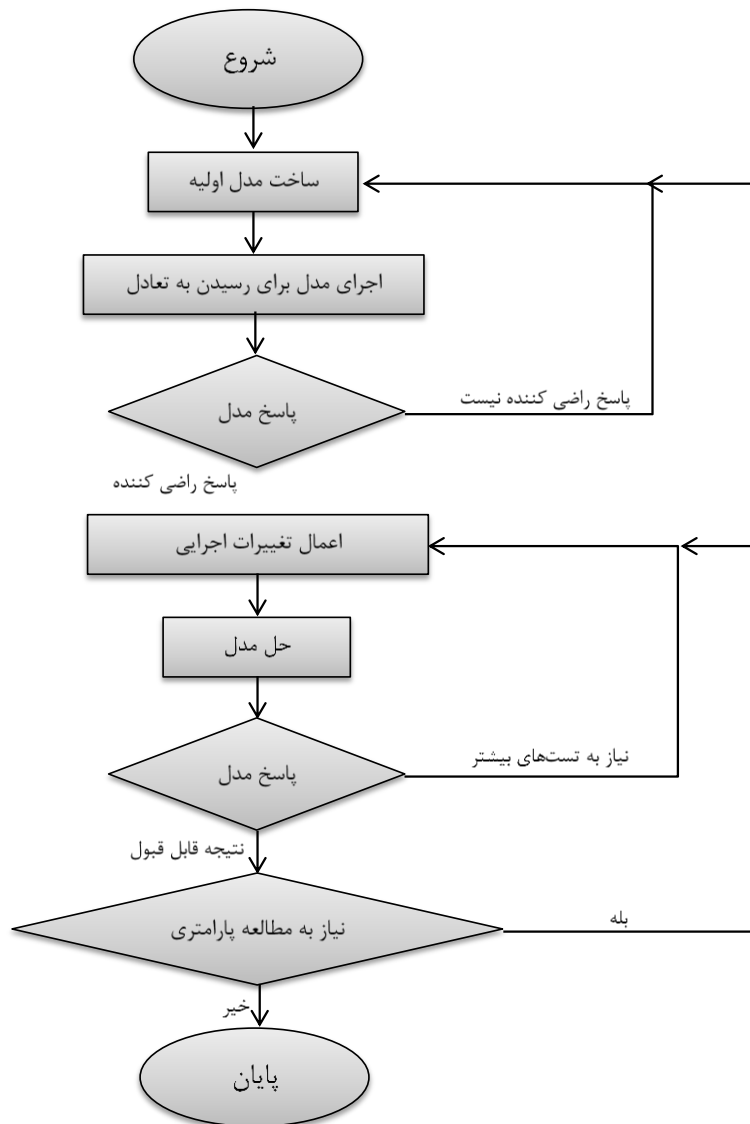
این برنامه از قابلیت های زیادی برای تحلیل مسائل برخوردار است که عمده ترین کاربرد آن در مسائل ژئوتکنیکی است. با استفاده از این نرم افزار می توان مسائل مربوط به سازه های زیرزمینی و سطحی مانند طراحی تونل ها، پی ها و شمع ها، شیروانی های معدنی و عمرانی و نیروگاه هایی که در اعماق زمین قرار دارند را مدل سازی نمود. علاوه بر این می توان اندرکنش های سازه ای مانند سیستم نگهداری بتنی، پیچ سنگ ها، قطعات تسلیم پذیر و شمع های صفحه ای با سنگ یا خاک درون گیر را بررسی کرد. این نرم افزار همچنین قابلیت انجام تحلیل های دینامیکی، گرمایی و جریان سیال را نیز دارد (ITASCA, 2000). با توجه با مشخصاتی که برای این نرم افزار ذکر شد، مناسب ترین گزینه برای انجام بخش عددی تحقیق استفاده از این نرم افزار است.

۳-۵-۲- مراحل حل مساله در FLAC3D

به طور کلی مراحل حل یک مساله با استفاده از نرم افزار FLAC3d به صورت زیر است (ITASCA, 2000).

- ✓ توسعه هندسه مدل
- ✓ ساخت هندسه مدل
- ✓ انتخاب مدل رفتاری و تعیین خصوصیات ماده
- ✓ اعمال شرایط مرزی
- ✓ حل و بررسی مدل ساخته شده و اصلاح آن در صورت لزوم
- ✓ تفسیر نتایج

در شکل (۳-۸) الگوریتم حل مساله در نرم افزار FLAC3D نشان داده شده است.



شکل (۳-۸) الگوریتم حل مساله در نرم‌افزار FLAC3D (ITASCA, 2000)

۳-۵-۳- تحلیل دینامیکی در FLAC3D

۳-۵-۳-۱- مقدمه

بخش دینامیکی نرم‌افزار FLAC3D، بسیار گسترده است و مسائل مربوط به بار لرزه‌ای (زمین‌لرزه)، بارگذاری ضربه‌ای یا انفجاری و انفجار سنگ^۱ را می‌توان با آن مدل‌سازی کرد. تقریباً در تمامی مسائل

¹ Rock Burst

ذکر شده زمان لازم برای اعمال بار، کمتر از یک دقیقه است. این زمان برای انفجار و یا بارگذاری ضربه‌ایی کمتر از یک ثانیه است (Cundall, 2008).

۳-۵-۳-۲- مشکلات عمده برای حل عددی یک تحلیل دینامیکی

علاوه بر مشکلات عمومی موجود در مدل‌سازی عددی، تحلیل‌های عددی لرزه‌ای مشکلات خاص خود را دارد. از جمله این مشکلات می‌توان به موارد زیر اشاره کرد (Guglielmetti et al., 2008):

- ✓ زمان زیاد برای حل مساله
- ✓ مشکلات مربوط به مرزهای مدل و اعمال شرایط مرزی
- ✓ عدم استفاده مدل رفتاری دینامیکی
- ✓ عدم استفاده از خواص دینامیکی محیط درون‌گیر و پوشش بتنی

زمان انجام تحلیل علاوه بر مشخصات زمین‌لرزه به اندازه مش‌بندی مدل به‌طور چشمگیری وابسته است. به عنوان مثال خاص، اجرای مدل‌های این پژوهش بسته به شرایط محیط، و با استفاده از یک سیستم کامپیوتری با ۳۲ گیگ حافظه RAM و پردازنده ۸ هسته‌ای بین ۳ تا ۱۰ روز و با سیستم کامپیوتری با ۴ گیگ حافظه RAM و پردازنده ۳ هسته‌ای بین ۸ تا ۲۶ روز طول خواهد کشید.

۳-۵-۳-۳- مراحل تحلیل دینامیکی در FLAC3D

بطور کلی مراحل تحلیل دینامیکی در این نرم‌افزار بصورت زیر است:

- ✓ گذر امواج از داخل محیط
- ✓ تعیین شرایط میرایی مدل
- ✓ بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی
- ✓ گذر امواج از داخل محیط

موضوع بسیار مهمی که در مورد شبکه بندی تحلیل‌های دینامیکی مطرح می‌شود، تعیین ابعاد مناسب المان‌ها جهت کنترل گزردهی امواج است. ابعاد مش‌ها نقش بسیار مهمی در تحلیل‌های دینامیکی ایفا می‌کند، چرا که ابعاد بزرگ المان‌ها باعث کاهش تعداد گره‌ها و کاهش دقت تحلیل و ابعاد بسیار

کوچک آن‌ها موجب افزایش چشمگیر مدت زمان اجرا می‌شود. بنابراین در تحلیل‌های دینامیکی بزرگ و یا کوچک بودن ابعاد المان‌ها منجر به خطای محاسباتی می‌شود، که باید با دقت بسیاری انجام شود (ITASCA, 2000).

کولیمر^۱ و لایزمر^۲ (۱۹۷۳) نشان دادند که برای حصول اطمینان از انتقال صحیح امواج در یک مدل مش‌بندی شده، بزرگترین ابعاد المان، باید کوچکتر از یک دهم تا یک هشتم طول موج ایجاد شده توسط بالاترین فرکانس امواج ورودی به سیستم باشد (Kuhlemeyer & Lysmer, 1973).

$$\Delta l \leq \frac{\lambda}{10} \quad (1-3)$$

که در این رابطه λ طول موج ایجاد شده توسط بزرگ‌ترین مؤلفه فرکانس امواج ورودی به سیستم است که قادر به تولید انرژی است. به عبارتی دیگر، اگر موج ورودی به سیستم دارای یک مؤلفه فرکانس بالا باشد، باید با در نظر گرفتن معیار بیان شده یک شبکه مش با ابعاد المان‌های بسیار ریز و در نتیجه گام‌های زمانی محاسبات به شدت کوچک و مدت زمان اجرای بسیار زمان‌بری داشته باشیم. برای هر محیط شبکه بندی شده، یک حد بالایی فرکانس وجود دارد که سیستم قادر به انتقال آن است. این حد برای منطقی بودن پاسخ‌های مدل، باید مورد توجه قرار گیرد (Cundall, 2008).

$$l_{max} = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (2-3)$$

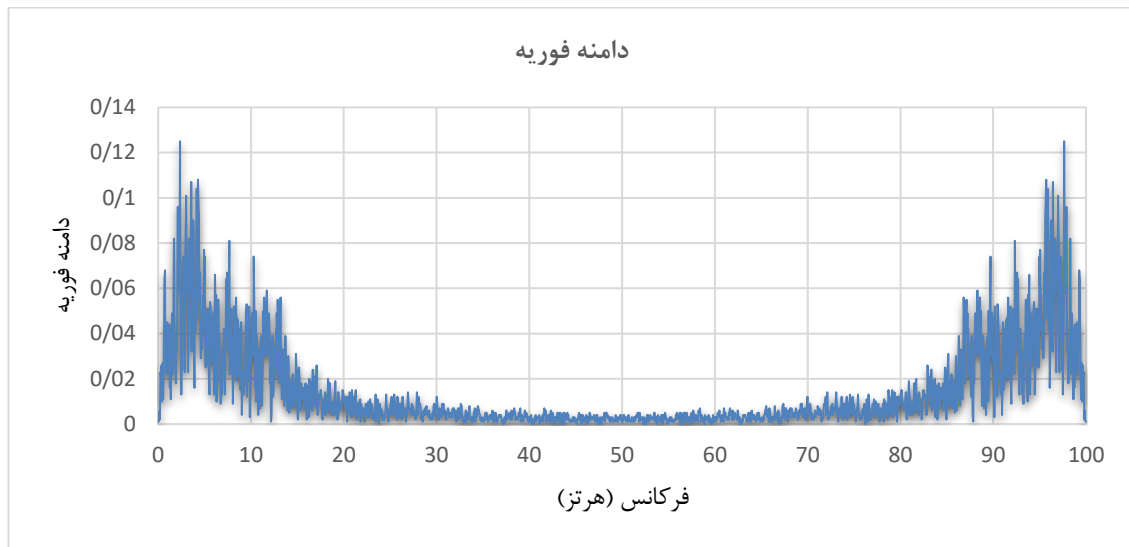
که در این رابطه G مدول برشی و ρ نیز چکالی محیط درون‌گیر است. بنابراین بیشینه ابعاد مش با استفاده از رابطه زیر بدست می‌آید.

$$l_{max} = \frac{C_s}{10f_{max}} \quad (3-3)$$

¹ Kuhlemeyer

² Lysmer

با تفسیر داده‌های شتاب نگاشت، می‌توان بزرگ‌ترین فرکانسی که موج در آن دارای توان باشد را بر اساس بسط فوریه و با استفاده از نرم‌افزار SeismoSignal بدست آورد. نمودار دامنه فوریه مربوط به زمین‌لرزه السنترو، که در این تحقیق از آن به عنوان منبع بار دینامیکی استفاده شده است، در شکل (۳-۹) آمده است.



شکل (۳-۹) دامنه فوریه بدست آمده از نرم‌افزار SeismoSignal برای زمین‌لرزه السنترو^۱

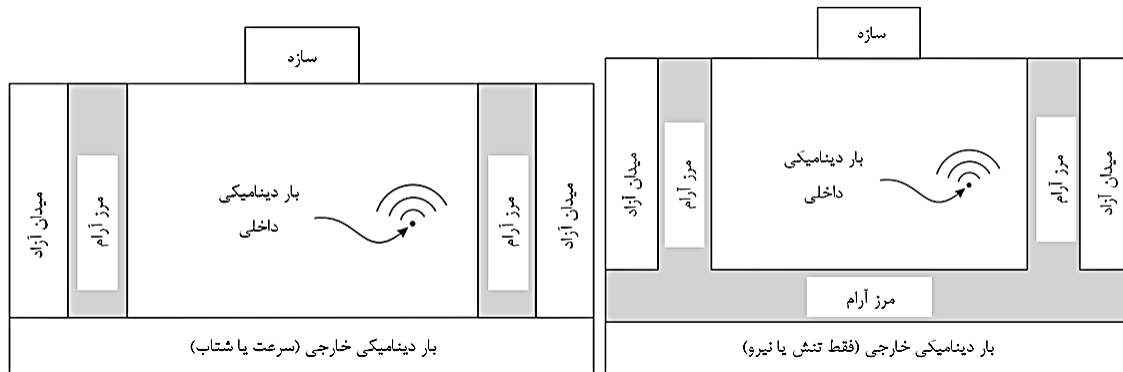
۳-۵-۳-۴- بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی

بارگذاری دینامیکی پیچیده تر از بارگذاری استاتیکی بوده و نیازمند توجه بیشتری است. بار دینامیکی باید بصورت یک تاریخچه زمانی بارگذاری اعمال شود. بدین صورت که بار اعمالی، به عنوان تابع زمانی مشخص شده و این تابع در یک بازه مشخص از زمان اعمال شود. بطور کلی چهار روش برای اعمال بارگذاری دینامیکی وجود دارد:

- ✓ اعمال تاریخچه زمانی شتاب
- ✓ اعمال تاریخچه زمانی سرعت
- ✓ اعمال تاریخچه زمانی تنش
- ✓ اعمال تاریخچه زمانی نیرو

¹ El-Centro

نرم‌افزار FLAC3D با اعمال شرایط مرزی ورودی در مرزهای مدل و همچنین گره‌های داخلی در صورت لزوم، ناحیه‌ای از مواد را که در معرض بارهای خارجی یا داخلی هستند را مدل می‌کند. انعکاس امواج در مرزهای مدل را باید با تعیین شرایط مرزی آرام (ویسکوز^۱) و یا مرز میدان آزاد^۲ حذف نمود. انواع بارهای دینامیکی و شرایط مرزی در شکل (۳-۱۰) نشان داده شده است.



شکل (۳-۱۰) انواع بارگذاری دینامیکی و شرایط مرزی موجود در FLAC3D - الف) پایه منعطف ب) پایه صلب (Cundall, 2008)

اعمال بارهای دینامیکی مبتنی بر استفاده از میراگرهای عمودی و برشی در مرزهای مدل است که انرژی امواج برخوردی را جذب و از بازگشت آن‌ها به داخل مدل جلوگیری می‌کنند. بدین منظور در طرفین مدل از مرزهای آزاد و در پایه مدل از مرزهای ویسکوز استفاده می‌شود. وجود مرز ویسکوز در پایه باعث می‌شود که اعمال بار در زلزله به صورت تاریخچه شتاب یا سرعت امکان‌پذیر نباشد. به همین علت لازم است با استفاده از روابط (۳-۴) و (۳-۵) داده‌های شتاب زلزله به صورت موج برشی که راستای حرکت آن به سمت سطح زمین است به مدل اعمال شود (Cundall, 2008).

$$\sigma_n = -2(\rho C_p)v_n \quad (۴-۳)$$

$$\sigma_s = -2(\rho C_s)v_s \quad (۵-۳)$$

σ_n : تنش نرمال اعمالی

¹ Quite (Viscous) Boundary

² Free Field Boundary

σ_s : تنش برشی اعمالی

v_n : سرعت نرمال موج ورودی در مرز

v_s : سرعت برشی موج ورودی در مرز

C_p : سرعت موج P در محیط

C_s : سرعت موج S در محیط

ρ : تنش نرمال اعمالی

که در روابط بالا مقادیر C_p و C_s با استفاده از روابط (۳-۶) و (۳-۷) محاسبه می‌شوند.

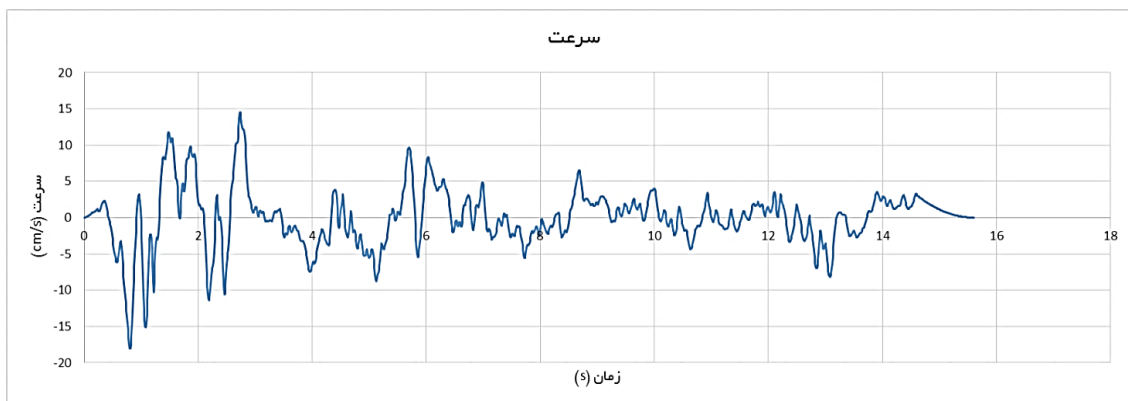
$$C_p = \sqrt{\frac{K + \frac{4}{3}G}{\rho}} \quad (۳-۶)$$

$$C_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \quad (۳-۷)$$

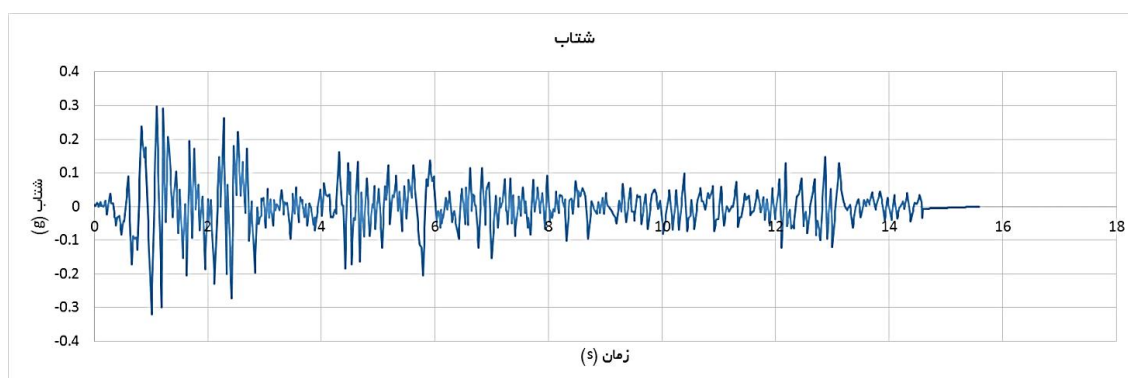
۳-۵-۳-۵- زمین لرزه السنترو

در تحلیل‌های دینامیکی انجام شده در این تحقیق، از داده‌های زمین لرزه السنترو که در سال ۱۹۴۰ در مکزیکوسیتی^۱ ایالات متحده امریکا و در عمق ۱۶ کیلومتری از سطح زمین اتفاق افتاد، استفاده شده است. از داده‌های این زمین لرزه در پژوهش‌های بسیاری استفاده شده است. تاریخچه زمانی سرعت، شتاب و تنش برشی زمین لرزه السنترو به ترتیب در شکل‌های (۳-۱۱) تا شکل (۳-۱۳) آمده است (Udwadia & Trifunac, 1973).

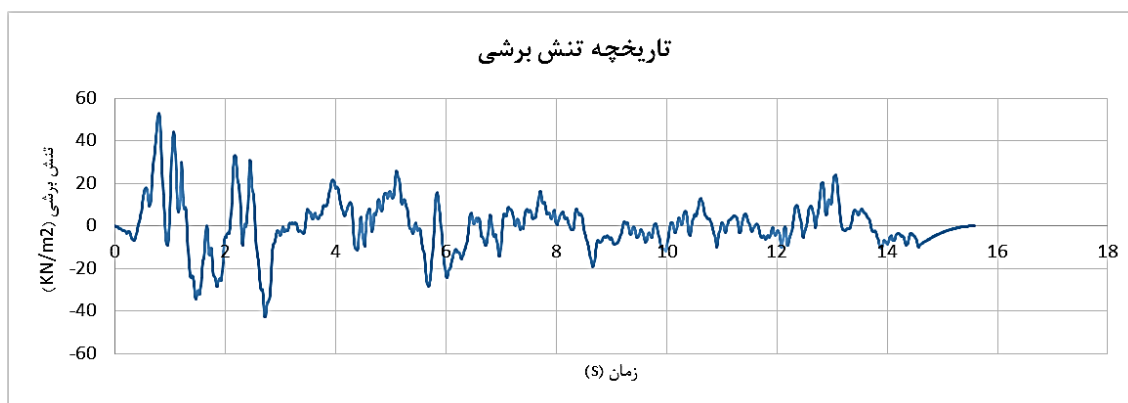
¹ Mexico city



شکل (۱۱-۳) تاریخچه زمانی سرعت زمین لرزه السنترو



شکل (۱۲-۳) تاریخچه زمانی شتاب زمین لرزه السنترو



شکل (۱۳-۳) تاریخچه زمانی تنش برشی زمین لرزه السنترو

۳-۵-۶- تصحیحات مبنا

اگر یک رکورد سرعت یا شتاب خام به عنوان تاریخچه زمانی اعمال شود، رفتار مدل مورد نظر ممکن است بعد از اتمام حرکت به صورت سرعت مداوم یا تغییر مکان پسماند باشد. در صورتی که سرعت و جابه‌جایی صفر نباشد، فرآیند تصحیحات مبنا باید بر روی تاریخچه زمانی انجام شود.

همانطوریکه قبلا اشاره گردید، در مسائل دینامیکی در مرزهای مدل، علاوه بر مواردی که در حالت استاتیکی باید به آنها توجه شود، بازتاب امواج در اثر برخورد با مرزها نیز مطرح است. در طبیعت، محیط انتشار موج در اطراف فضای زیرزمینی، محیطی نامحدود است و موج در یک محیط بینهایت انتشار پیدا می‌کند. در مدل‌سازی‌های عددی، مدل ایجاد شده محدود بوده و باید مرزهای مدل را محدود در نظر گرفت. استفاده از یک مدل بزرگتر می‌تواند مشکلات ناشی از این بازتاب را کاهش دهد، زیرا بخش عمده‌ای از انرژی موج انعکاسی از مرزها، توسط میرایی مصالح مورد استفاده جذب می‌شود، اما افزایش ابعاد منجر به افزایش عملیات محاسباتی حل مساله شده و زمان حل مساله را بطور چشمگیری افزایش می‌دهد. روش دیگری برای حل این مشکل، استفاده از مرزهای آرام^۱ یا میدان آزاد^۲ است (Cundall, 2008).

✓ شرایط مرزی آرام

استفاده از شرایط مرزی آرام توسط لایمز و کولیمز (۱۹۶۹) پیشنهاد شد که در نرم‌افزار FLAC3D نیز مورد استفاده قرار می‌گیرد. این روش مبتنی بر استفاده از میراگرهایی مستقل در جهات عمودی و برشی مرزهای مدل است. جذب مؤثرتر انرژی (به‌ویژه در امواج ریلی) نیازمند استفاده از عناصر وابسته به فرکانس است که تنها در تحلیل‌های دامنه - فرکانس استفاده می‌شود. این عناصر معمولاً مرزهای سازگار نامیده می‌شوند و شامل محاسبات ماتریس سختی دینامیک، با تمام درجات آزادی مرتبط با مرز است (ITASCA, 2000).

مرزهای آرام از میراگرهای مستقلی تشکیل شده‌اند که در جهت‌های برشی و نرمال به‌طور مستقل به مرز متصل می‌شوند. این روش تقریباً در جذب امواج رسیده به مرز مدل در زاویه‌های بیشتر از ۳۰ درجه مؤثر است. این میراگرها، نیروهای عمودی و برشی را مطابق با رابطه‌های (۳-۸) و (۳-۹) بر گره‌های مرزی اعمال می‌کنند.

$$t_n = -\rho C_p v_n \quad (۸-۳)$$

$$t_s = -\rho C_s v_s \quad (۹-۳)$$

¹ Quiet Boundries

² Free Field Boundries

t_n : کشش عمودی

t_s : کشش برشی

v_n : سرعت عمودی موج ورودی در مرز

v_s : سرعت برشی موج ورودی در مرز

C_p : سرعت موج P در محیط

C_s : سرعت موج S در محیط

ρ : تنش عمودی اعمالی

✓ شرایط مرزی میدان آزاد

تحلیل‌های عددی از پاسخ‌های لرزه‌ای و اغلب در سازه‌های سطحی نظیر سدها نیازمند مجزا کردن ناحیه‌ای از مصالح مجاور فونداسیون است. امواج ورودی زلزله به‌طور معمول بصورت امواج صفحه‌ای که در مصالح زیرین به سمت بالا منتشر می‌شوند، ارائه می‌شود. شرایط مرزی در اطراف مدل برای حرکت میدان آزاد، در شرایط عدم حضور سازه، باید به حساب آورده شوند.

۳-۵-۳-۸- میرایی مکانیکی

از آنجایی که موج در طبیعت، با پیشروی در محیط میرا شده و انرژی آن کاهش می‌یابد، بنابراین بایستی این پدیده نیز جهت تحلیل دینامیکی مورد توجه قرار گیرد. اگر میرایی وجود نداشته باشد، سیستم در رویارویی با یک بار دینامیکی، تا ابد ارتعاش می‌کند و هیچ‌گاه آثار لرزشی از سیستم محو نمی‌شود. نرم‌افزار FLAC3D برای حل مسائل دینامیکی از چند نوع میرایی استفاده می‌کند، مانند: میرایی محلی^۲، میرایی متناسب با جرم^۳ و میرایی متناسب با سختی^۴ که می‌توان هر یک را به‌صورت جداگانه یا ترکیبی به کار برد (Cundall, 2008).

¹ Attraction

² Local Damping

³ Mass-proportional

⁴ Stiffness-proportional

میرایی نوع ترکیبی، میرایی رایلی نامیده می‌شود. در مدل رایلی ماتریس ضرایب میرایی (C)، طبق رابطه (۳-۱۰) با ماترسی‌های جرم و سختی ارتباط دارد.

$$C = \alpha M + \beta K \quad (۳-۱۰)$$

α : ضریب میرایی جرم (مربوط به جزء متناسب با جرم)

β : ضریب میرایی سختی (مربوط به جزء متناسب با سختی)

M : جرم

K : سختی

معمولا میرایی رایلی برای توده سنگ‌های بسیار خرد شده و خاک به کار می‌رود و برای استفاده در تحلیل‌های دینامیکی بسیار زمان‌بر هستند ولی برای مدل‌هایی که شکست در آن‌ها در امتداد درزه‌های خاصی اتفاق می‌افتد می‌توان از میرایی محلی با صرف زمان کمتری استفاده کرد. در FLAC3D جهت مشخص شدن میرایی محیط از میرایی رایلی استفاده می‌شود که مدل ریاضی آن چنان انتخاب می‌شود که انرژی مستهلک شده در محاسبات عددی، مشابه انرژی مستهلک شده در سیستم فیزیکی باشد. بدین منظور لازم است که ابتدا با تعیین مقدار فرکانس طبیعی مدل تعیین شده، مقدار میرایی رایلی را در محدوده فرکانس طبیعی تعریف نمود. تعیین میرایی محیط به راحتی امکان‌پذیر نیست، ولی بر اساس تجربه مقدار میرایی مصالح ژئوتکنیکی، ۲ تا ۵ درصد میرایی بحرانی در نظر گرفته می‌شود. ولی باید دقت داشت، در صورت استفاده از مدل‌های پلاستیک (مانند مدل موهر-کولمب)، به دلیل جریان پلاستیک ذرات، پراکنش انرژی ایجاب می‌کند که میرایی، در مطالعات عددی مذکور (که دارای کرنش‌های بزرگی هستند) در حدود ۰/۵ درصد کافی باشد. در بسیاری از مسائل، شامل مطالعات دینامیکی سازه‌های سطحی، سدها، تونل‌ها و خطوط لوله‌ای مدفون، فرکانس‌های حساس مربوط به فرکانس‌های طبیعی سیستم است. بنابراین محاسبه فرکانس طبیعی، یکی از مسائل مهم روش‌های عددی حل یک مساله دینامیکی است (Cundall, 2008).

۳-۵-۴- فرکانس طبیعی محیط

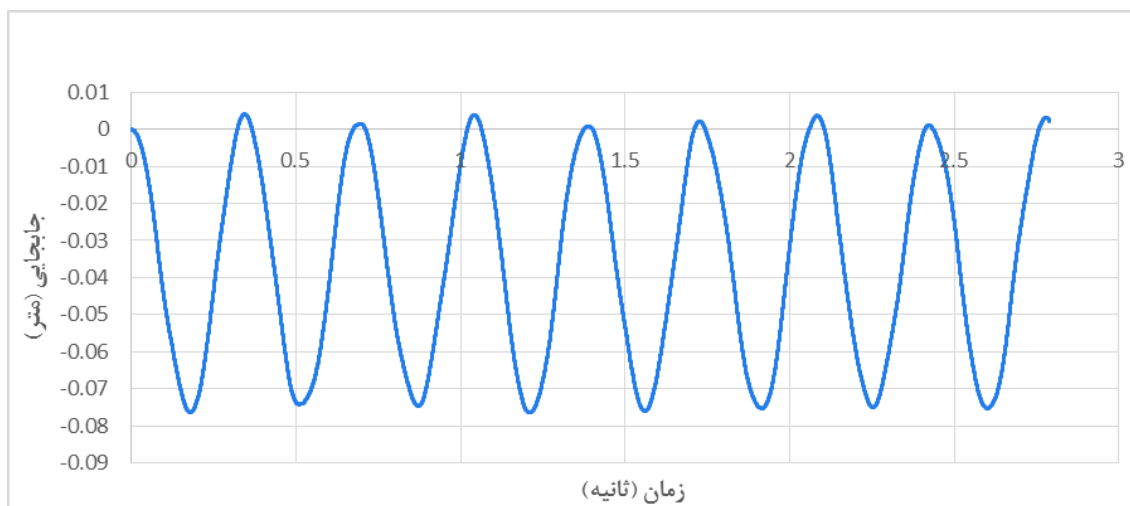
برای یافتن فرکانس طبیعی محیط در نرم‌افزارهای عددی باید به این صورت عمل کرد که ابتدا مدلی با فرض الاستیک بودن و میرایی صفر ساخته شود. سپس مرزهای اطراف آزاد و فقط کف مدل ثابت شود. آن گاه برای یک نقطه در داخل مدل، تحت یک تحریک دینامیکی، تابع سرعت یا جابه‌جایی نسبت به زمان رسم و تعداد نوسان در یک ثانیه محاسبه شود. تحریک دینامیکی می‌تواند به سه صورت باشد (ITASCA, 2000).

✓ پالس ضربه به مرز تحتانی مدل

✓ تحریک سیستم تحت یک شتاب سینوسی به مدت مشخص

✓ تحریک سیستم تحت شتاب جاذبه

در این پژوهش نیز با استفاده از تحریک سیستم تحت شتاب جاذبه، نمودار جابه‌جایی - زمان محیط شکل (۳-۱۴) بدست آمده است. با توجه به این نمودار می‌توان فرکانس طبیعی محیط را تعیین کرد. این مقدار برای مدل‌های مربوط به این پژوهش برابر $3/5$ هرتز بدست آمده است.



شکل (۳-۱۴) نمودار جابه‌جایی - زمان محیط با استفاده از تحریک سیستم تحت شتاب جاذبه

۳-۶- پاسخ دینامیکی قطعات بتنی

پاسخ دینامیکی قطعات بتنی بر اساس تغییرات نیروهای محوری، نیروی برشی و گشتاور خمشی با مطالعه تاثیر پارامترهایی چون مدول تغییرشکل پذیری، ضریب چسبندگی، زاویه اصطکاک داخلی و ضخامت پوشش نگهداری تعداد قطعات بتنی پوشش نگهداری مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین مقایسه‌ای بین نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با روش‌های تحلیلی ارائه شده است، که برای پوشش‌هایی به صورت یک حلقه کامل و بدون اتصال توسعه داده شده اند، صورت گرفته است. نتایج پژوهش به طور کلی به سه دسته تقسیم می‌شود.

- ✓ نتایج مربوط به تحلیل پارامترهای خاک
- ✓ نتایج مربوط به تحلیل پارامترهای سیستم نگهداری
- ✓ نتایج حاصل از مقایسه روش عددی و روش‌های تحلیلی

۳-۷- بررسی پارامترهای محیط خاک دربرگیرنده تونل

۳-۷-۱- مقدمه

به منظور بررسی تاثیر پارامترهای خاک، بدون در نظر گرفتن تاثیر تعداد قطعات بتنی ولی با در نظر گرفتن تاثیر ضخامت آن‌ها، تحلیل دینامیکی عددی در حالت پوشش نگهداری پیوسته و با انواع مختلف خاک‌های درون‌گیر با مقادیر مختلف مدول الاستیسیته و زاویه اصطکاک داخلی انجام شد. همچنین به منظور مقایسه نتایج حاصل تحلیل عددی، از روش‌های تحلیلی ونگ، بوبت و پینزن استفاده شده است.

نتایج نموداری حاصل از تحلیل عددی و روش‌های تحلیلی در شکل (۳-۱۵) تا شکل (۳-۲۳) نشان داده شده است. در این نمودارها، انواع خاک‌ها بر اساس افزایش مدول الاستیسیته و همچنین افزایش کلی زاویه اصطکاک داخلی مرتب شده‌اند.

مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی بیشینه و نیروی محوری بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل و همچنین برای مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیلی و برای نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل و برای مدل‌سازی عددی در جدول (۳-۳)، جدول (۳-۴) و جدول (۳-۵) (۳-۶) آمده است.

جدول (۳-۳) مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل برای ضخامت قطعات بتنی پوشش نگهداری ۳۰ سانتی‌متر

	GM-Loose	SP-Loose	GW-Loose	GM-Dense	SP-Dense	GW-Dense	پارامتر
	7×10^6	1×10^7	3×10^7	3×10^7	8×10^7	$3/2 \times 10^7$	مدول الاستیسیته
FLAC3D	$4/33 \times 10^5$	$4/05 \times 10^5$	$1/69 \times 10^5$	$1/73 \times 10^5$	$1/22 \times 10^5$	$3/02 \times 10^4$	گشتاور خمشی (Nm/m)
	$4/92 \times 10^5$	$4/85 \times 10^5$	$2/38 \times 10^5$	$2/56 \times 10^5$	$4/44 \times 10^5$	$6/93 \times 10^5$	نیروی محوری (N)
	$7/87 \times 10^3$	$8/44 \times 10^3$	$1/85 \times 10^4$	$1/92 \times 10^4$	$8/25 \times 10^4$	$1/15 \times 10^4$	نیروی برشی (N)
Bobet	$3/99 \times 10^5$	$3/65 \times 10^5$	$1/23 \times 10^5$	$1/21 \times 10^5$	$8/94 \times 10^4$	$1/16 \times 10^4$	گشتاور خمشی (Nm/m)
	$5/13 \times 10^5$	$5/00 \times 10^5$	$2/58 \times 10^5$	$2/59 \times 10^5$	$4/74 \times 10^5$	$7/18 \times 10^5$	نیروی محوری (N)
Penzien	$4/50 \times 10^5$	$4/24 \times 10^5$	$1/86 \times 10^5$	$1/81 \times 10^5$	$1/31 \times 10^5$	$4/12 \times 10^4$	گشتاور خمشی (Nm/m)
	$2/56 \times 10^5$	$2/36 \times 10^5$	$7/65 \times 10^4$	$7/46 \times 10^4$	$2/20 \times 10^5$	$5/06 \times 10^5$	نیروی محوری (N)
Wang	$4/60 \times 10^5$	$4/36 \times 10^5$	$1/99 \times 10^5$	$1/93 \times 10^5$	$1/42 \times 10^5$	$5/20 \times 10^4$	گشتاور خمشی (Nm/m)
	$5/30 \times 10^5$	$5/21 \times 10^5$	$2/72 \times 10^5$	$2/69 \times 10^5$	$4/93 \times 10^5$	$7/49 \times 10^5$	نیروی محوری (N)

جدول (۴-۳) مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل برای ضخامت قطعات بتنی پوشش نگهداری ۴۰ سانتی‌متر

	GM-Loose	SP-Loose	GW-Loose	GM-Dense	SP-Dense	GW-Dense	پارامتر
	7×10^6	1×10^7	3×10^7	3×10^7	8×10^7	$3/2 \times 10^7$	مدول الاستیسیته
FLAC3D	$5/41 \times 10^5$	$5/01 \times 10^5$	$2/86 \times 10^5$	$2/84 \times 10^5$	$2/38 \times 10^5$	$5/96 \times 10^5$	گشتاور خمشی (Nm/m)
	$5/31 \times 10^5$	$5/12 \times 10^5$	$2/62 \times 10^5$	$2/62 \times 10^5$	$4/84 \times 10^5$	$7/22 \times 10^5$	نیروی محوری (N)
	$1/11 \times 10^4$	$1/35 \times 10^4$	$2/09 \times 10^4$	$2/08 \times 10^4$	$6/49 \times 10^4$	$9/86 \times 10^4$	نیروی برشی (N)
Bobet	$5/02 \times 10^5$	$4/63 \times 10^5$	$2/50 \times 10^5$	$2/42 \times 10^5$	$1/90 \times 10^5$	$3/34 \times 10^4$	گشتاور خمشی (Nm/m)
	$5/90 \times 10^5$	$5/61 \times 10^5$	$3/10 \times 10^5$	$3/04 \times 10^5$	$5/32 \times 10^5$	$7/79 \times 10^5$	نیروی محوری (N)
Penzien	$5/63 \times 10^5$	$5/24 \times 10^5$	$3/11 \times 10^5$	$3/10 \times 10^5$	$2/60 \times 10^5$	$8/19 \times 10^5$	گشتاور خمشی (Nm/m)
	$3/02 \times 10^5$	$2/72 \times 10^5$	$1/03 \times 10^5$	$1/01 \times 10^5$	$3/07 \times 10^5$	$5/33 \times 10^5$	نیروی محوری (N)
Wang	$5/86 \times 10^5$	$5/50 \times 10^5$	$3/35 \times 10^5$	$3/33 \times 10^5$	$2/84 \times 10^5$	$1/00 \times 10^5$	گشتاور خمشی (Nm/m)
	$6/13 \times 10^5$	$5/79 \times 10^5$	$3/22 \times 10^5$	$3/13 \times 10^5$	$5/56 \times 10^5$	$7/97 \times 10^5$	نیروی محوری (N)

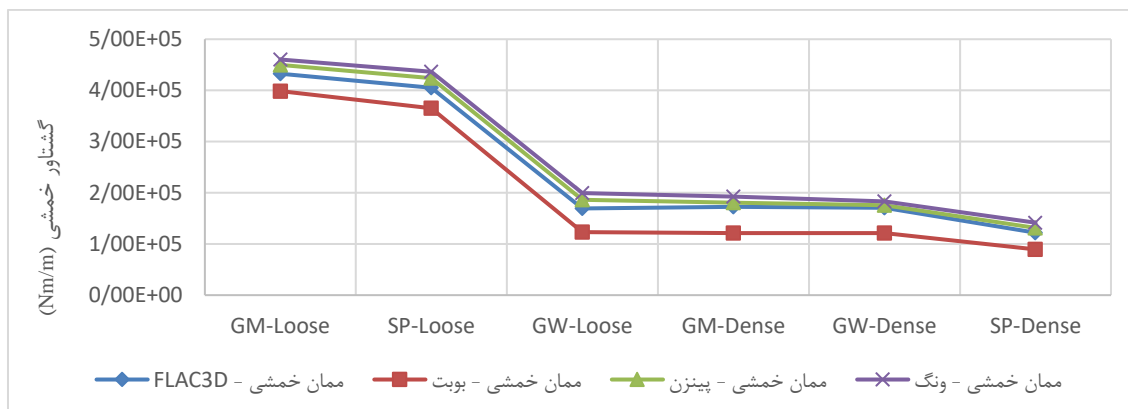
جدول (۵-۳) مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل برای ضخامت قطعات بتنی پوشش نگهداری ۵۰ سانتی‌متر

	GM-Loose	SP-Loose	GW-Loose	GM-Dense	SP-Dense	GW-Dense	پارامتر
	7×10^6	1×10^7	3×10^7	3×10^7	8×10^7	$3/2 \times 10^7$	مدول الاستیسیته
FLAC3D	$5/77 \times 10^5$	$5/37 \times 10^5$	$3/61 \times 10^5$	$3/64 \times 10^5$	$3/61 \times 10^5$	$9/03 \times 10^4$	گشتاور خمشی (Nm/m)

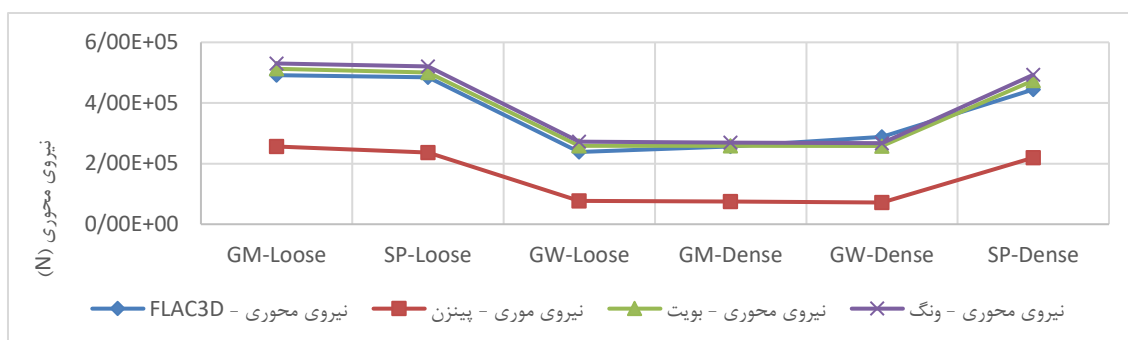
	نیروی محوری (N)	۷/۳۵×۱۰ ^۵	۵/۰۸×۱۰ ^۵	۲/۸۹×۱۰ ^۵	۲/۸۸×۱۰ ^۵	۵/۰۳×۱۰ ^۵	۵/۴۰×۱۰ ^۵
	نیروی برشی (N)	۵/۳۶×۱۰ ^۴	۳/۷۹×۱۰ ^۴	۲/۱۴×۱۰ ^۴	۲/۱۲×۱۰ ^۴	۱/۶۸×۱۰ ^۴	۱/۳۷×۱۰ ^۴
<i>Bobet</i>	گشتاور خمشی (Nm/m)	۶/۶۵۷×۱۰ ^۴	۲/۶۷×۱۰ ^۵	۲/۸۷×۱۰ ^۵	۳/۰۷×۱۰ ^۵	۴/۶۶×۱۰ ^۵	۵/۲۶×۱۰ ^۵
	نیروی محوری (N)	۷/۷۵×۱۰ ^۴	۵/۴۰×۱۰ ^۵	۳/۱۳×۱۰ ^۵	۳/۲۰×۱۰ ^۵	۵/۳۷×۱۰ ^۵	۵/۵۹×۱۰ ^۵
<i>Penzien</i>	گشتاور خمشی (Nm/m)	۱/۱۶×۱۰ ^۵	۳/۷۷×۱۰ ^۵	۳/۹۰×۱۰ ^۵	۴/۰۳×۱۰ ^۵	۶/۱۴×۱۰ ^۵	۶/۳۵×۱۰ ^۵
	نیروی محوری (N)	۵/۴۷×۱۰ ^۵	۳/۲۰×۱۰ ^۵	۱/۱۴×۱۰ ^۵	۱/۱۴×۱۰ ^۵	۲/۸۴×۱۰ ^۵	۳/۱۰×۱۰ ^۵
<i>Wang</i>	گشتاور خمشی (Nm/m)	۱/۳۶×۱۰ ^۵	۳/۹۶×۱۰ ^۵	۴/۰۸×۱۰ ^۵	۴/۲۷×۱۰ ^۵	۶/۳۴×۱۰ ^۵	۶/۵۲×۱۰ ^۵
	نیروی محوری (N)	۷/۸۶×۱۰ ^۵	۵/۵۶×۱۰ ^۵	۳/۲۰×۱۰ ^۵	۳/۲۷×۱۰ ^۵	۵/۴۴×۱۰ ^۵	۵/۶۸×۱۰ ^۵

به‌طور کلی نتایج حاصل نشان می‌دهد که با افزایش مدول تغییرشکل پذیری و زاویه اصطکاک داخلی، مقدار گشتاور خمشی بیشینه کاهش، مقدار نیروی محوری بیشینه ابتدا کاهش و سپس افزایش و مقدار تنش برشی افزایش می‌یابد. علاوه بر این نتایج حاصل از تحلیل‌های عددی نشان می‌دهد که تفاوت زیادی بین مقادیر حاصل از روش عددی و روش تحلیلی وجود ندارد.

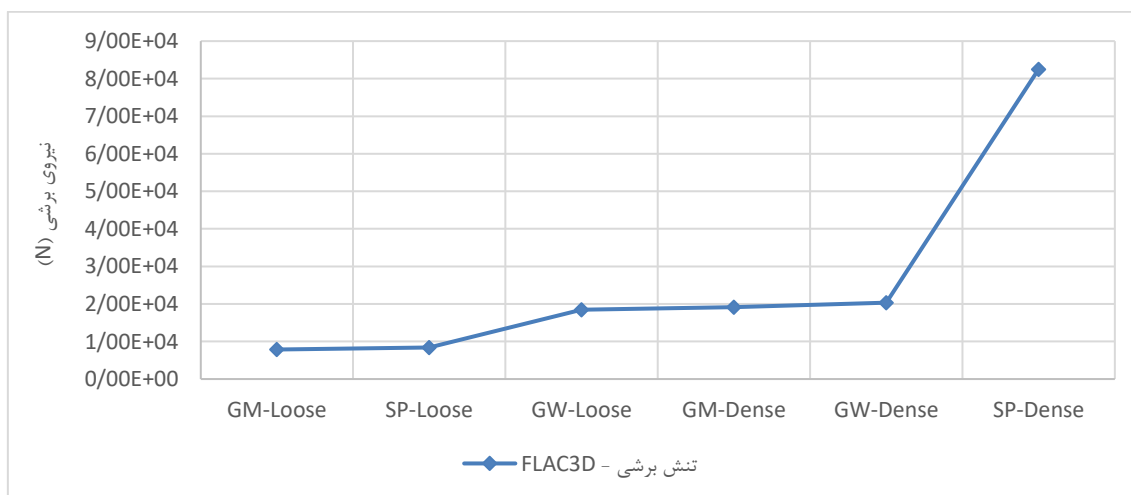
برای نیروی محوری روش پینزن مقادیر بسیار کمتری نسبت به دو روش دیگر و همچنین تحلیل عددی داشته ولی دو روش تحلیلی بوبت و ونگ مقادیر بسیار نزدیکتر ولی کمی بیشتری نسبت به روش عددی داشته است. برای گشتاور خمشی روش بوبت مقادیر نسبتاً پایین‌تری نسبت به دو روش پینزن و ونگ دارد. دلیل کاهش مقدار گشتاور خمشی بیشینه وارد بر پوشش نگهداری بتن با افزایش مدول تغییر شکل پذیری خاک میزان کمتری از تنش برشی حاصل از بار دینامیکی زمین- لرزه به پوشش نگهداری وارد می‌شود و میزان کرنش برشی بیشینه کاهش می‌یابد. این نتایج همچنین توسط فهیمی فر و وکیلزاده نیز گزارش شده است (Fahimifar & Vakilzadeh, 2009).



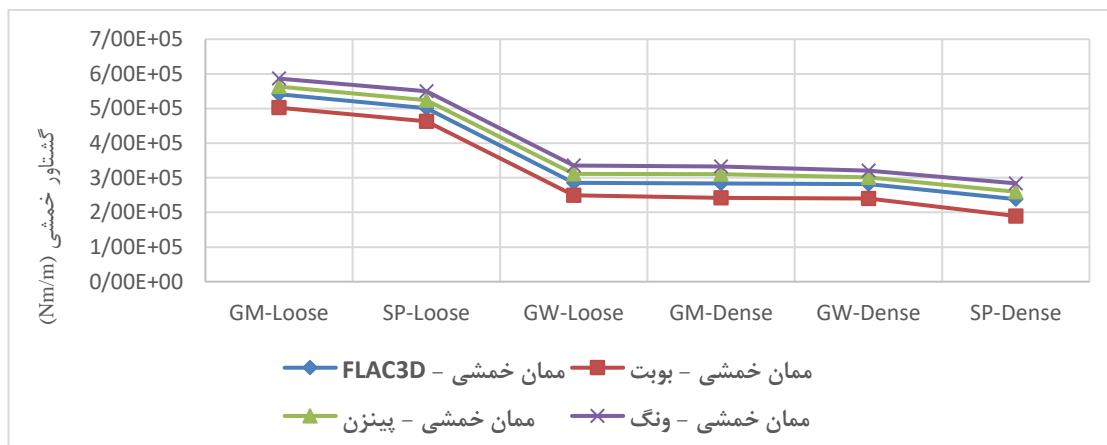
شکل (۱۵-۳) مقایسه گشتاور خمشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۳۰ سانتی‌متر)



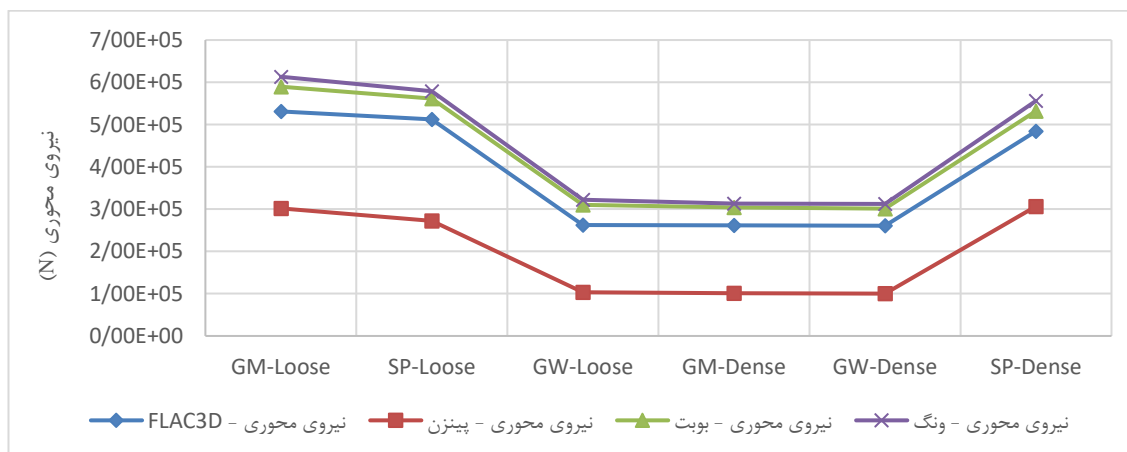
شکل (۱۶-۳) مقایسه نیروی محوری بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۳۰ سانتی‌متر)



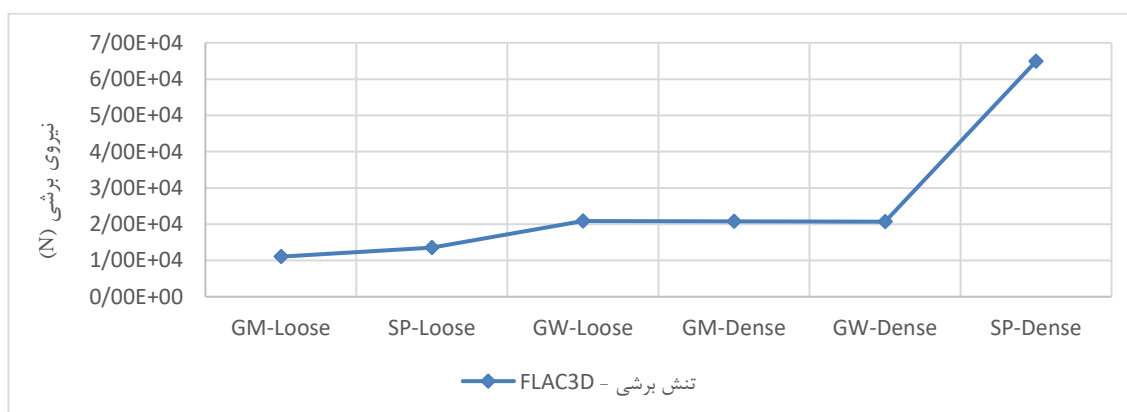
شکل (۱۷-۳) مقایسه نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل (ضخامت سیستم نگهداری ۳۰ سانتی‌متر)



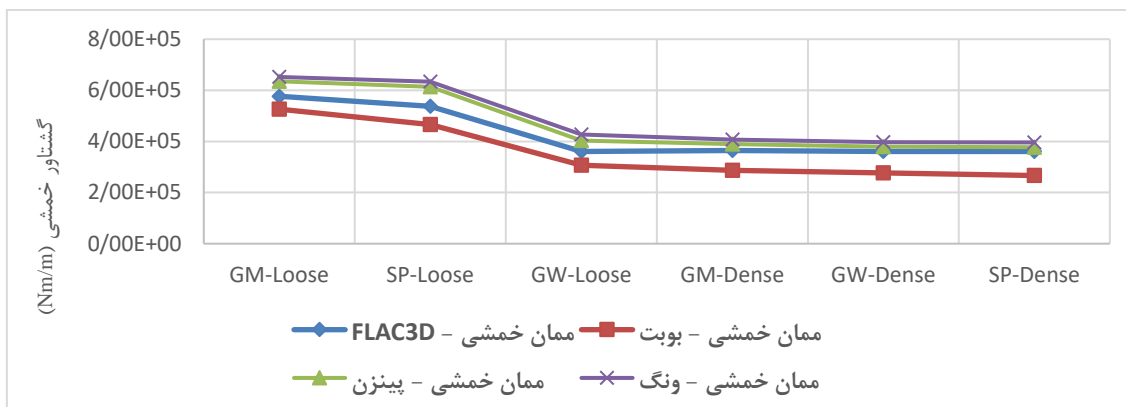
شکل (۳-۱۸) مقایسه گشتاور خمشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۴۰ سانتی‌متر)



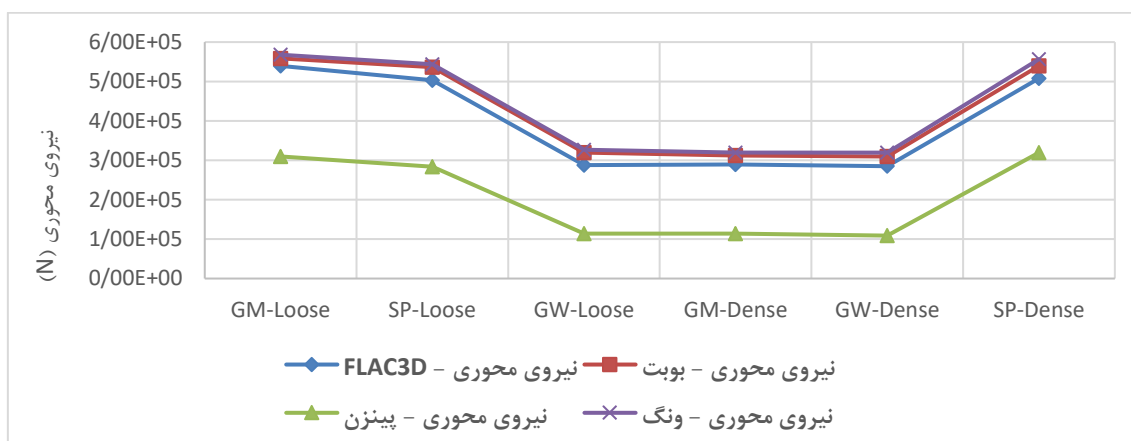
شکل (۳-۱۹) مقایسه نیروی محوری بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۴۰ سانتی‌متر)



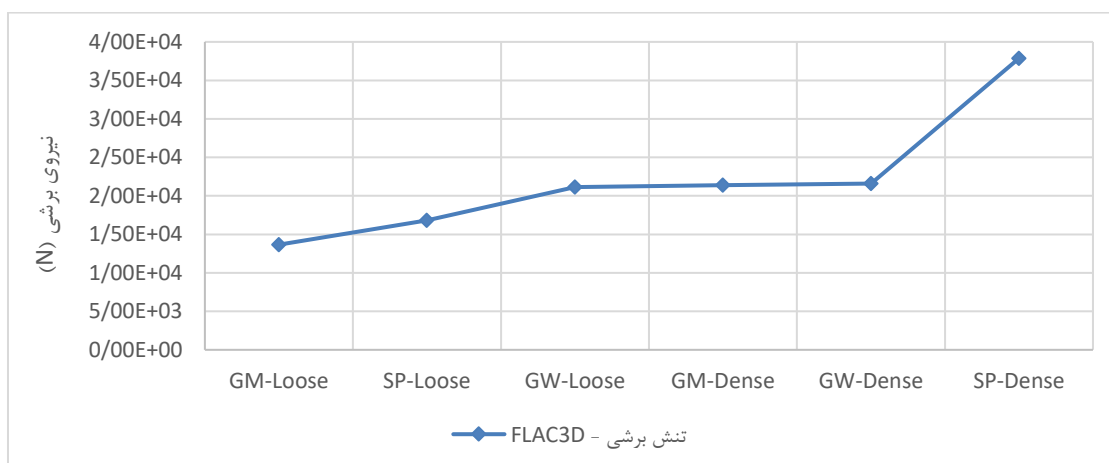
شکل (۳-۲۰) مقایسه نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل (ضخامت سیستم نگهداری ۴۰ سانتی‌متر)



شکل (۲۱-۳) مقایسه گشتاور خمشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۵۰ سانتی‌متر)



شکل (۲۲-۳) مقایسه نیروی محوری بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل - مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیلی (ضخامت سیستم نگهداری ۵۰ سانتی‌متر)



شکل (۲۳-۳) نمودار تنش برشی - ضخامت سیستم نگهداری ۵۰ سانتی‌متر

نمودارهای ارائه شده در شکل‌های (۳-۱۵) تا (۳-۲۳) را می‌توان در ۳ بخش زیر مورد مطالعه قرار داد:

۳-۷-۲- گشتاور خمشی

بطور کلی با افزایش مدول الاستیسیته خاک، میزان گشتاور خمشی بیشینه کاهش پیدا می‌کند. دلیل این موضوع می‌تواند کاهش مقدار کرنش برشی بیشینه در خاک و همچنین کاهش میزان تنش برشی حاصل از بار دینامیکی منتقل شده از خاک به پوشش بتنی باشد. دلیل افزایش جزئی از SP-Dmse به GN-Dmse می‌تواند، تغییر اندازه دانه‌های خاک و همچنین کاهش سرعت موج برشی به دلیل افزایش فضای خالی باشد، زیرا GW-Dmse از نوع درشت دانه شنی و SP-Dmse از نوع ماسه‌ای دانه‌ای است.

۳-۷-۳- نیروی محوری

در مورد نیروی مورد بررسی، اگر خاک‌های مورد بررسی را به دو نوع دانه‌ای ماسه‌ای و درشت دانه شنی تقسیم کنیم، متوجه می‌شویم که برای نیروی محوری و برای خاک نوع درشت دانه شنی روند کاهشی قابل توجهی داشته است. این روند کاهشی می‌تواند دقیقاً به دلیل کاهش میزان کرنش برشی بیشینه و همچنین کاهش نیروی برشی منتقل شده از خاک به پوشش بتنی باشد. ولی در بررسی دانه‌ای ماسه‌ای (sp) تاثیر قابل توجهی مشاهده نمی‌شود که البته برای حصول اطمینان نیاز به مدل‌سازی تعداد بیشتری از انواع این نوع خاک است که به دلیل مدت زمان بالای اجرای مدل‌های دینامیکی فعلاً این موضوع بطور قطعی قابل استنباط نیست.

۳-۷-۴- نیروی برشی

بطور مشابه اگر خاک‌ها را به دو دسته درشت دانه شنی و دانه‌ای ماسه‌ای تقسیم کنیم، برای درشت دانه شنی بخش زیادی از نیروی برشی وارد شده به خاک، قبل از انتقال به پوشش بتنی صرف متراکم کردن خاک شده ولی برای خاک‌های دانه‌ای ماسه‌ای به دلیل کم بودن این فضای خالی نیروی برشی بیشتری به پوشش بتنی منتقل شده و این موضوع در نمودار به روشنی مشاهده می‌شود.

۳-۸- بررسی پارامترهای پوشش بتنی

۳-۸-۱- مقدمه

در این پژوهش علاوه بر بررسی تاثیر پارامترهای خاک درون گیر بر پاسخ لرزه‌ای پوشش بتنی، پارامترهای مربوط به پوشش بتنی مانند ضخامت و تعداد قطعات بتنی تشکیل دهنده آنها نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

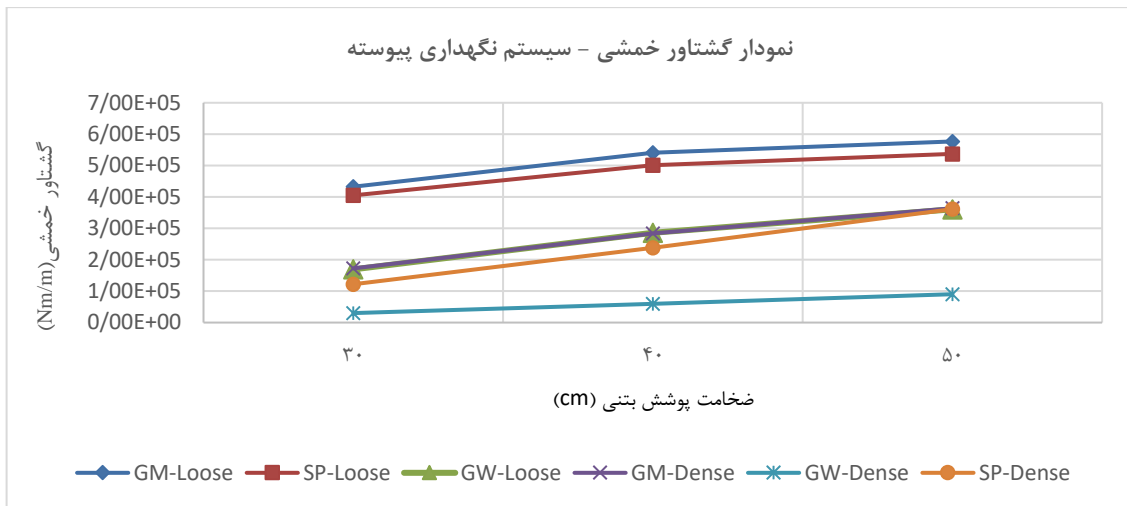
۳-۸-۲- ضخامت سیستم نگهداری

در مدل‌های اجرا شده در پژوهش ضخامت سیستم نگهداری ۰/۳، ۰/۴ و ۰/۵ متر تغییر یافته و نتایج حاصل استخراج گردیده است. در شکل (۳-۲۴)، شکل (۳-۲۵) و شکل (۳-۲۶) مقادیر گشتاور خمشی، نیروی محوری و تنش برشی به ترتیب افزایش ضخامت سیستم نگهداری و برای انواع خاک‌های مختلف در حالت سیستم نگهداری پیوسته آمده است. مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی بیشینه، نیروی محوری بیشینه و نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل برای مدل‌سازی عددی و برای ضخامت‌های مختلف پوشش بتنی نیز در جدول (۳-۶) آمده است.

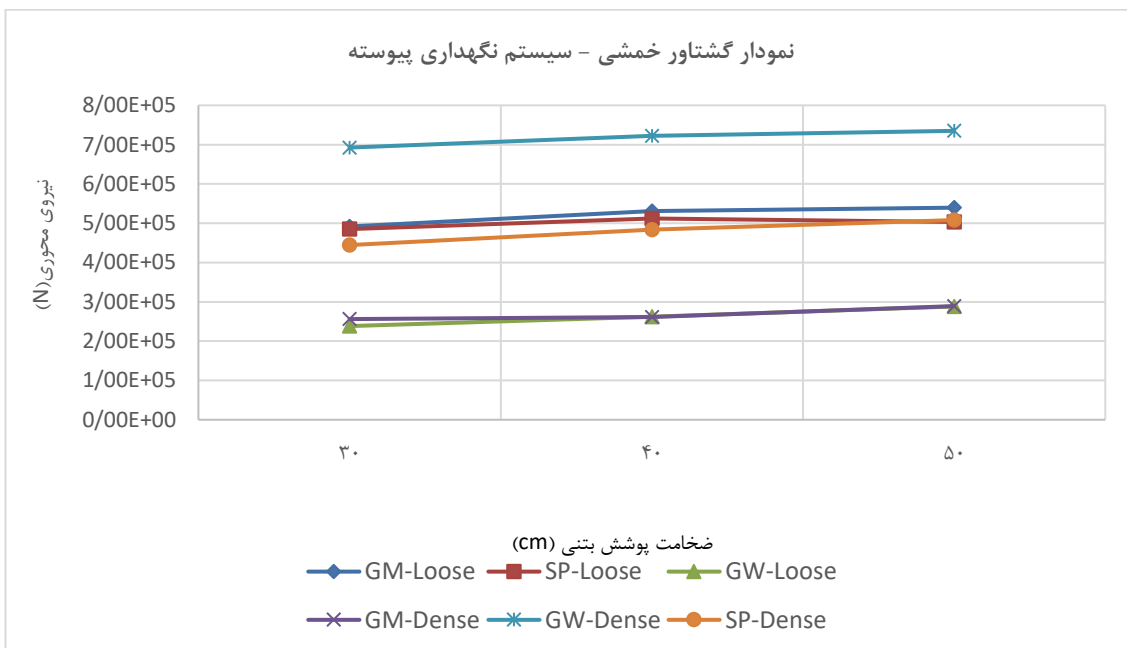
جدول (۳-۶) مقادیر نتایج بدست آمده برای گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی بیشینه در محیط‌های مختلف دربرگیرنده تونل برای پوشش بتنی پیوسته ($n = 1$)

پارامتر	GM-Dense	SP-Dense	GW-Dense	GM-Loose	SP-Loose	GW-Loose
مدول الاستیسیته	8×10^7	3×10^7	3×10^7	7×10^6	1×10^7	3×10^7
زاویه اصطکاک داخلی ($^\circ$)	۳۹	۴۰	۳۳	۳۰	۳۰	۳۰
گشتاور خمشی (Nm/m)	$3/02 \times 10^4$	$1/22 \times 10^5$	$1/73 \times 10^5$	$4/33 \times 10^5$	$4/05 \times 10^5$	$1/69 \times 10^5$
نیروی محوری (N)	$6/93 \times 10^5$	$4/44 \times 10^5$	$2/56 \times 10^5$	$4/92 \times 10^5$	$4/85 \times 10^5$	$2/83 \times 10^5$
نیروی برشی (N)	$1/98 \times 10^5$	$1/96 \times 10^4$	$1/92 \times 10^4$	$7/87 \times 10^3$	$8/44 \times 10^3$	$1/85 \times 10^4$
گشتاور خمشی (Nm/m)	$5/96 \times 10^4$	$2/83 \times 10^5$	$2/84 \times 10^5$	$5/41 \times 10^5$	$5/01 \times 10^5$	$2/86 \times 10^5$
نیروی محوری (N)	$7/22 \times 10^5$	$4/84 \times 10^5$	$2/62 \times 10^5$	$5/31 \times 10^5$	$5/12 \times 10^5$	$2/62 \times 10^5$
نیروی برشی (N)	$2/30 \times 10^4$	$2/20 \times 10^4$	$2/08 \times 10^4$	$1/11 \times 10^4$	$1/35 \times 10^4$	$2/09 \times 10^4$
گشتاور خمشی (Nm/m)	$9/03 \times 10^4$	$3/61 \times 10^5$	$3/64 \times 10^5$	$5/77 \times 10^5$	$5/37 \times 10^5$	$3/61 \times 10^5$
نیروی محوری (N)	$7/35 \times 10^5$	$5/08 \times 10^5$	$2/89 \times 10^5$	$5/40 \times 10^5$	$5/03 \times 10^5$	$2/88 \times 10^5$
نیروی برشی (N)	$2/45 \times 10^4$	$2/23 \times 10^4$	$2/14 \times 10^4$	$1/37 \times 10^4$	$1/86 \times 10^4$	$2/12 \times 10^4$

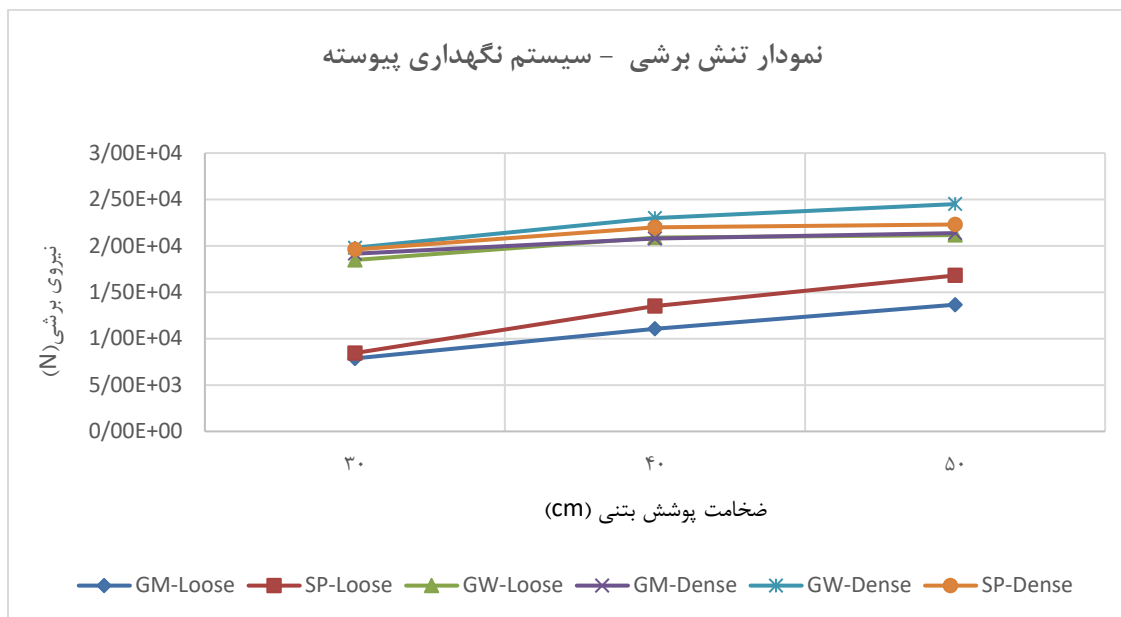
نتایج نشان می‌دهد که با افزایش ضخامت سیستم نگهداری گشتاور خمشی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین به نظر می‌رسد که افزایش ضخامت سیستم نگهداری تغییری در نیروی محوری و نیروی برشی ایجاد نمی‌کند.



شکل (۳-۲۴) نمودار گشتاور خمشی - ضخامت سیستم نگهداری (سیستم نگهداری پیوسته)



شکل (۳-۲۵) نمودار نیروی محوری - ضخامت سیستم نگهداری (سیستم نگهداری پیوسته)



شکل (۳-۲۶) نمودار نیروی برشی - ضخامت سیستم نگهداری (سیستم نگهداری پیوسته)

۳-۸-۳- تعداد قطعات بتنی سیستم نگهداری

به منظور بررسی تاثیر تعداد قطعات بتنی پیش ساخته بر پاسخ لرزه ای سیستم نگهداری، گشتاور خمشی، نیروی محوری و تنش برشی برای حالت های مختلف سیستم نگهداری پیوسته، سیستم نگهداری با تعداد ۳، ۵ و ۷ قطعه بتنی پیش ساخته بدست آمده است. این تحلیل ها همچنین برای انواع مختلفی از خاک های دانه ای و چسبنده انجام و نتایج حاصل از آن استخراج شده است. به طور کلی با افزایش تعداد قطعات بتنی در انواع مختلف خاک، مقادیر گشتاور خمشی، نیروی محوری و تنش برشی در سیستم نگهداری کاهش می یابد. مقادیر بیشینه گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی برای تعداد مختلف قطعات بتنی و ضخامت های متفاوت پوشش بتنی به ترتیب در جدول (۳-۷) جدول (۳-۸) و جدول (۳-۹) نشان داده شده است. همچنین نمودارهای مربوط به این نتایج در شکل (۳-۲۷) شکل (۳-۵۹) آمده است.

جدول (۷-۳) مقادیر بیشینه گشتاور خمشی برای تعداد مختلف قطعات بتنی و ضخامت‌های متفاوت پوشش بتنی

CL-Dense	CH-Dense	SP-Loose	GW-Loose	GM-Dense	SP-Dense	GW-Dense	**n	*t
۱/۱۵×۱.۰ ^۵	۱/۹۷×۱.۰ ^۵	۴/۰۵×۱.۰ ^۵	۱/۶۹×۱.۰ ^۵	۱/۷۳×۱.۰ ^۵	۱/۲۲×۱.۰ ^۵	۳/۰۲×۱.۰ ^۴	۱	
۱/۴۹×۱.۰ ^۵	۱/۵۱×۱.۰ ^۵	۱/۹۲×۱.۰ ^۵	۱/۸۶×۱.۰ ^۵	۱/۸۵×۱.۰ ^۵	۱/۲۶×۱.۰ ^۵	۱/۲۳×۱.۰ ^۵	۳	۳۰
۱/۴۸×۱.۰ ^۵	۹/۴۶×۱.۰ ^۴	۱/۰۶×۱.۰ ^۵	۱/۰۹×۱.۰ ^۵	۱/۱۳×۱.۰ ^۵	۱/۲۲×۱.۰ ^۵	۱/۱۶×۱.۰ ^۵	۵	
۴/۲۸×۱.۰ ^۴	۵/۲۳×۱.۰ ^۴	۵/۶۵×۱.۰ ^۴	۳/۷۶×۱.۰ ^۴	۳/۹۲×۱.۰ ^۴	۴/۳۲×۱.۰ ^۴	۴/۰۵×۱.۰ ^۴	۷	
۲/۳۳×۱.۰ ^۵	۳/۲۷×۱.۰ ^۵	۵/۰۱×۱.۰ ^۵	۲/۸۶×۱.۰ ^۵	۲/۸۴×۱.۰ ^۵	۲/۳۸×۱.۰ ^۵	۵/۹۶×۱.۰ ^۴	۱	
۲/۹۳×۱.۰ ^۵	۲/۳۲×۱.۰ ^۵	۲/۴۱×۱.۰ ^۵	۳/۳۶×۱.۰ ^۵	۳/۳۵×۱.۰ ^۵	۲/۳۶×۱.۰ ^۵	۲/۲۰×۱.۰ ^۵	۳	۴۰
۲/۷۳×۱.۰ ^۵	۱/۲۵×۱.۰ ^۵	۱/۰۷×۱.۰ ^۵	۱/۴۱×۱.۰ ^۵	۱/۴۸×۱.۰ ^۵	۲/۷۷×۱.۰ ^۵	۱/۵۱×۱.۰ ^۵	۵	
۴/۷۸×۱.۰ ^۴	۶/۳۷×۱.۰ ^۴	۵/۹۴×۱.۰ ^۴	۴/۴۴×۱.۰ ^۴	۴/۵۷×۱.۰ ^۴	۵/۶۶×۱.۰ ^۴	۴/۷۸×۱.۰ ^۴	۷	
۳/۶۵×۱.۰ ^۵	۴/۲۶×۱.۰ ^۵	۵/۸۷×۱.۰ ^۵	۳/۶۱×۱.۰ ^۵	۳/۶۱×۱.۰ ^۵	۳/۶۱×۱.۰ ^۵	۹/۰۳×۱.۰ ^۴	۱	
۴/۶۹×۱.۰ ^۵	۲/۹۰×۱.۰ ^۵	۲/۴۰×۱.۰ ^۵	۴/۷۳×۱.۰ ^۵	۴/۷۲×۱.۰ ^۵	۳/۸۲×۱.۰ ^۵	۲/۸۶×۱.۰ ^۵	۳	۵۰
۳/۸۷×۱.۰ ^۵	۱/۴۳×۱.۰ ^۵	۱/۰۸×۱.۰ ^۵	۱/۶۵×۱.۰ ^۵	۱/۴۶×۱.۰ ^۵	۳/۲۲×۱.۰ ^۵	۱/۶۴×۱.۰ ^۵	۵	
۶/۲۹×۱.۰ ^۴	۶/۳۷×۱.۰ ^۴	۶/۱۶×۱.۰ ^۴	۴/۶۵×۱.۰ ^۴	۴/۴۳×۱.۰ ^۴	۶/۳۷×۱.۰ ^۴	۴/۶۵×۱.۰ ^۴	۷	

ضخامت پوشش بتنی (cm) *تعداد قطعات بتنی

جدول (۸-۳) مقادیر بیشینه نیروی محوری برای تعداد مختلف قطعات بتنی و ضخامت‌های متفاوت پوشش بتنی

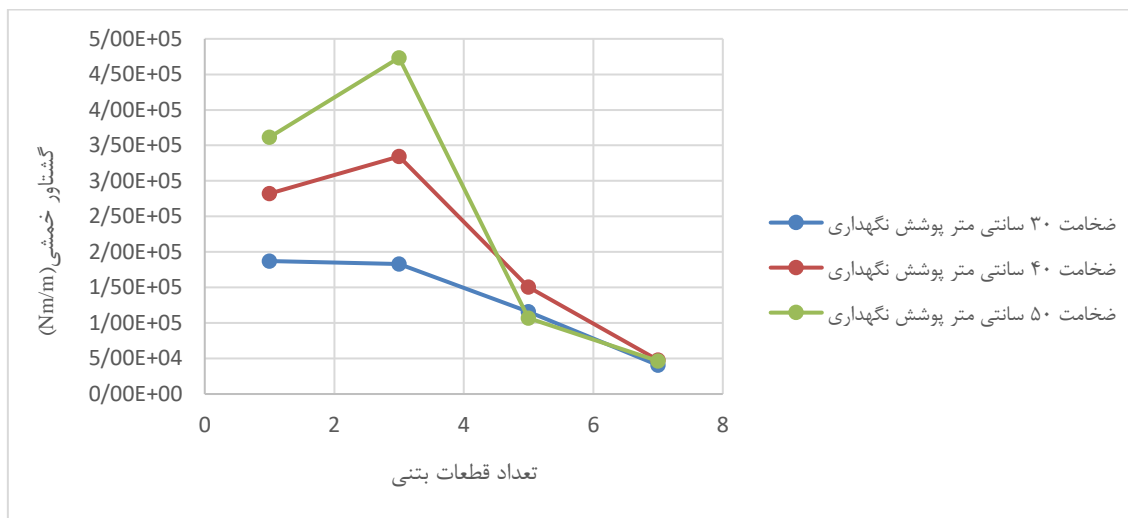
CL-Dense	CH-Dense	SP-Loose	GW-Loose	GM-Dense	SP-Dense	GW-Dense	**n	*t
۷/۲۳×۱.۰ ^۵	۲/۹۸×۱.۰ ^۵	۴/۸۵×۱.۰ ^۵	۲/۳۸×۱.۰ ^۵	۲/۵۶×۱.۰ ^۵	۴/۴۴×۱.۰ ^۵	۶/۹۳×۱.۰ ^۵	۱	
۴/۱۸×۱.۰ ^۵	۲/۳۵×۱.۰ ^۵	۳/۰۲×۱.۰ ^۵	۳/۳۱×۱.۰ ^۵	۳/۲۲×۱.۰ ^۵	۳/۳۹×۱.۰ ^۵	۳/۱۹×۱.۰ ^۵	۳	۳۰
۴/۱۹×۱.۰ ^۵	۲/۳۹×۱.۰ ^۵	۲/۸۲×۱.۰ ^۵	۲/۵۹×۱.۰ ^۵	۲/۵۴×۱.۰ ^۵	۳/۴۶×۱.۰ ^۵	۲/۴۹×۱.۰ ^۵	۵	
۲/۷۸×۱.۰ ^۵	۲/۴۷×۱.۰ ^۵	۲/۹۵×۱.۰ ^۵	۲/۰۱×۱.۰ ^۵	۱/۹۹×۱.۰ ^۵	۲/۸۷×۱.۰ ^۵	۱/۹۸×۱.۰ ^۵	۷	
۷/۷۱×۱.۰ ^۵	۳/۰۲×۱.۰ ^۵	۵/۱۲×۱.۰ ^۵	۲/۶۲×۱.۰ ^۵	۲/۶۲×۱.۰ ^۵	۴/۸۴×۱.۰ ^۵	۷/۲۲×۱.۰ ^۵	۱	
۵/۱۹×۱.۰ ^۵	۲/۶۱×۱.۰ ^۵	۲/۸۹×۱.۰ ^۵	۳/۶۸×۱.۰ ^۵	۳/۷۵×۱.۰ ^۵	۴/۱۲×۱.۰ ^۵	۳/۷۷×۱.۰ ^۵	۳	۴۰
۴/۹۷×۱.۰ ^۵	۲/۴۸×۱.۰ ^۵	۲/۷۵×۱.۰ ^۵	۲/۵۴×۱.۰ ^۵	۲/۵۴×۱.۰ ^۵	۳/۹۹×۱.۰ ^۵	۲/۵۳×۱.۰ ^۵	۵	
۱/۹۸×۱.۰ ^۵	۲/۱۲×۱.۰ ^۵	۲/۹۲×۱.۰ ^۵	۱/۹۸×۱.۰ ^۵	۱/۹۸×۱.۰ ^۵	۲/۹۰×۱.۰ ^۵	۱/۹۸×۱.۰ ^۵	۷	
۷/۳۹×۱.۰ ^۵	۳/۳۷×۱.۰ ^۵	۵/۰۳×۱.۰ ^۵	۲/۸۸×۱.۰ ^۵	۲/۸۷×۱.۰ ^۵	۵/۰۸×۱.۰ ^۵	۷/۳۵×۱.۰ ^۵	۱	
۶/۰۰×۱.۰ ^۵	۲/۸۱×۱.۰ ^۵	۲/۸۴×۱.۰ ^۵	۴/۰۷×۱.۰ ^۵	۴/۰۴×۱.۰ ^۵	۴/۷۵×۱.۰ ^۵	۴/۰۷×۱.۰ ^۵	۳	۵۰
۵/۳۲×۱.۰ ^۵	۲/۵۵×۱.۰ ^۵	۲/۶۹×۱.۰ ^۵	۲/۵۳×۱.۰ ^۵	۲/۵۸×۱.۰ ^۵	۴/۲۱×۱.۰ ^۵	۲/۵۳×۱.۰ ^۵	۵	
۲/۷۳×۱.۰ ^۵	۲/۵۱×۱.۰ ^۵	۲/۹۱×۱.۰ ^۵	۱/۹۹×۱.۰ ^۵	۱/۹۴×۱.۰ ^۵	۲/۸۱×۱.۰ ^۵	۱/۹۹×۱.۰ ^۵	۷	

ضخامت پوشش بتنی (cm) *تعداد قطعات بتنی

جدول (۳-۹) مقادیر بیشینه نیروی برشی برای تعداد مختلف قطعات بتنی و ضخامت‌های متفاوت پوشش بتنی

<i>CL-Dense</i>	<i>CH-Dense</i>	<i>SP-Loose</i>	<i>GW-Loose</i>	<i>GM-Dense</i>	<i>SP-Dense</i>	<i>GW-Dense</i>	**n	*t
۳/۵۴×۱۰ ^۵	۶/۹۳×۱۰ ^۱	۸/۴۴×۱۰ ^۳	۱/۸۵×۱۰ ^۴	۱/۹۲×۱۰ ^۴	۸/۲۵×۱۰ ^۴	۱/۱۵×۱۰ ^۵	۱	۳۰
۲/۶۲×۱۰ ^۴	۸/۹۶×۱۰ ^۳	۱/۰۸×۱۰ ^۴	۳/۰۲×۱۰ ^۴	۳/۰۹×۱۰ ^۴	۲/۶۵×۱۰ ^۴	۳/۱۱×۱۰ ^۴	۳	
۲/۶۵×۱۰ ^۴	۴/۳۳×۱۰ ^۳	۳/۹۴×۱۰ ^۳	۲/۴۰×۱۰ ^۴	۲/۴۳×۱۰ ^۴	۲/۶۰×۱۰ ^۴	۲/۵۰×۱۰ ^۴	۵	
۲/۸۵×۱۰ ^۴	۹/۳۴×۱۰ ^۳	۱/۰۲×۱۰ ^۴	۱/۸۹×۱۰ ^۴	۱/۹۷×۱۰ ^۴	۲/۸۹×۱۰ ^۴	۲/۰۷×۱۰ ^۴	۷	
۴/۱۵×۱۰ ^۵	۱/۱۰×۱۰ ^۲	۱/۳۵×۱۰ ^۴	۲/۰۹×۱۰ ^۴	۲/۰۷×۱۰ ^۴	۶/۴۹×۱۰ ^۴	۹/۸۶×۱۰ ^۴	۱	۴۰
۴/۳۴×۱۰ ^۴	۱/۵۶×۱۰ ^۴	۱/۳۷×۱۰ ^۴	۴/۰۸×۱۰ ^۴	۴/۰۷×۱۰ ^۴	۴/۰۷×۱۰ ^۴	۴/۰۷×۱۰ ^۴	۳	
۴/۱۴×۱۰ ^۴	۵/۴۹×۱۰ ^۳	۳/۹۸×۱۰ ^۳	۲/۷۱×۱۰ ^۴	۲/۷۷×۱۰ ^۴	۳/۹۰×۱۰ ^۴	۲/۸۹×۱۰ ^۴	۵	
۲/۲۵×۱۰ ^۴	۱/۱۵×۱۰ ^۴	۱/۰۲×۱۰ ^۴	۲/۰۳×۱۰ ^۴	۲/۱۳×۱۰ ^۴	۳/۵۷×۱۰ ^۴	۲/۲۵×۱۰ ^۴	۷	
۳/۷۵×۱۰ ^۵	۱/۰۴×۱۰ ^۲	۱/۶۸×۱۰ ^۴	۲/۱۲×۱۰ ^۴	۲/۱۵×۱۰ ^۴	۳/۴۹×۱۰ ^۴	۵/۳۶×۱۰ ^۴	۱	۵۰
۵/۵۵×۱۰ ^۴	۳/۱۰×۱۰ ^۴	۱/۵۵×۱۰ ^۴	۴/۶۶×۱۰ ^۴	۴/۶۵×۱۰ ^۴	۵/۰۳×۱۰ ^۴	۴/۶۶×۱۰ ^۴	۳	
۵/۰۴×۱۰ ^۴	۶/۰۰×۱۰ ^۳	۳/۹۶×۱۰ ^۳	۲/۷۶×۱۰ ^۴	۲/۹۸×۱۰ ^۴	۴/۵۷×۱۰ ^۴	۲/۷۶×۱۰ ^۴	۵	
۳/۶۷×۱۰ ^۴	۱/۱۹×۱۰ ^۴	۱/۱۵×۱۰ ^۴	۲/۰۴×۱۰ ^۴	۲/۰۷×۱۰ ^۴	۳/۸۶×۱۰ ^۴	۲/۰۴×۱۰ ^۴	۷	

**ضخامت پوشش بتنی (cm) **تعداد قطعات بتنی



شکل (۳-۲۷) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW متراکم



شکل (۳-۲۸) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW متراکم

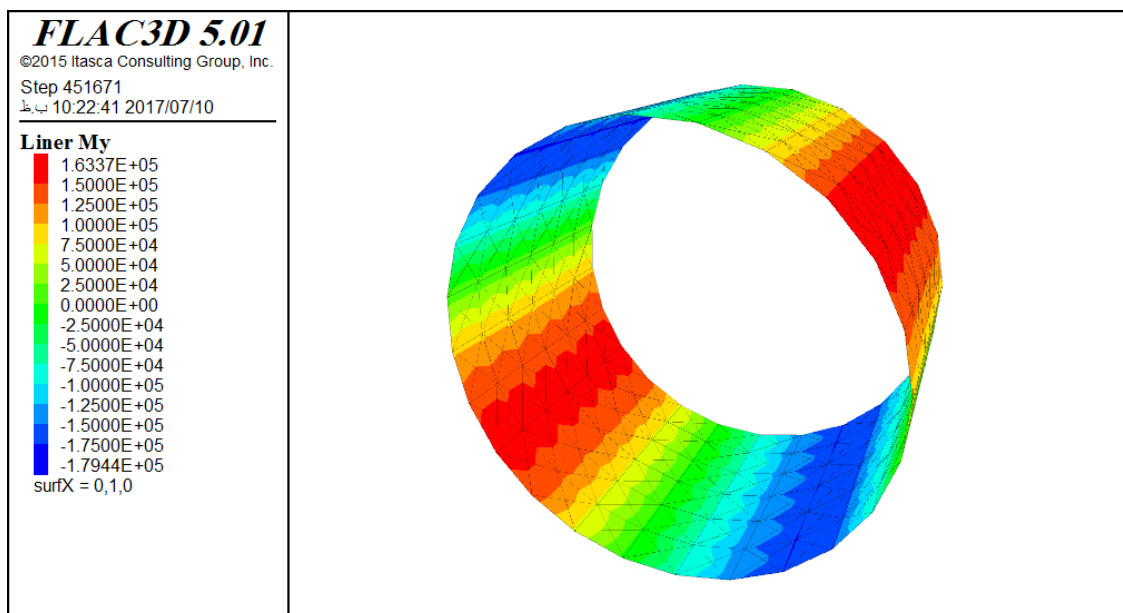


شکل (۳-۲۹) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW متراکم

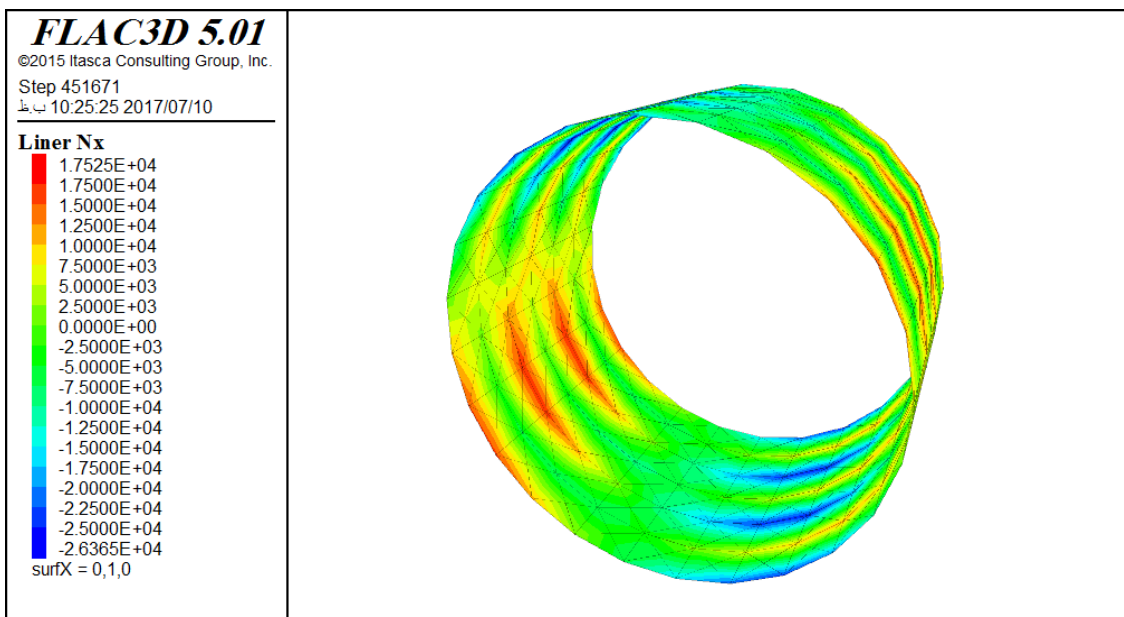
در شکل‌های شکل (۳-۳۰) تا شکل (۳-۴۱) کنتور گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی محوری در پوشش بتنی پیوسته و پوشش‌های بتنی با سه، پنج و هفت قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر و

برای نمونه خاک GW متراکم آورده شده است. این نمودارها همچنین برای پوشش بتنی با ضخامت ۴۰ و ۵۰ سانتی متر و برای بقیه انواع خاک‌ها نیز وجود دارد، که در بخش پیوست برای نمونه برای خاک‌های GW متراکم و غیر متراکم آورده شده است.

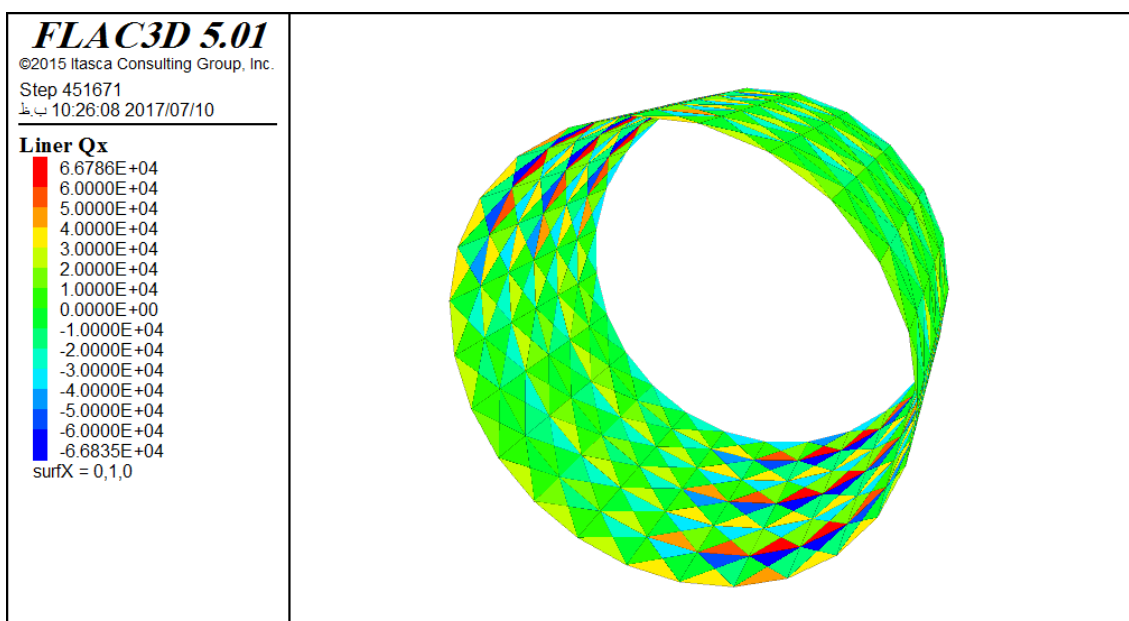
همان گونه که در روش‌های تحلیلی مورد استفاده در پژوهش، نشان داده شده است، بیشترین میزان نیروی برشی و گشتاور خمشی در زاویه ۴۵، ۱۳۵، ۲۲۵ و ۳۱۵ درجه اتفاق می‌افتد. در شکل‌های (۳-۳۰) تا (۳-۴۱) کنتور گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی برای حالت‌های مختلف تعداد قطعات بتنی ارائه شده است که این مقادیر در زاویه‌های گفته شده در بالا اتفاق افتاده است. این شکل‌ها نشان می‌دهد که نتایج عددی از نظر زوایای رخداد، بیشترین مقادیر این پارامترها با نتایج روش‌های تحلیلی همخوانی خوبی دارد.



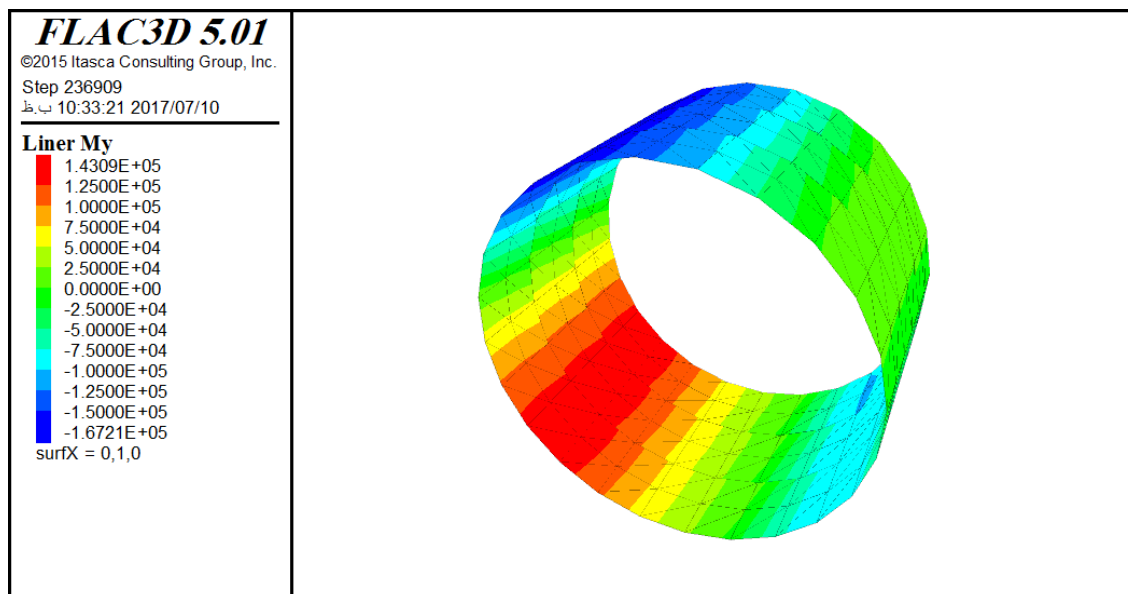
شکل (۳-۳۰) کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای خاک GW متراکم



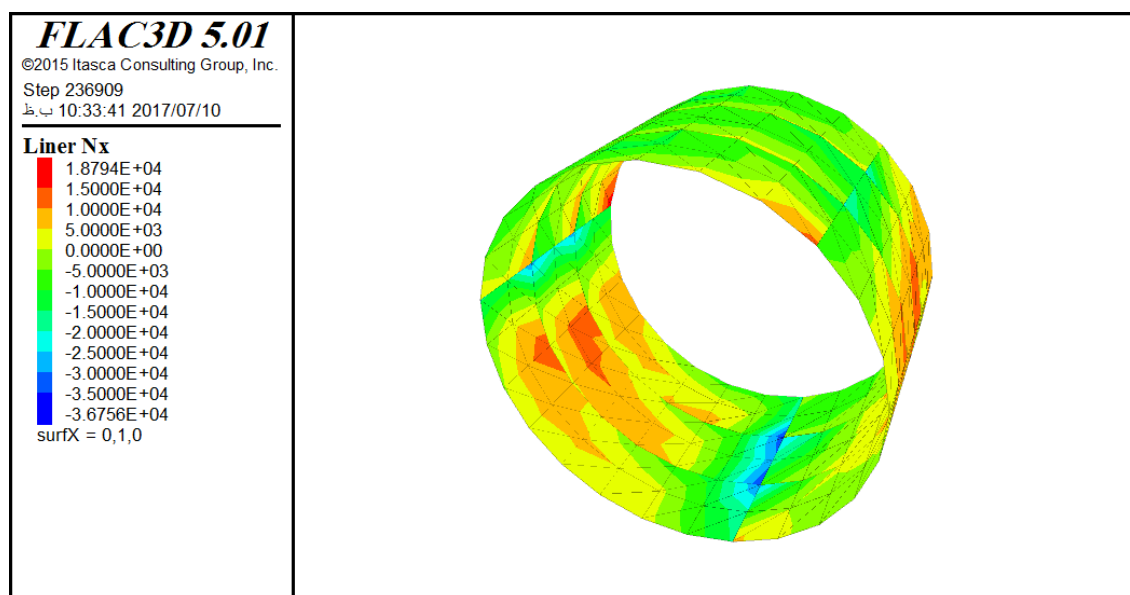
شکل (۳-۳۱) کنتور نیروی محوری پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



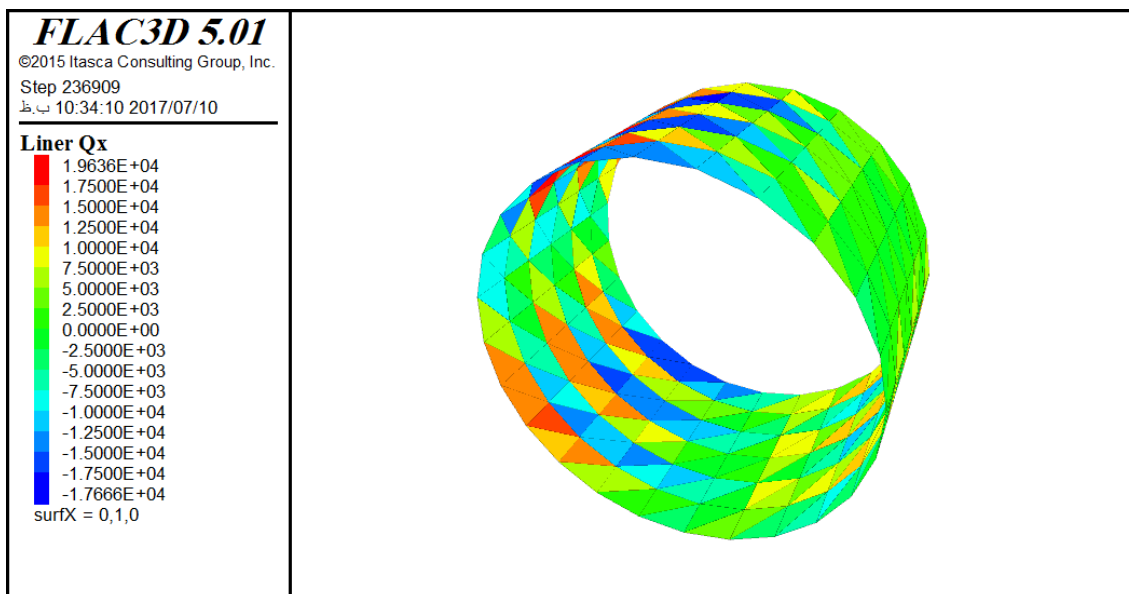
شکل (۳-۳۲) کنتور نیروی برشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



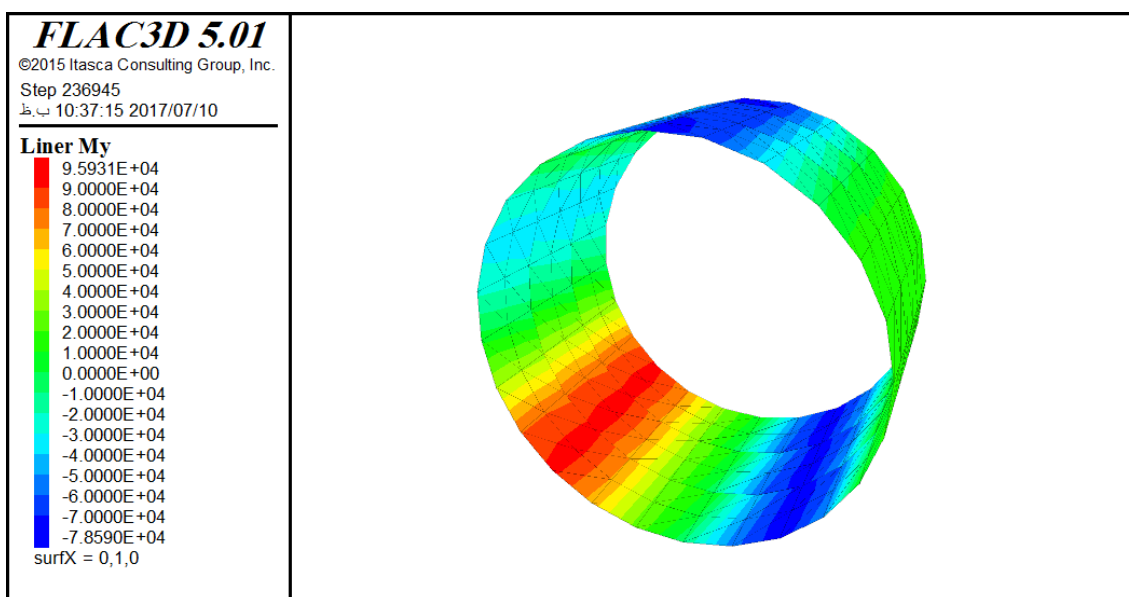
شکل (۳-۳) کنتور گشتاور خمشی پوشش با ۳ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



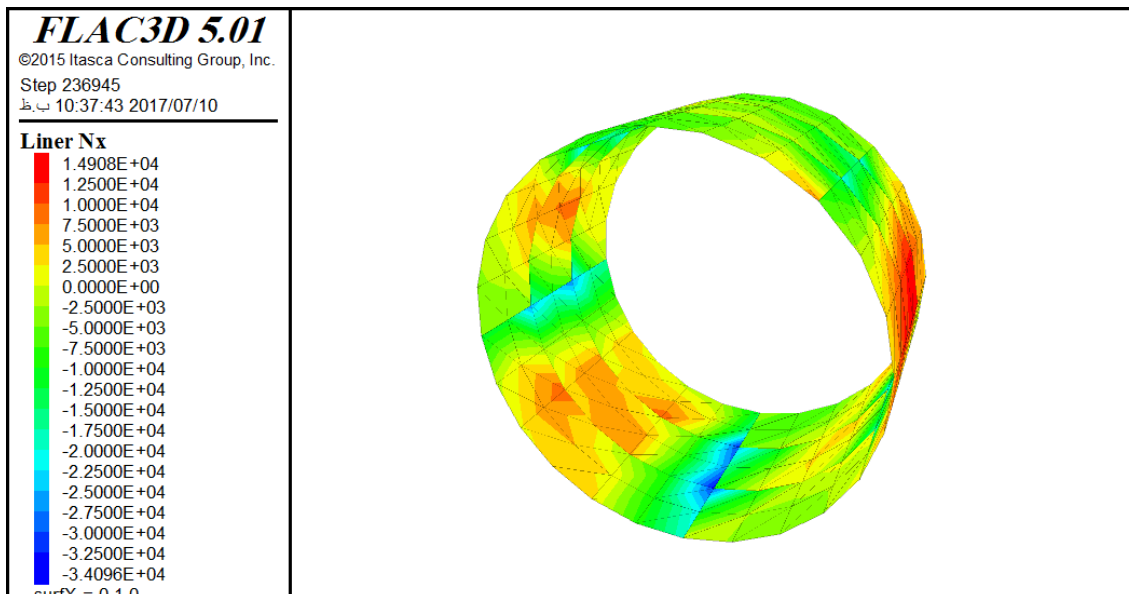
شکل (۳-۳) کنتور نیروی محوری پوشش با ۳ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



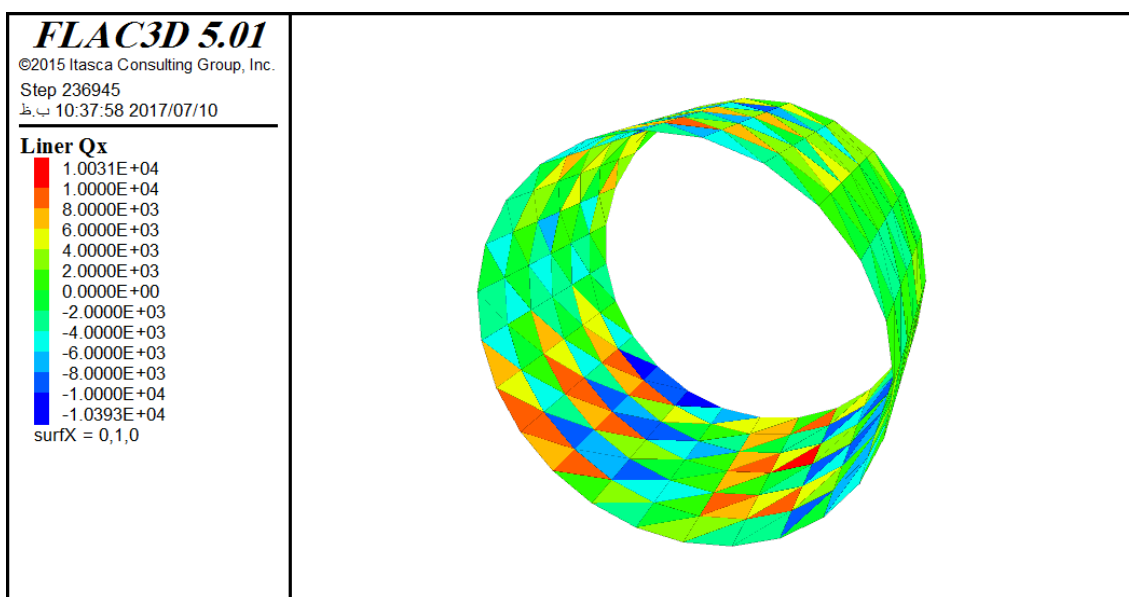
شکل (۳-۳۵) کنتور نیروی برشی پوشش با ۳ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



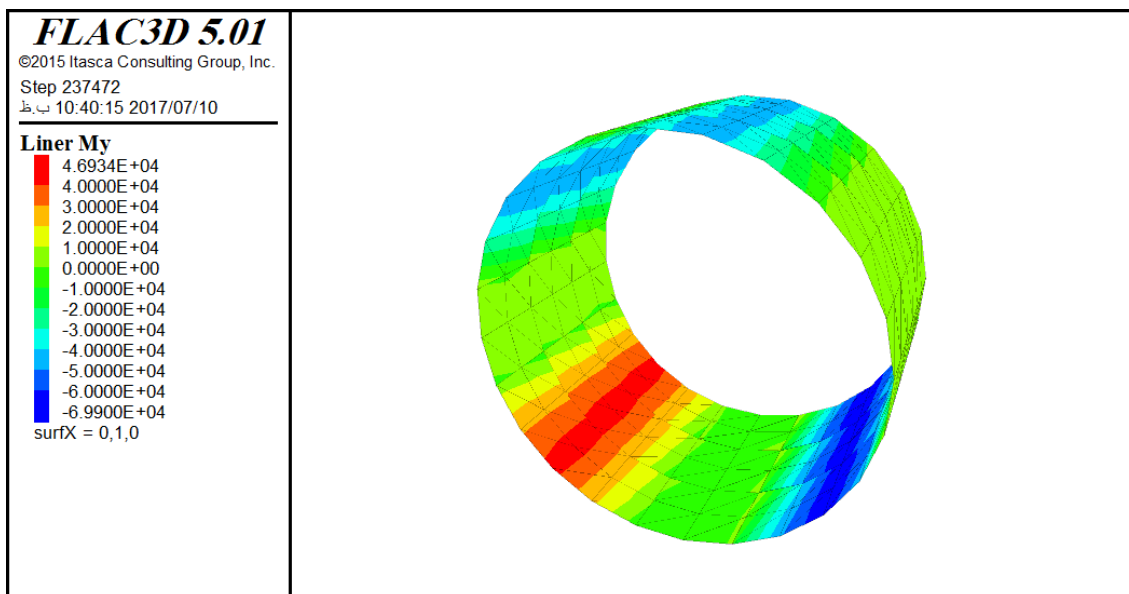
شکل (۳-۳۶) کنتور گشتاور خمشی پوشش با ۵ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



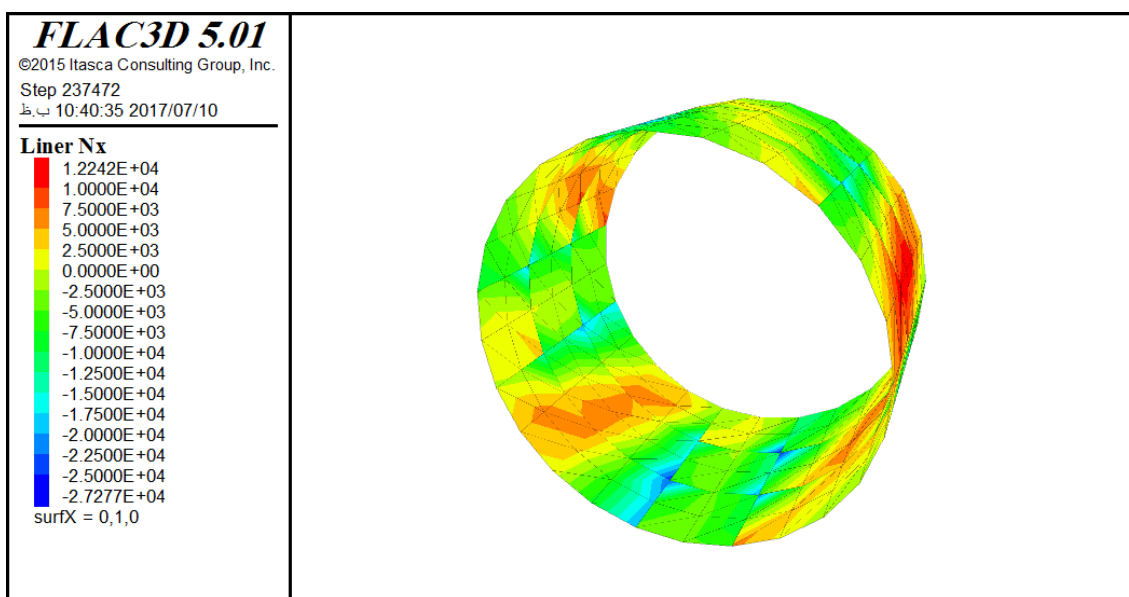
شکل (۳-۳۷) کنتور نیروی محوری پوشش با ۵ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



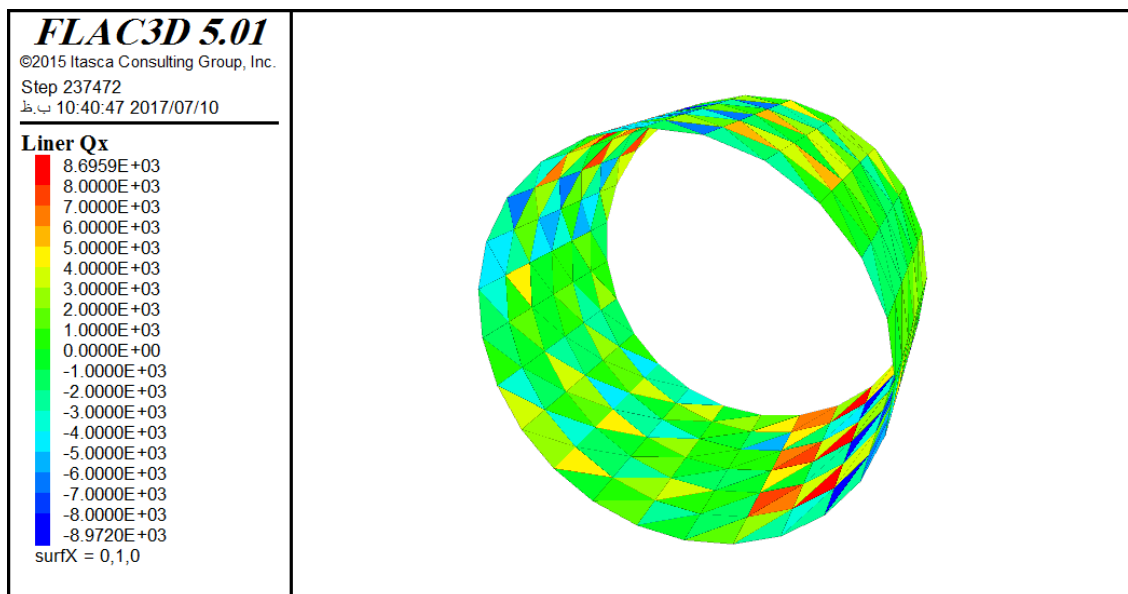
شکل (۳-۳۸) کنتور نیروی برشی پوشش با ۵ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



شکل (۳-۳۹) کنتور گشتاور خمشی پوشش با ۷ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای خاک GW متراکم

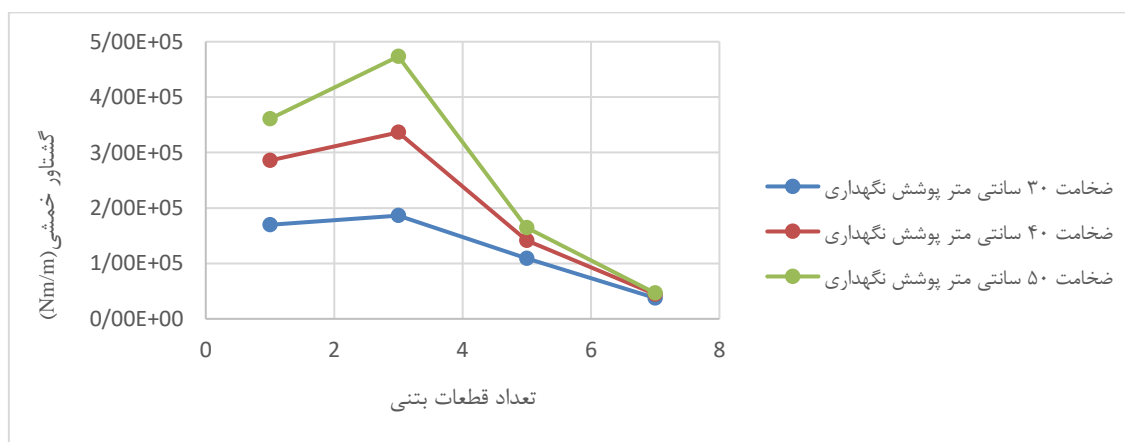


شکل (۳-۴۰) کنتور نیروی محوری پوشش با ۷ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای خاک GW متراکم

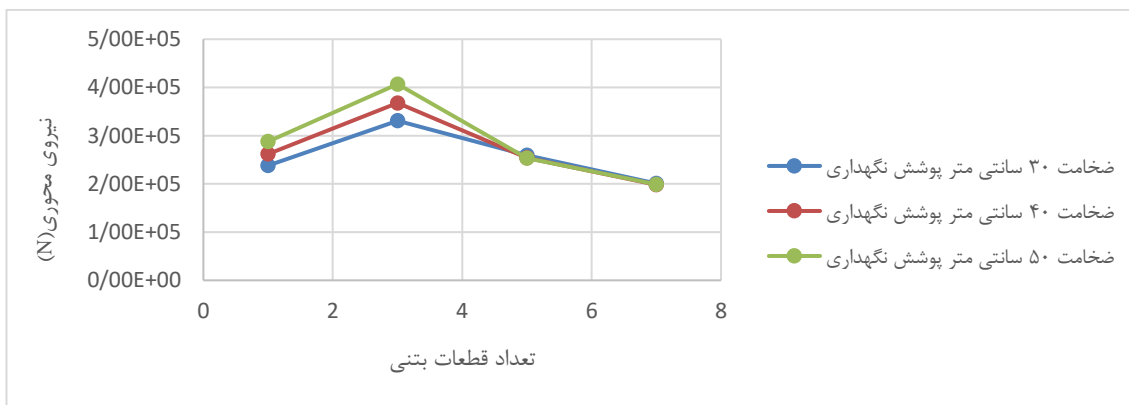


شکل (۳-۴۱) کنترل نیروی برشی پوشش با ۷ قطعه بتنی با ضخامت ۳۰ سانتی متر برای خاک GW متراکم در ادامه نمودار تغییرات گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی بر حسب تعداد قطعات بتنی پوشش نگهداری برای خاک‌های GW غیرمتراکم، SP متراکم، SP غیرمتراکم، GM متراکم، CH متراکم و CL متراکم نیز در شکل‌های (۴-۴۱) تا (۳-۵۹) آمده است.

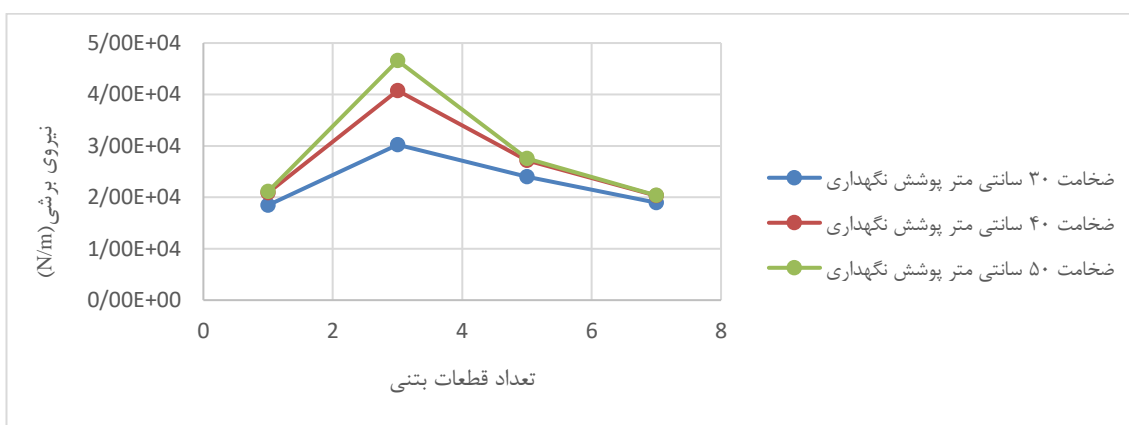
در شکل‌های (۳-۴۲) تا (۳-۵۹) تاثیر تعداد قطعات بتنی بر گشتاور خمشی، نیروی محوری و نیروی برشی در قالب نمودار نشان داده شده است. با توجه به نمودارها می‌توان نتیجه گرفت که مقادیر بیشینه این پارامترها با افزایش تعداد قطعات بتنی کاهش یافته است. دلیل وقوع این موضوع این است که با افزایش تعداد قطعات بتنی، تعداد اتصالات طولی در حلقه بتنی افزایش می‌یابد و با افزایش آن به دلیل جابجایی بیشتر قطعات، مقادیر بیشینه این پارامترها کاهش یافته است.



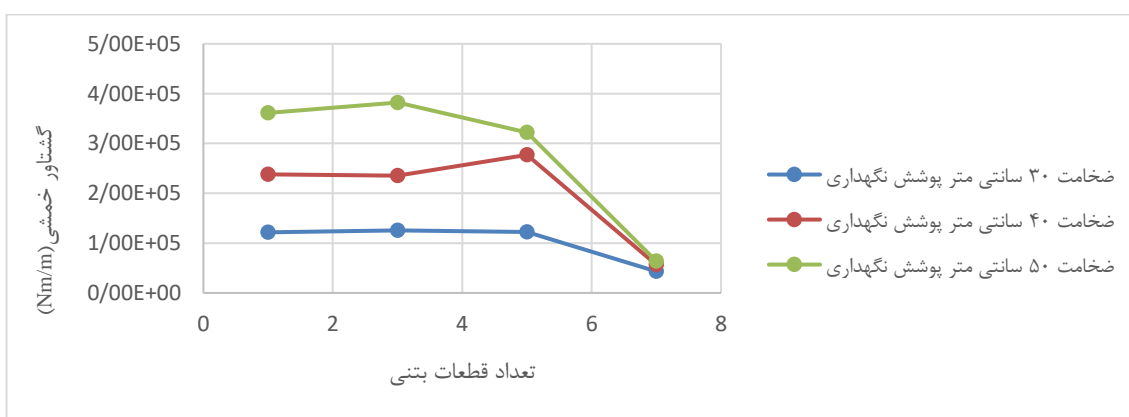
شکل (۳-۴۲) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW غیرمتراکم



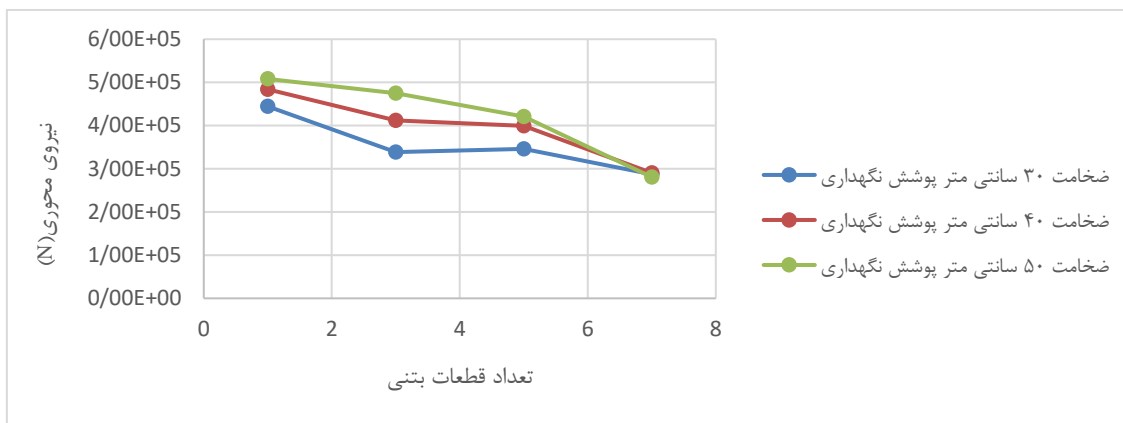
شکل (۳-۴۳) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW غیرمتراکم



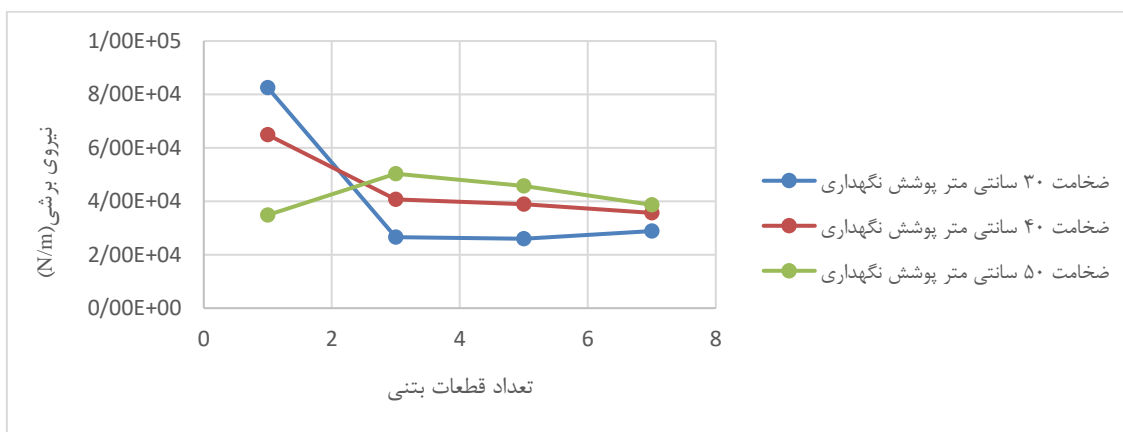
شکل (۳-۴۴) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GW غیر متراکم



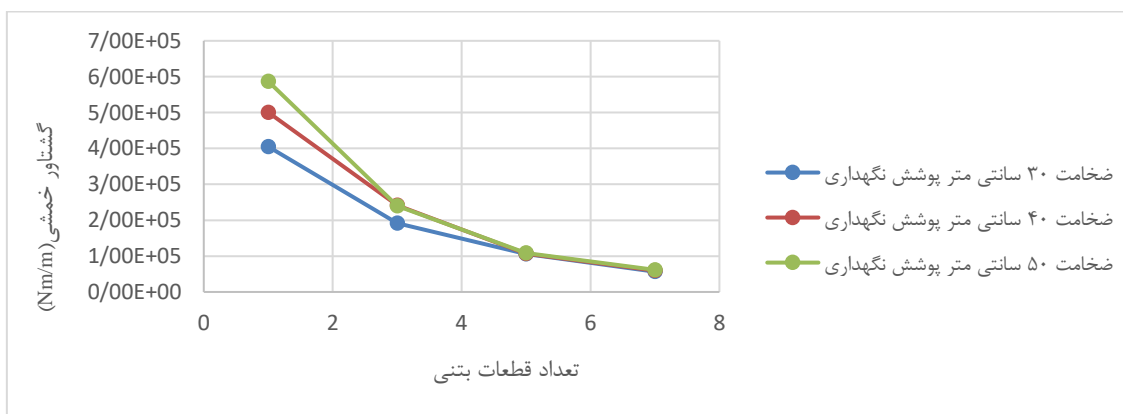
شکل (۳-۴۵) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP متراکم



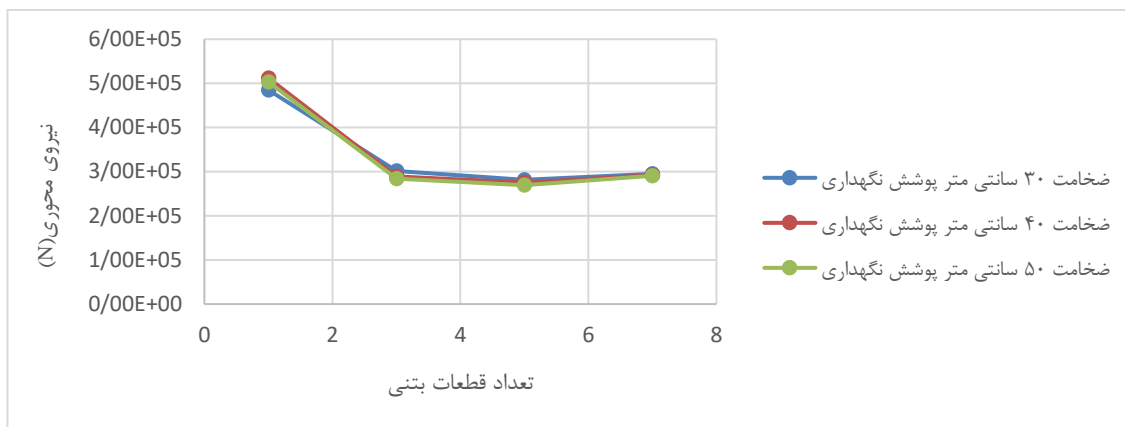
شکل (۳-۴۶) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP متراکم



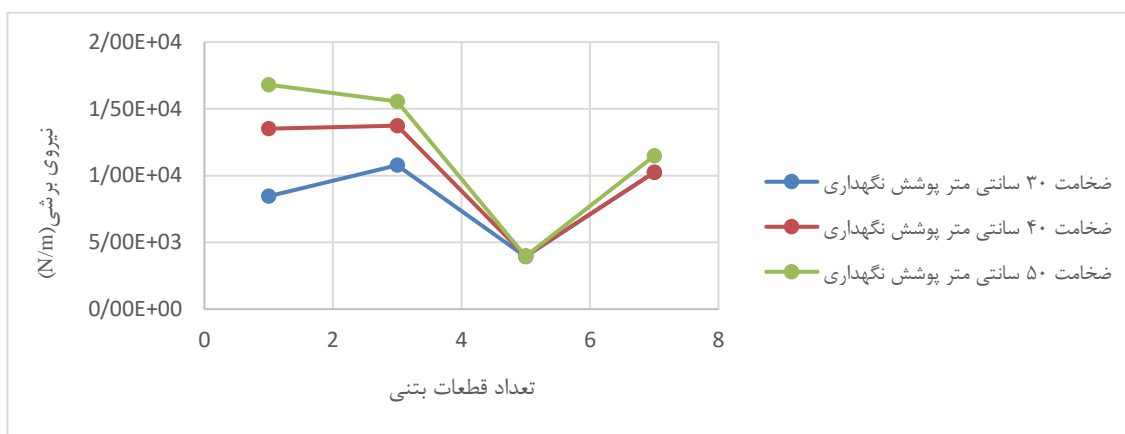
شکل (۳-۴۷) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP متراکم



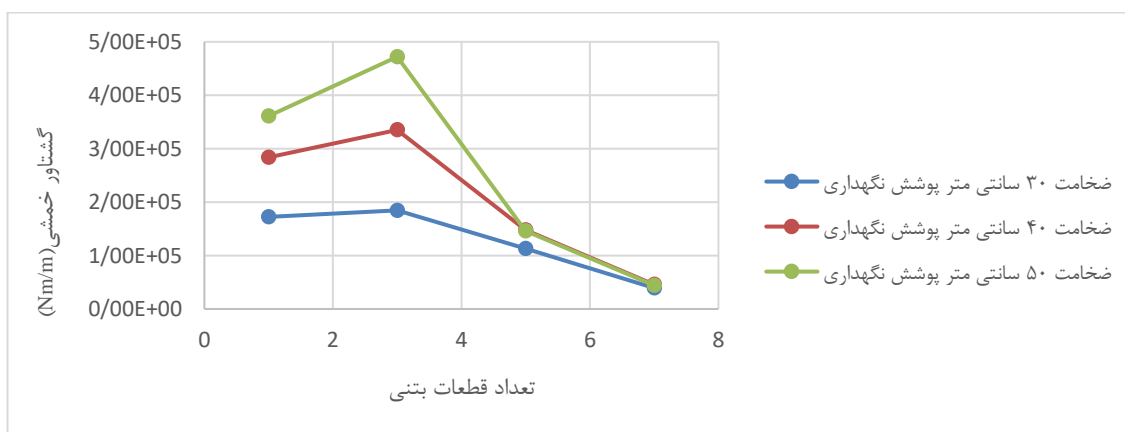
شکل (۳-۴۸) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP غیر متراکم



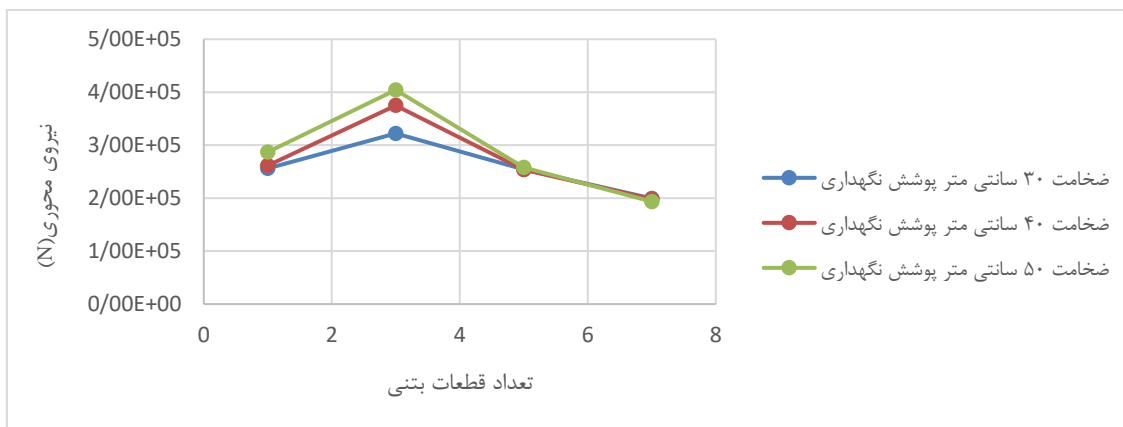
شکل (۳-۴۹) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP غیر متراکم



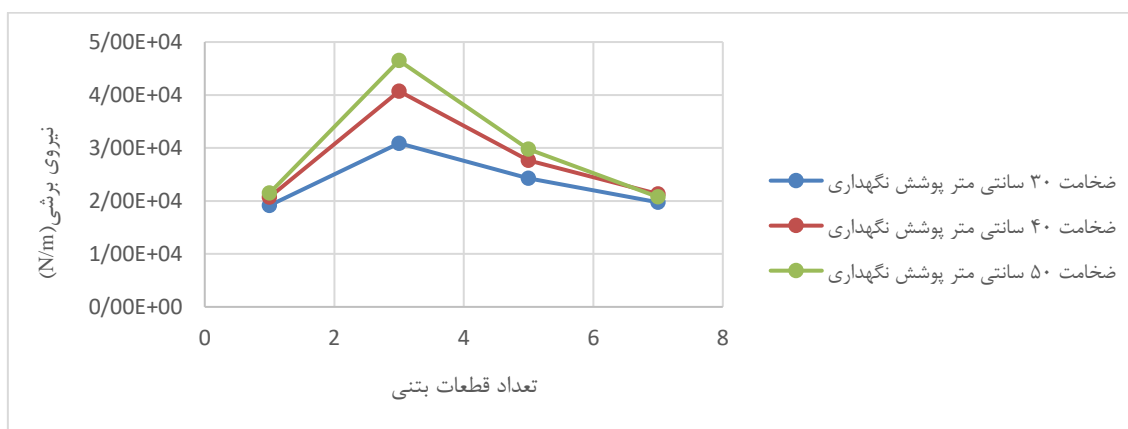
شکل (۳-۵۰) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک SP غیر متراکم



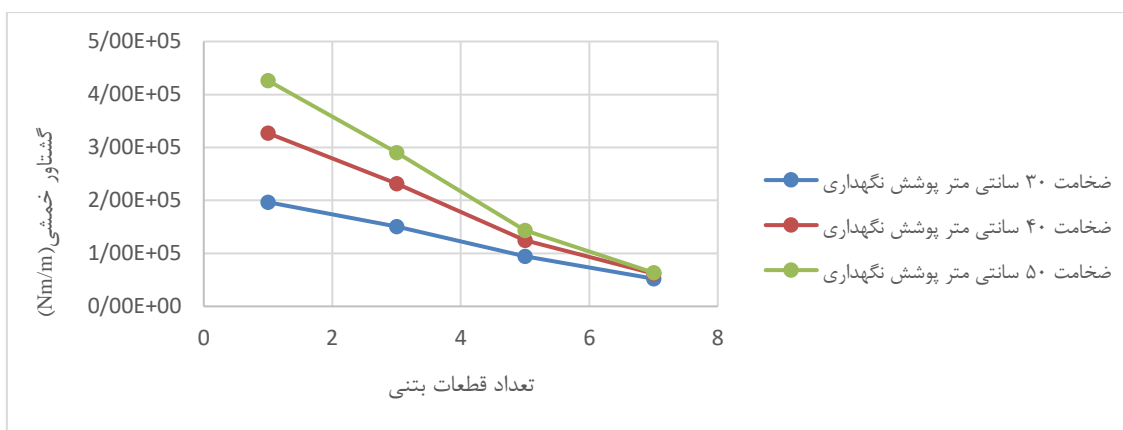
شکل (۳-۵۱) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GM متراکم



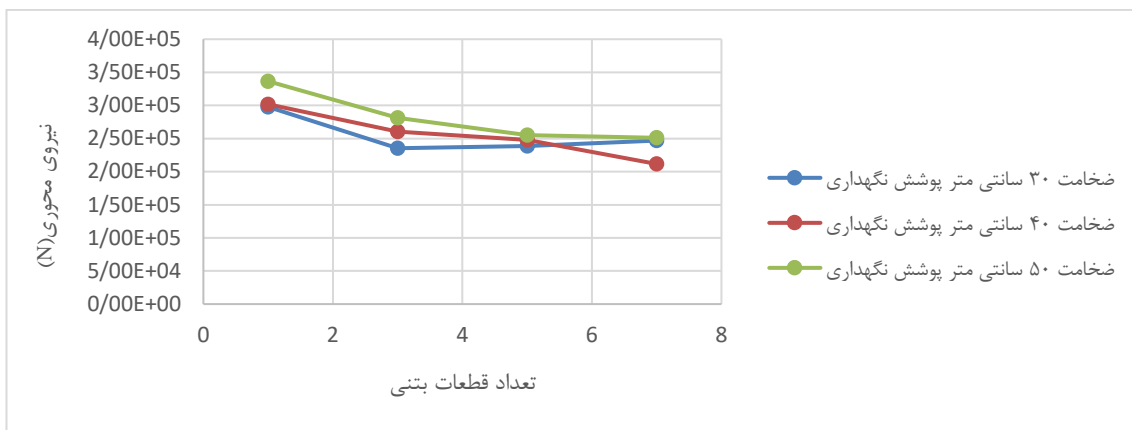
شکل (۳-۵۲) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک GM متراکم



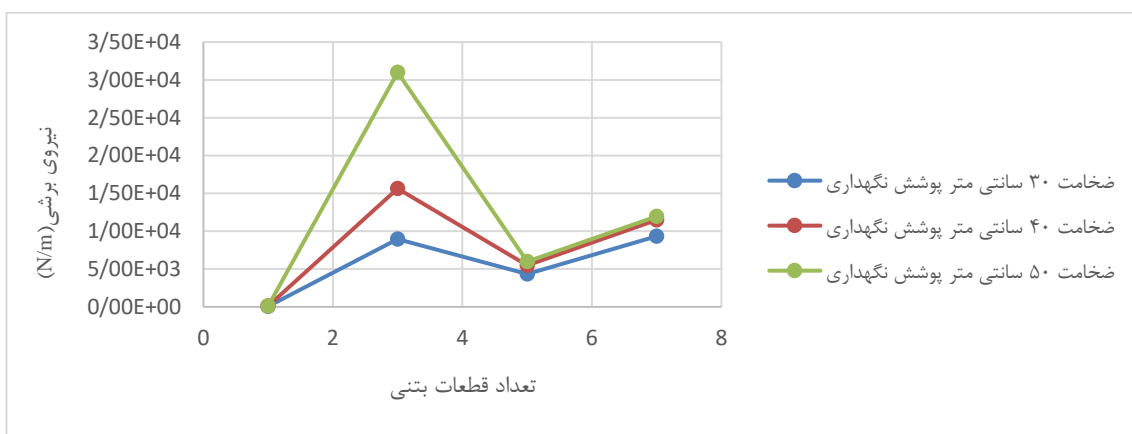
شکل (۳-۵۳) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک GM متراکم



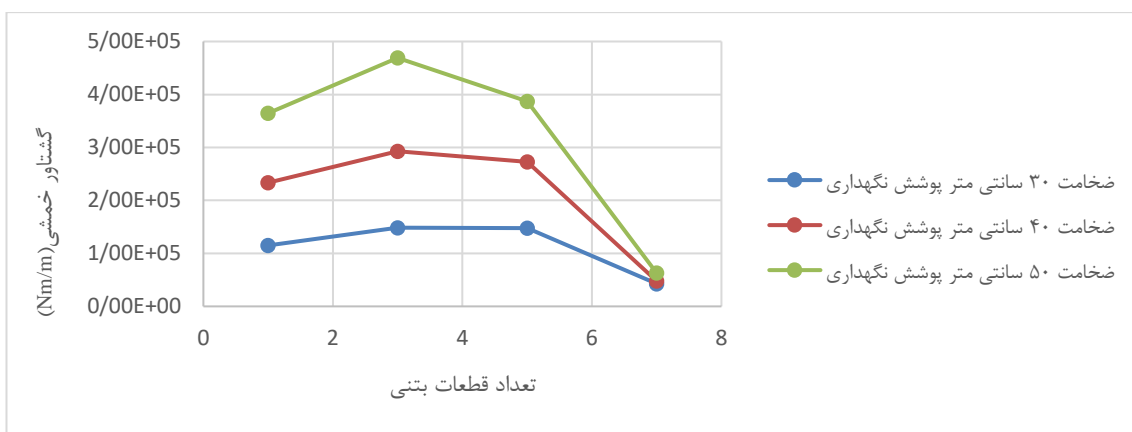
شکل (۳-۵۴) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک CH متراکم



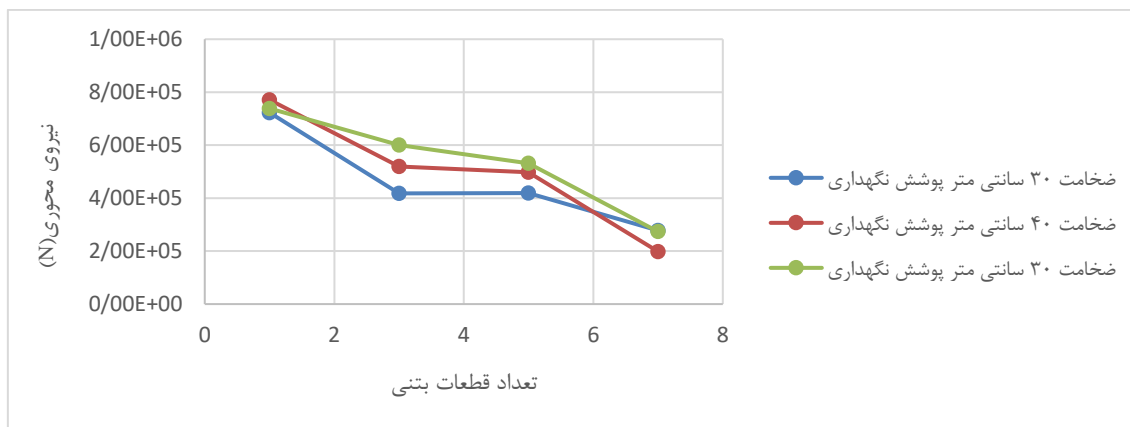
شکل (۳-۵۵) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک CH متراکم



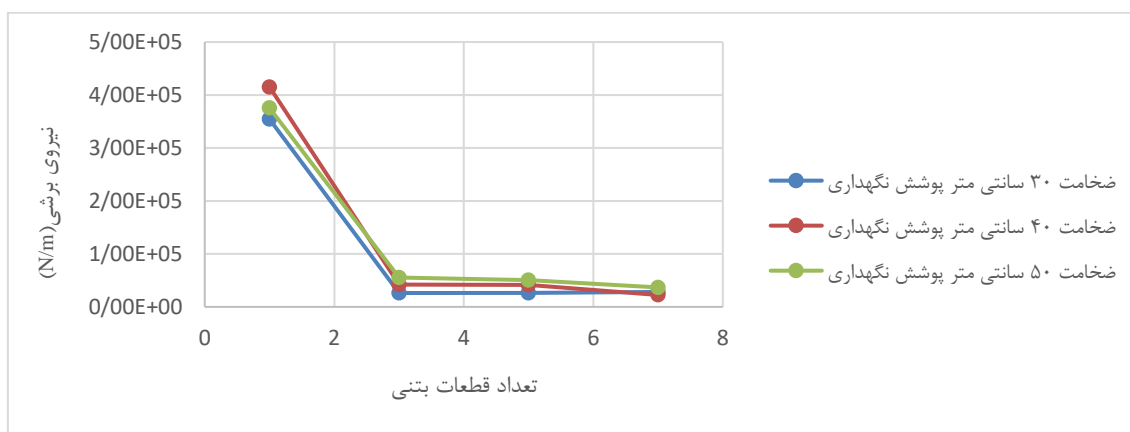
شکل (۳-۵۶) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک CH متراکم



شکل (۳-۵۷) نمودار گشتاور خمشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک CL متراکم



شکل (۳-۵۸) نمودار نیروی محوری - تعداد قطعات بتنی برای خاک CL متراکم



شکل (۳-۵۹) نمودار تنش برشی - تعداد قطعات بتنی برای خاک CL متراکم

۳-۹- جمع بندی

در تحلیل‌های این پژوهش، از انواع خاک‌های درشت دانه‌ای شنی، دانه‌ای ماسه‌ای و ریزدانه استفاده شده است تا نسبتاً بازه کاملی از انواع خاک‌ها در نظر گرفته شده باشد. همچنین به منظور بررسی تاثیر چگالی، از انواع با تراکم بالا و تراکم کم خاک‌ها استفاده شده است. همچنین به منظور بررسی تعداد قطعات بتنی از پوشش بتنی پیوسته، شامل ۳، ۵ و ۷ قطعه استفاده شده است. در نهایت برای انجام تحلیل‌ها و گردآوری نتایج، تاثیر پارامترهای خاک و پوشش بتنی تحلیل شده است.

فصل ۱: جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و پیشنهادات

۱-۱- مقدمه

در این فصل به بررسی و ذکر نتایج حاصل از این پژوهش و همچنین پیشنهادات مربوط به پژوهش-های آینده پرداخته شده است. نتایج حاصل از این پژوهش را می‌توان در قالب دو دسته خلاصه نمود. دسته اول نتایج مربوط به پارامترهای خاک در حالت با پوشش بتنی پیوسته است. این دسته از نتایج با نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی نیز مقایسه گردیده است. دسته دوم نتایج مربوط به پارامترهای پوشش نگهداری از جمله ضخامت و تعداد قطعات بتنی است. این نتایج نیز برای انواع مختلف خاک‌های دانه‌ای و چسبنده با تعداد مختلف قطعات بتنی در پوشش نگهداری انجام گردیده است. در ادامه نتایج این پژوهش ارائه شده است.

۱-۲- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

- ✓ در طراحی پوشش بتنی نگهداری تونل‌ها باید ملزومات اساسی برای پایداری، دوام و هزینه را مد نظر قرار داد. برای دستیابی به این ملزومات طراحی، ابتدا باید نیروهایی را که پوشش بتنی نگهداری تونل در طول عمر بهره‌برداری متحمل می‌شود را تعیین کرد. یکی از مهم‌ترین عواملی که باعث ایجاد نیروهای محوری و برشی و گشتاور خمشی در پوشش نگهداری تونل می‌شود، زمین‌لرزه است. هرچند تونل‌ها نسبت به سازه‌های احداث شده در سطح زمین امنیت بالاتری برخوردار هستند، اما آسیب‌های اخیر به وجود آمده به دلیل زمین‌لرزه‌ها، لحاظ بار دینامیکی در طراحی سازه‌های زیرزمینی را بسیار پررنگ کرده است.
- ✓ به منظور بررسی پاسخ تونل در مقابل بارهای لرزه‌ای ناشی از زمین‌لرزه، می‌توان از روش‌های آماری، روش‌های تجربی، روش‌های تحلیلی و روش‌های عددی استفاده کرد.
- ✓ یکی از محدودیت‌های مهم روش‌های تحلیلی آن است که برای پوشش‌های نگهداری پیوسته توسعه داده شده‌اند. این در حالی است که با استفاده از روش‌های عددی علاوه بر پوشش بتنی پیوسته، پوشش متشکل از تعدادی قطعات بتنی را نیز می‌توان تحلیل و بررسی کرد.
- ✓ در تحلیل‌های دینامیکی که با استفاده از روش‌های عددی انجام می‌شوند، زمان انجام تحلیل به عوامل متعددی وابسته است. از جمله این عوامل می‌توان به اندازه مدل، اندازه مش و قدرت سیستم کامپیوتری مورد استفاده اشاره نمود. به‌طور کلی با افزایش اندازه مدل، مدت

- زمان اجرای مدل و انجام تحلیل افزایش می‌یابد. همچنین با افزایش تعداد مش‌ها (کاش اندازه مش‌ها) مدت زمان اجرای مدل و انجام تحلیل افزایش می‌یابد.
- ✓ روش‌های تحلیلی و فرم بسته با محدودیت‌هایی روبرو هستند که تقریباً در روش‌های عددی با این محدودیت‌ها مواجه نیستند. در روش‌های تحلیلی پوشش نگهداری تونل و خاک درون‌گیر هردو همگن و با رفتار الاستیک خطی در نظر گرفته می‌شوند. تاثیر مراحل حفاری در این روش‌ها در نظر گرفته نمی‌شود و پوشش نگهداری با مقطع دایره و با ضخامت ثابت است.
 - ✓ بطور کلی با افزایش مدول تغییرشکل‌پذیری مقدار نیروی محوری بیشینه کاهش و مقدار نیروی برشی افزایش می‌یابد.
 - ✓ با افزایش مدول تغییرشکل‌پذیری مقدار گشتاور خمشی بیشینه ایجاد شده در پوشش بتنی تونل کاهش می‌یابد.
 - ✓ روش پینزن برای نیروی محوری ایجاد شده در پوشش بتنی تونل مقادیر کمتری نسبت به دو روش ونگ و بوبت و همچنین روش عددی نتیجه می‌دهد.
 - ✓ روش بوبت برای گشتاور خمشی ایجاد شده در پوشش بتنی تونل مقادیر پایین‌تری را نسبت به روش تحلیلی دیگر و عددی نتیجه می‌دهد.
 - ✓ به‌طور کلی نتایج حاصل از روش‌های تحلیلی مقادیر نسبتاً بالاتری در مقایسه با روش عددی نشان می‌دهد.
 - ✓ با افزایش ضخامت پوشش بتنی تونل گشتاور خمشی به‌طور چشمگیری افزایش می‌یابد. همچنین به‌نظر می‌رسد که افزایش ضخامت پوشش بتنی تونل تغییری در نیروی محوری و برشی ایجاد شده در پوشش بتنی ایجاد نمی‌کند.
 - ✓ به‌طور کلی با افزایش تعداد قطعات بتنی در انواع مختلف خاک مقادیر گشتاور خمشی، نیروی برشی و نیروی محوری ایجاد شده در پوشش بتنی تونل کاهش می‌یابد.

۱-۳- پیشنهادات

- ✓ در این پژوهش تغییرات مشخصات پوشش بتنی تونل و خاک درون‌گیر تحت یک نوع خاص زمین‌لرزه مورد تحلیل قرار گرفته است. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش‌های آینده تاثیر مشخصات زمین‌لرزه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

✓ در این پژوهش برای تعداد قطعات بتنی متفاوت آرایش ثابتی در نظر گرفته شده است. پیشنهاد می‌شود که در پژوهش دیگری تاثیر آرایش قرار گیری قطعات بتنی در کنار یکدیگر مورد مطالعه و بررسی قرار گیرد.

✓ تونل‌های مدل‌سازی شده در این پژوهش در مسیر و راستای بدون قوس و شیب مورد تحلیل و بررسی قرار گرفته‌اند. پیشنهاد می‌شود در پژوهش‌های دیگری تاثیر قوس و شیب نیز مورد بررسی و تحلیل قرار گیرد.

منابع

Bolouri Bazaz, J., & Besharat, V. (2008, October). An investigation on seismic analysis of shallow tunnels in soil medium. In 14th World Conference on Earthquake Engineering .

Bobet, A. (2003). Effect of pore water pressure on tunnel support during static and seismic loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 18(4), 377-393 .

Brinkgreve, R. B. J., & Vermeer, P. A. (2002). *Plaxis users manual*. Balkema, Rotterdam (The Netherlands).

Corigliano, M., Scandella, L., Lai, C. G., & Paolucci, R. (2011). Seismic analysis of deep tunnels in near fault conditions: a case study in Southern Italy. *Bulletin of Earthquake Engineering*, 9(4), 975-995.

Cundall, P. A. (2008). *FLAC 3D Manual: a computer program for fast Lagrangian analysis of continua (Version 4.0)*. Minneapolis, Minnesota, USA.

Das, B. (2007). *Principles of geotechnical engineering*. Cengage. Learning .

Do, N. A., Dias, D., Oreste, P., & Djeran-Maigre, I. (2015). 2D numerical investigation of segmental tunnel lining under seismic loading. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 72, 66-76 .

Einstein, H. H., & Schwartz, C. W. (1979). Simplified analysis for tunnel supports. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 105(ASCE 14541).

Fahimifar, A., & Vakilzadeh, A. (2009). Numerical and analytical solutions for ovaling deformation in circular tunnels under seismic loading. *International Journal of Recent Trends in engineering*, 1(6), 30-35 .

Geo Tech Data. (2017). *Geo Tech Data*. Retrieved from <http://www.geotechdata.info/parameter/parameter.html>

Guglielmetti, V., Grasso, P., Mahtab, A., & Xu, S. (Eds.). (2008). *Mechanized tunnelling in urban areas: design methodology and construction control*. CRC Press .

Hashash, Y. M., Park, D., John, I., & Yao, C. (2005). 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), 435-441 .

Itasca, F. L. A. C. (2002). *Fast Lagrangian Analysis of Continua, Version 4.0 User's Guide*, Itasca Consulting Group. Inc., Thrasher Square East, 708p .

Koolen, A. J. (1982). *Handbook of soil mechanics. Vol. 2 soil testing: Árpád Kézdi*. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam/Oxford/New York, jointly with Akadémiai Kiadó, Budapest, Hungary, 1980. 258 pp., 345 figs., 34 tables, US \$61.75/Dfl. 145.00, ISBN 0-444-99778-4 .

Kontoe, S., Zdravkovic, L., Potts, D. M., & Menkiti, C. O. (2008). Case study on seismic tunnel response. *Canadian Geotechnical Journal*, 45(12), 1743-1764 .

Kouretzis, G. P., Sloan, S. W., & Carter, J. P. (2013). Effect of interface friction on tunnel liner internal forces due to seismic S-and P-wave propagation. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 46, 41-51 .

Kuhlemeyer, R. L., & Lysmer, J. (1973). Finite element method accuracy for wave propagation problems. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div*, 99(Tech Rpt).

Memarian, H. (1998). *Engineering geology and geotechnics*. publisher of Tehran University.

O'Carroll, J. B. (2005). *A Guide to Planning, Constructing, and Supervising Earth Pressure Balance TBM Tunneling*. Parsons Brinckerhoff .

Obrzud, R., & Truty, A. (2012). *The hardening soil model-a practical guidebook z soil*. Report PC, 100701.

Oreste, P. (2015). Simplified analysis of the lining behavior during earthquakes in deep rock tunnels. *American Journal of Applied Sciences*, 12(3), 191-199 .

Owen, G. N., & Scholl, R. E. (1981). *Earthquake engineering of large underground structures*. NASA STI/Recon Technical Report N, 82.

Pakbaz, M. C., & Yareevand, A. (2005). 2-D analysis of circular tunnel against earthquake loading. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 20(5), 411-417 .

Park, K. H., Tantayopin, K., & Tontavanich, B. (2006, February). Analytical solutions for seismic design of tunnel lining in Bangkok MRT Subway. In *Proceedings of the International Symposium on Underground Excavation and Tunneling*, Bangkok, Thailand (pp. 541-550).

Park, K. H., Tantayopin, K., Tontavanich, B., & Owatsiriwong, A. (2009). Analytical solution for seismic-induced ovaling of circular tunnel lining under no-slip interface conditions: A revisit. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(2), 231-235 .

Penzien, J. (2000). Seismically induced racking of tunnel linings. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 29(5), 683-691 .

Penzien, J., & Wu, C. L. (1998). Stresses in linings of bored tunnels. *Earthquake engineering & structural dynamics*, 27(3), 283-300 .

Sedarat, H., Kozak, A., Hashash, Y. M., Shamsabadi, A., & Krimotat, A. (2009). Contact interface in seismic analysis of circular tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 24(4), 482-490.

Shahrour, I., Khoshnoudian, F., Sadek, M., & Mroueh, H. (2010). Elastoplastic analysis of the seismic response of tunnels in soft soils. *Tunnelling and underground space technology*, 25(4), 478-482.

Sharma, S., & Judd, W. R. (1991). Underground opening damage from earthquakes. *Engineering Geology*, 30(3-4), 263-276 .

Sliteen, I., Mroueh, H., & Sadek, M. (2011). Three-dimensional modeling of the behavior of shallow tunnel under seismic loading. 20ème Congrès Français de Mécanique, 28 sept. 2011-25044 Besançon, France (FR).

Torcato, D. M. M. F. (2010). Seismic behaviour of shallow tunnels in stratified ground. Master's thesis). Univeridade Técnica de Lisboa.

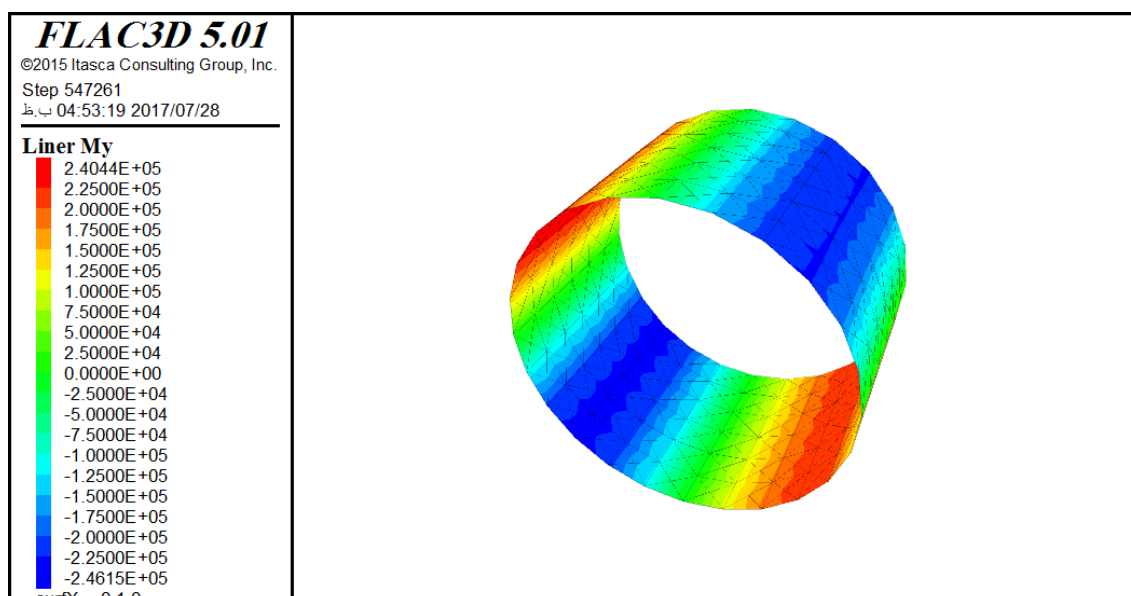
Wang, J. N. (1993). Seismic design of tunnels: a state-of-the-art approach, monograph, monograph 7. Parsons, Brinckerhoff, Quade and Douglas Inc., New York.

F.-E. Udvardia and M.-D. Trifunac, "Comparison of earthquake and micro tremor ground motion in El Centro, California," *Bulletin of the Seismological Society of America*, vol. 63, no. 4, pp. 1227–1253, 1973.

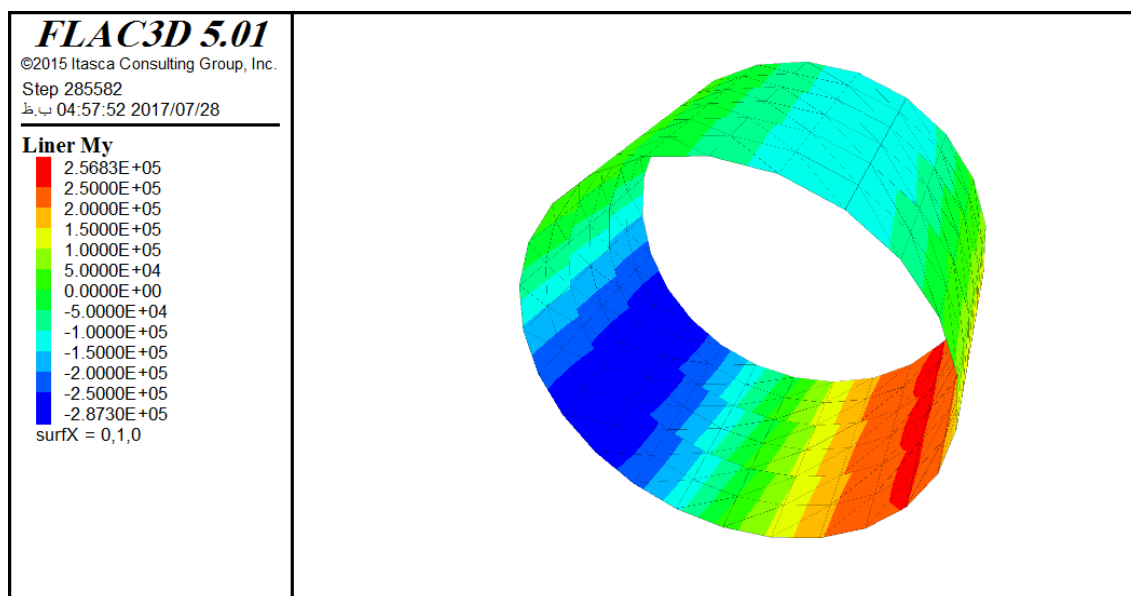
Wittke, W., Erichsen, C., & Gattermann, J. (2006). *Stability Analysis and Design for Mechanized Tunnelling*. WBI, Felsbau GmbH, Aachen.

پیوست

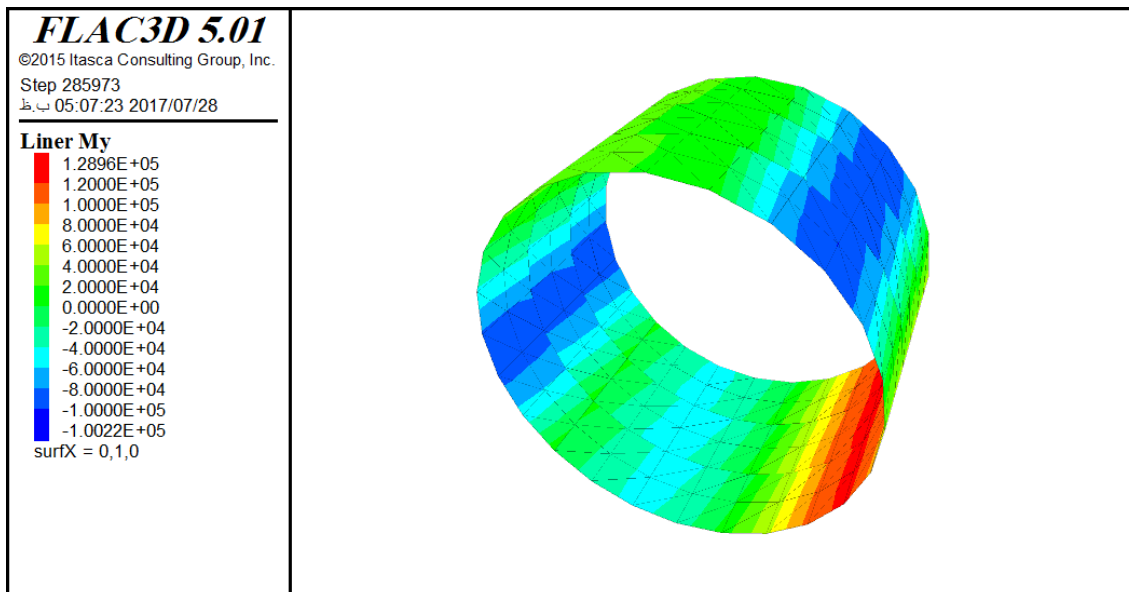
نمودارها



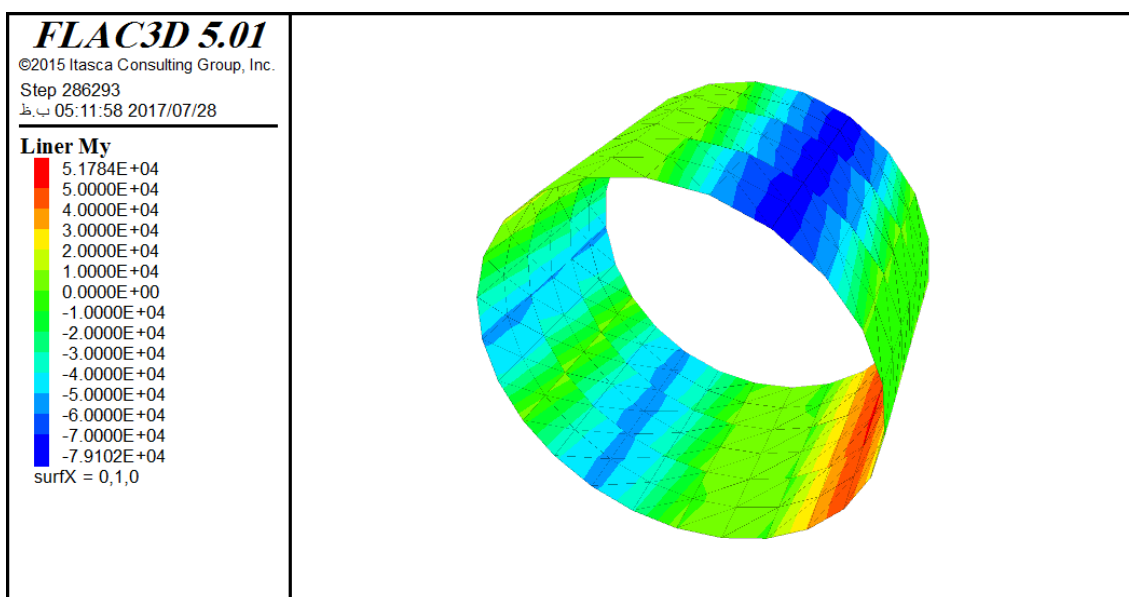
شکل ۱- کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW مترام



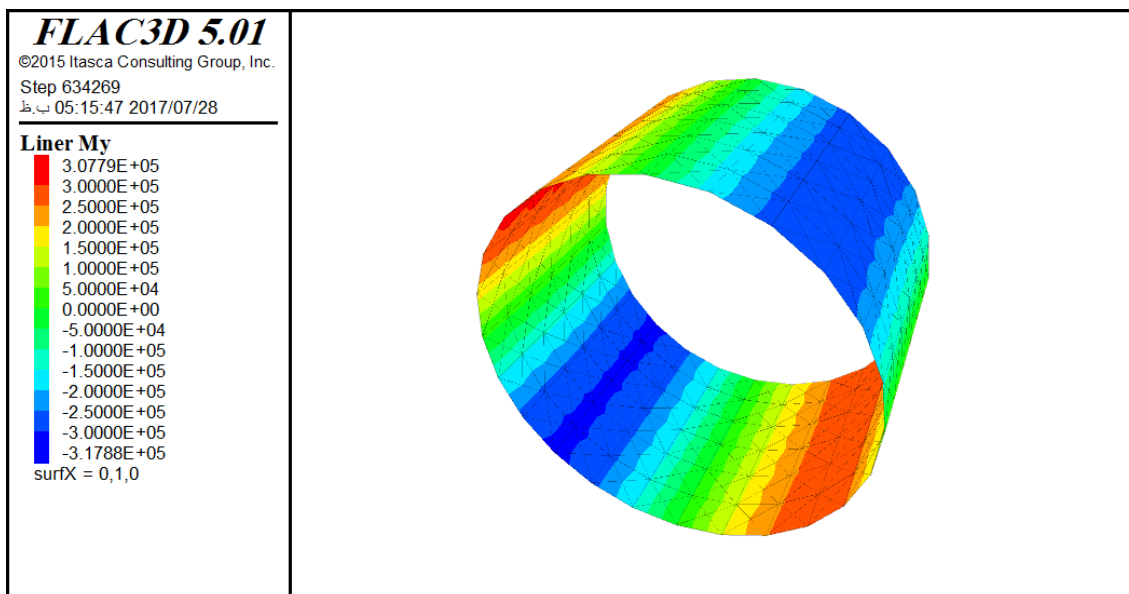
شکل ۲- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW مترام



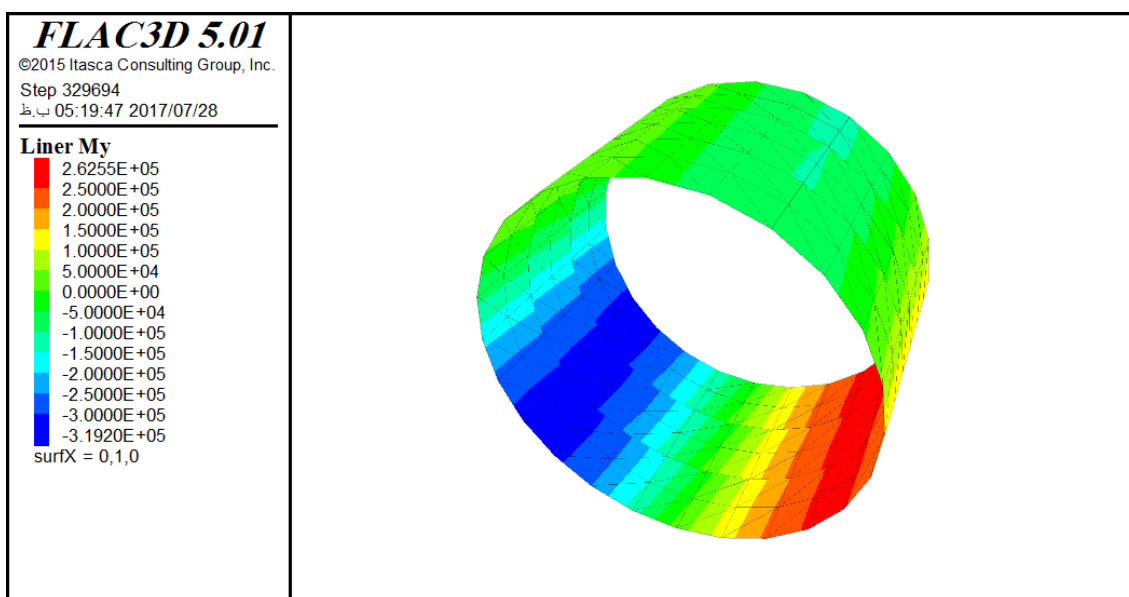
شکل ۳- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



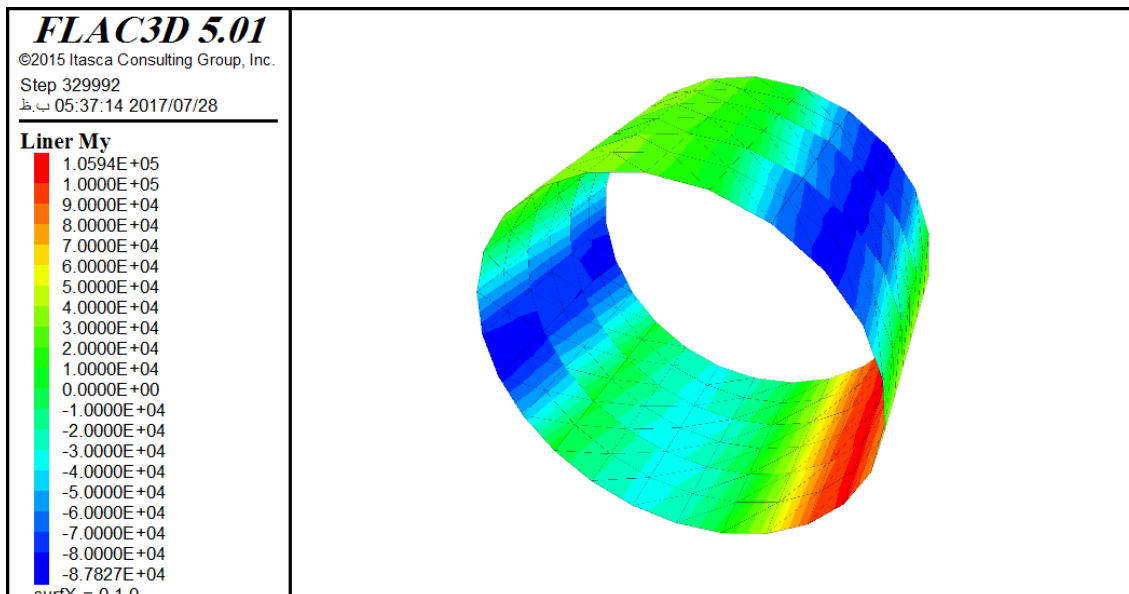
شکل ۴- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



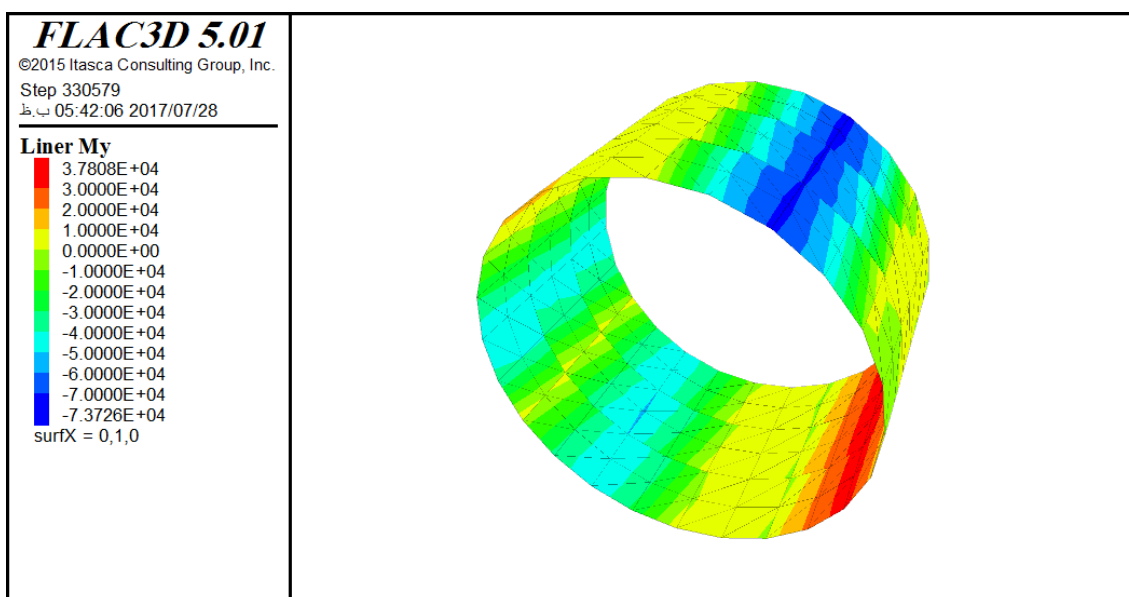
شکل ۵- کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



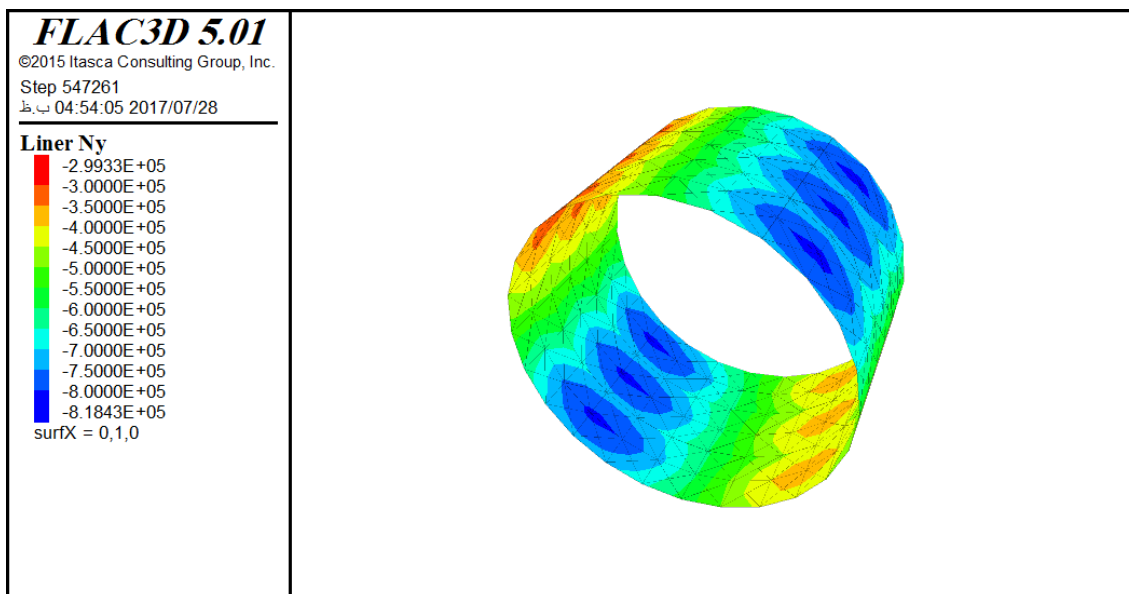
شکل ۶- کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی و ضخامت ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



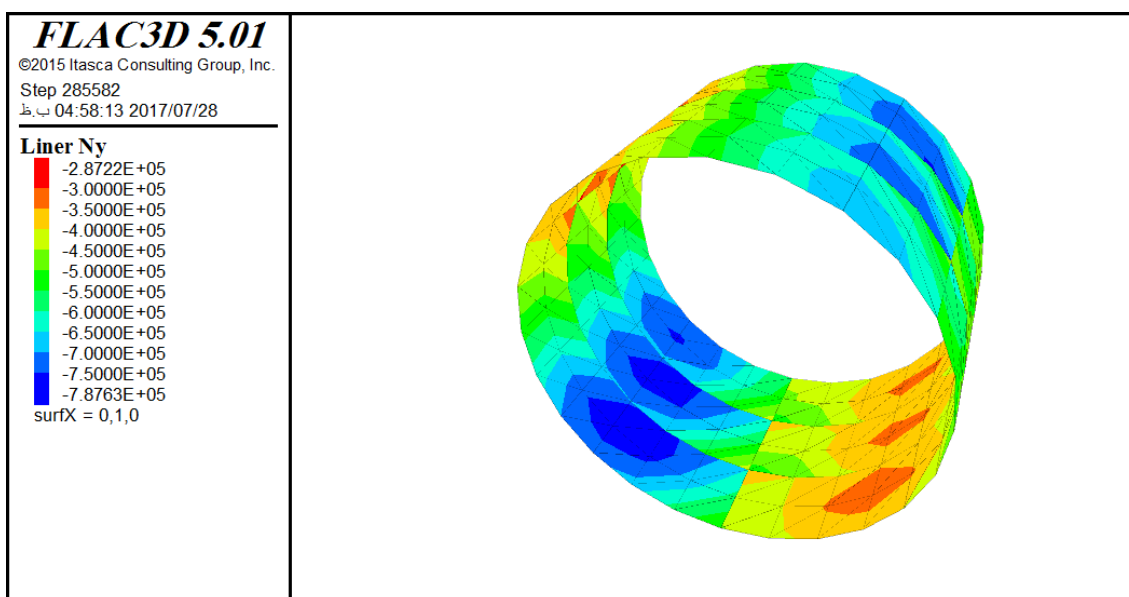
شکل ۷- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



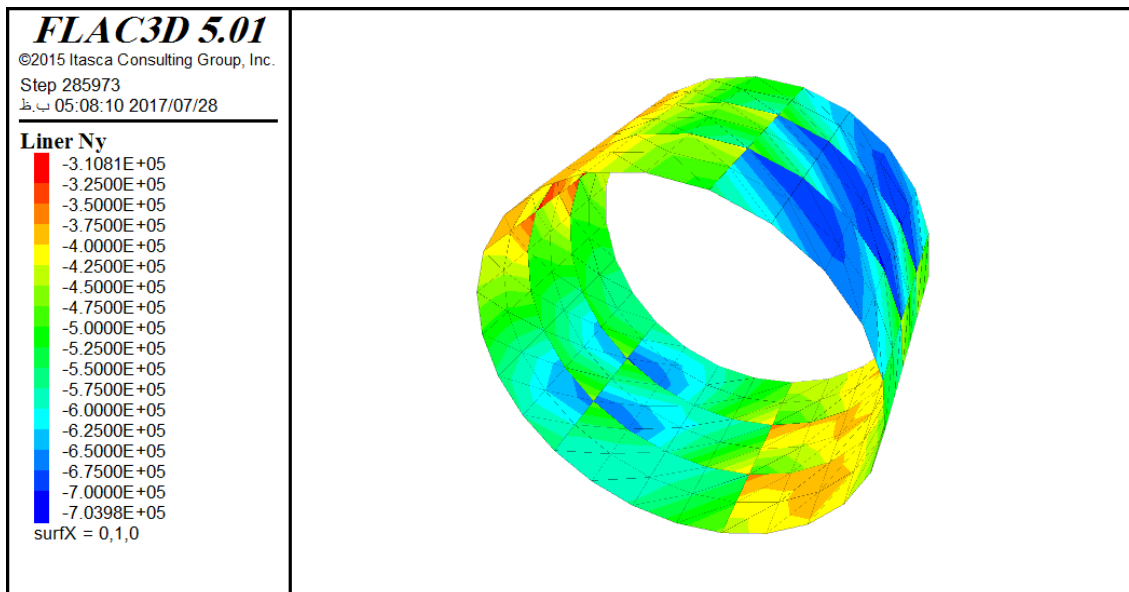
شکل ۸- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



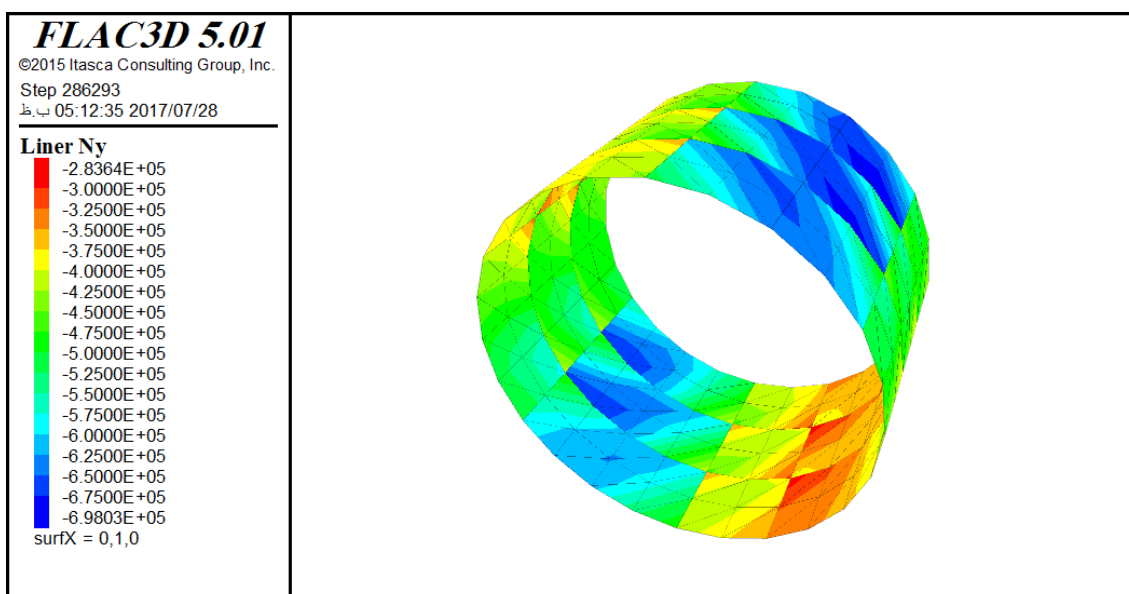
شکل ۹- کنتور نیروی محوری پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



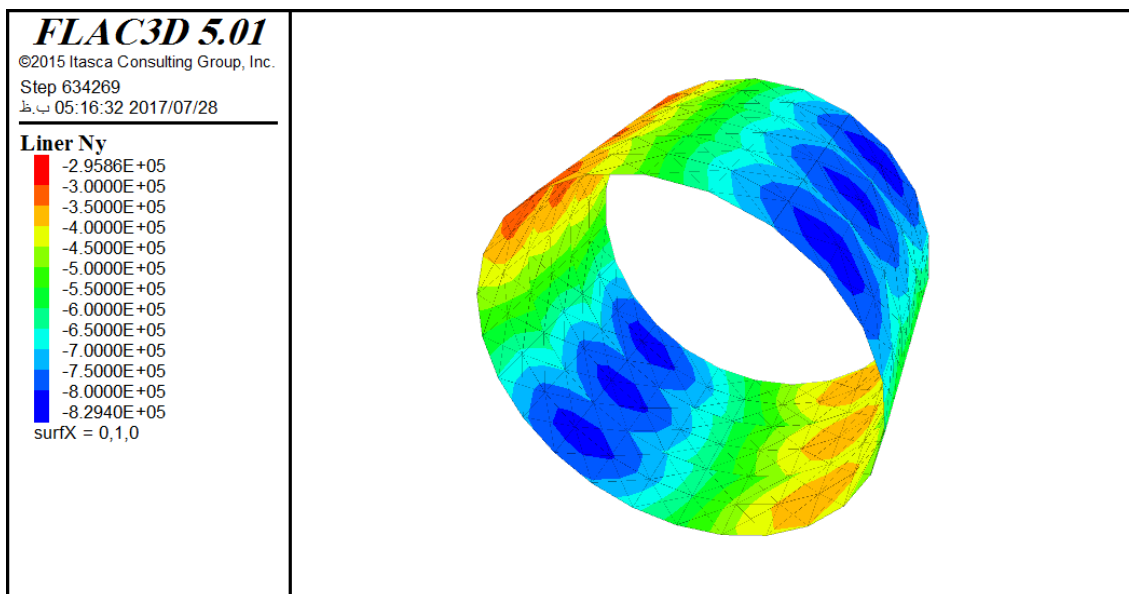
شکل ۱۰- کنتور نیروی محوری پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



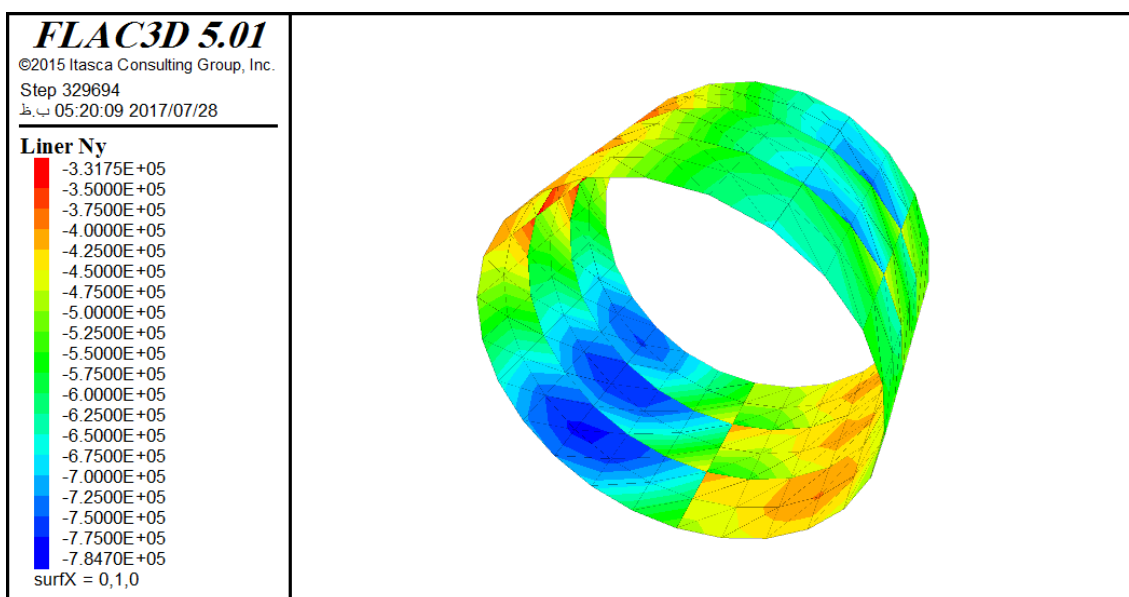
شکل ۱۱- کنتور نیروی محوری پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



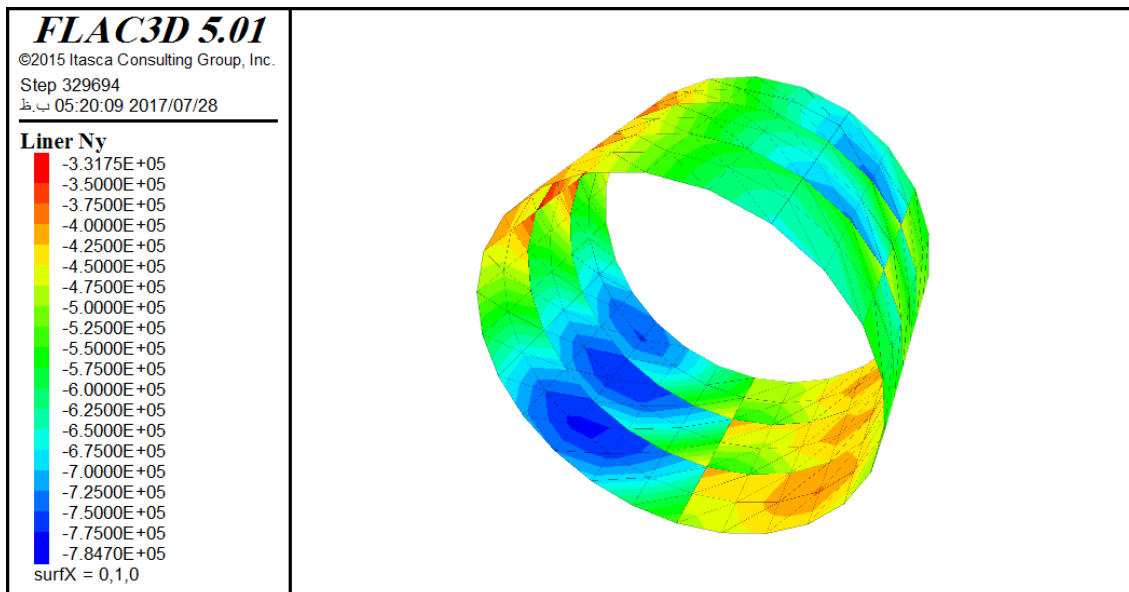
شکل ۱۲- کنتور نیروی محوری پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



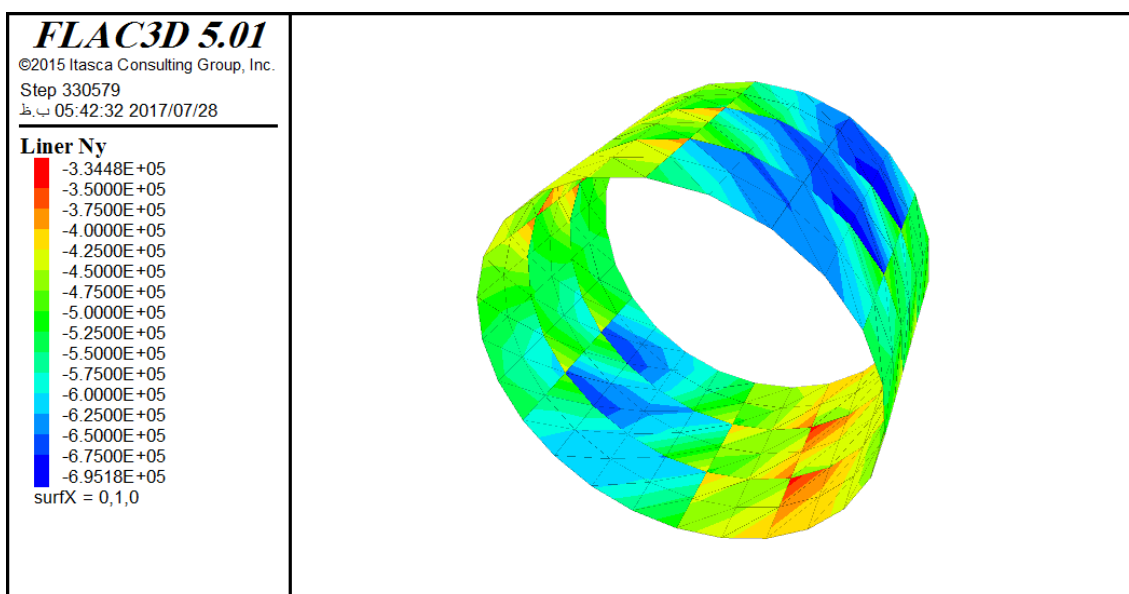
شکل ۱۳- کنتور نیروی محوری پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



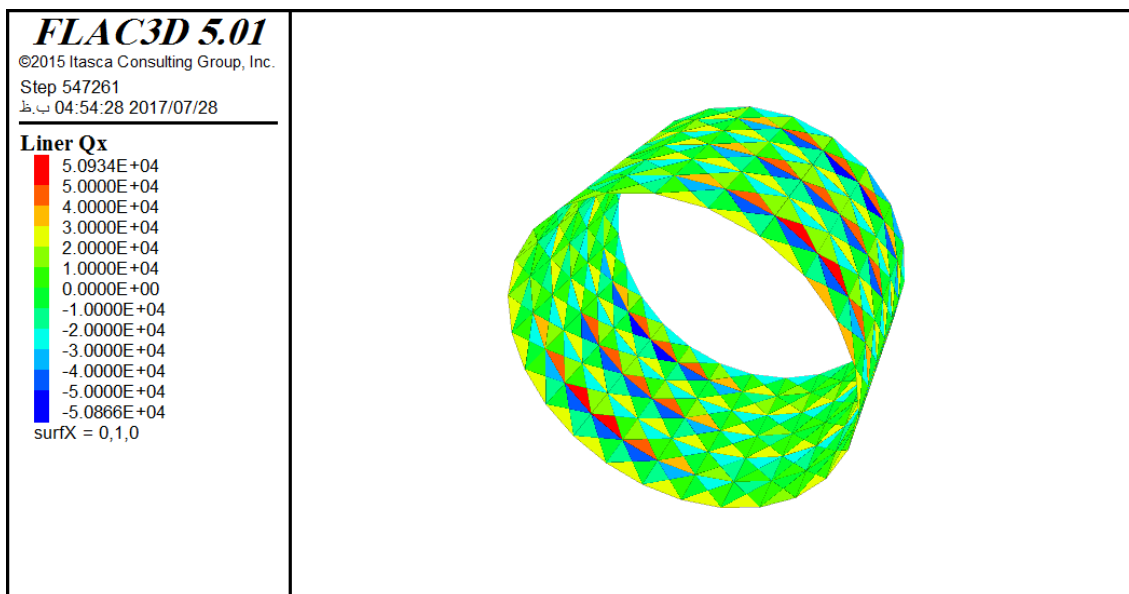
شکل ۱۴- کنتور نیروی محوری پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



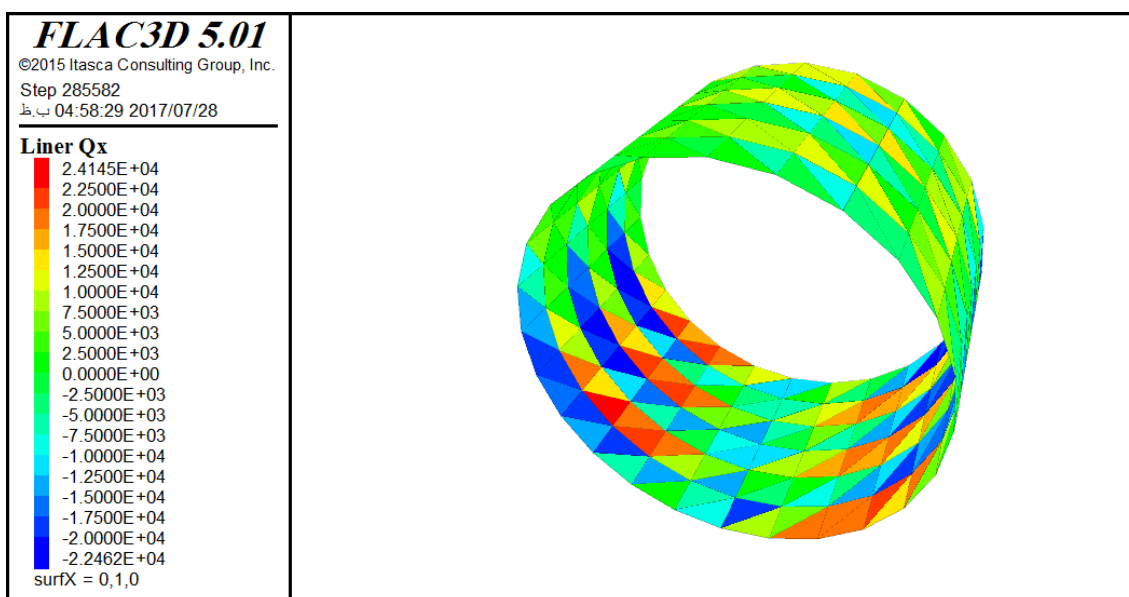
شکل ۱۵- کنتور نیروی محوری پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی متر برای خاک GW متراکم



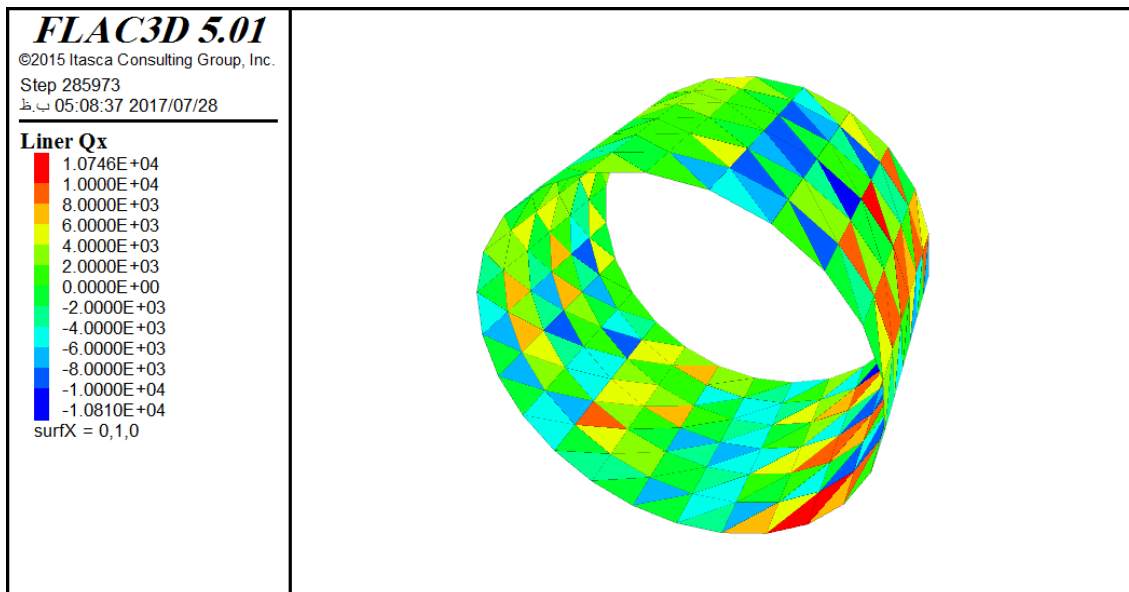
شکل ۱۶- کنتور نیروی محوری پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی متر برای خاک GW متراکم



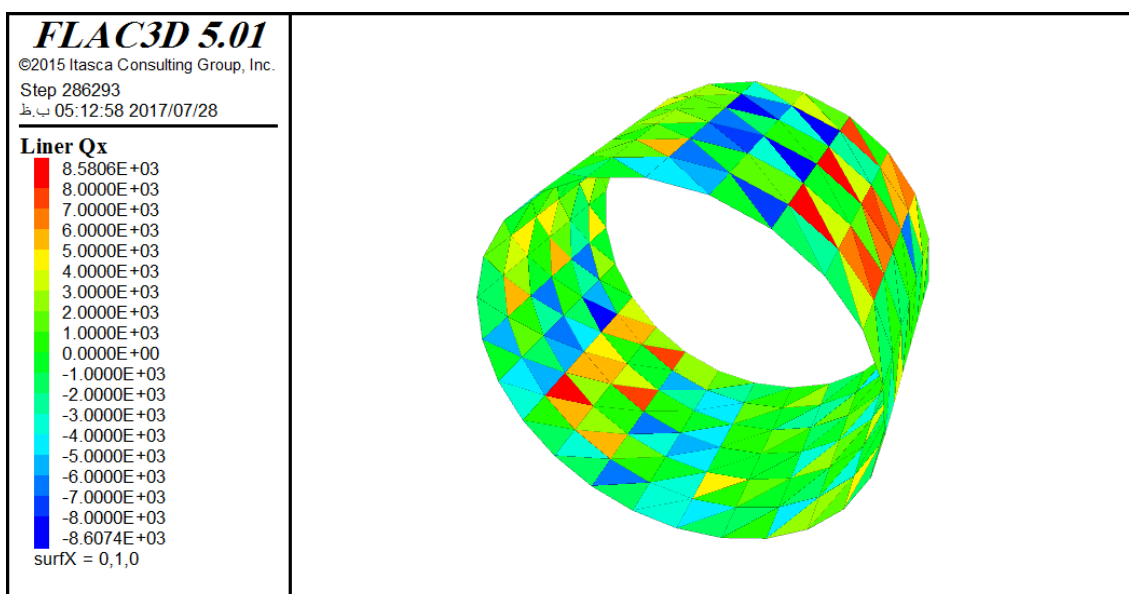
شکل ۱۷- کنترل نیروی برشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



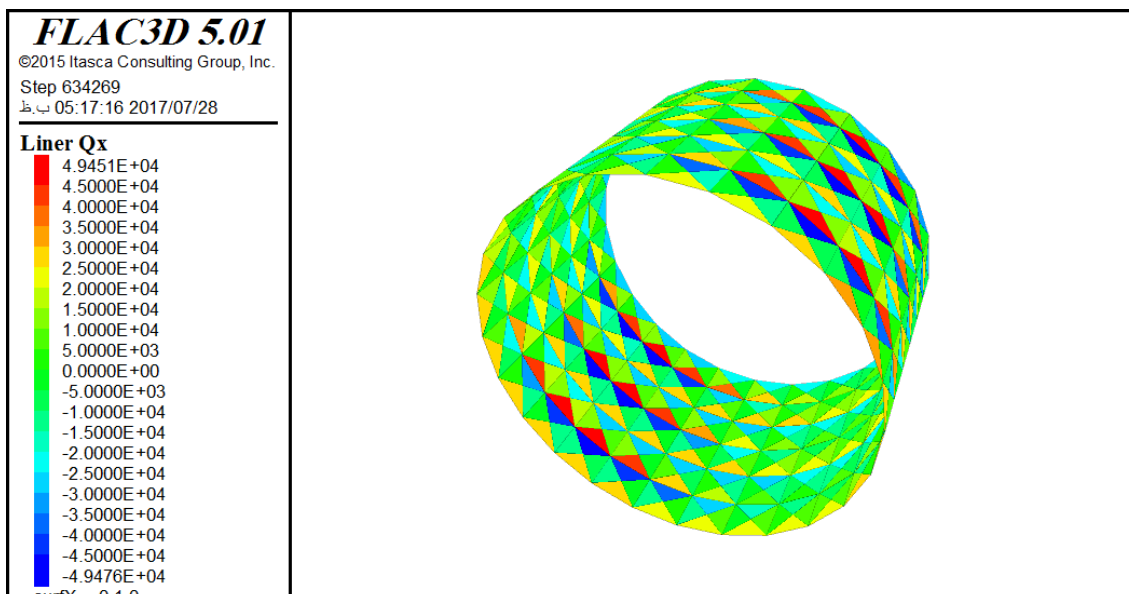
شکل ۱۸- کنترل نیروی برشی پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



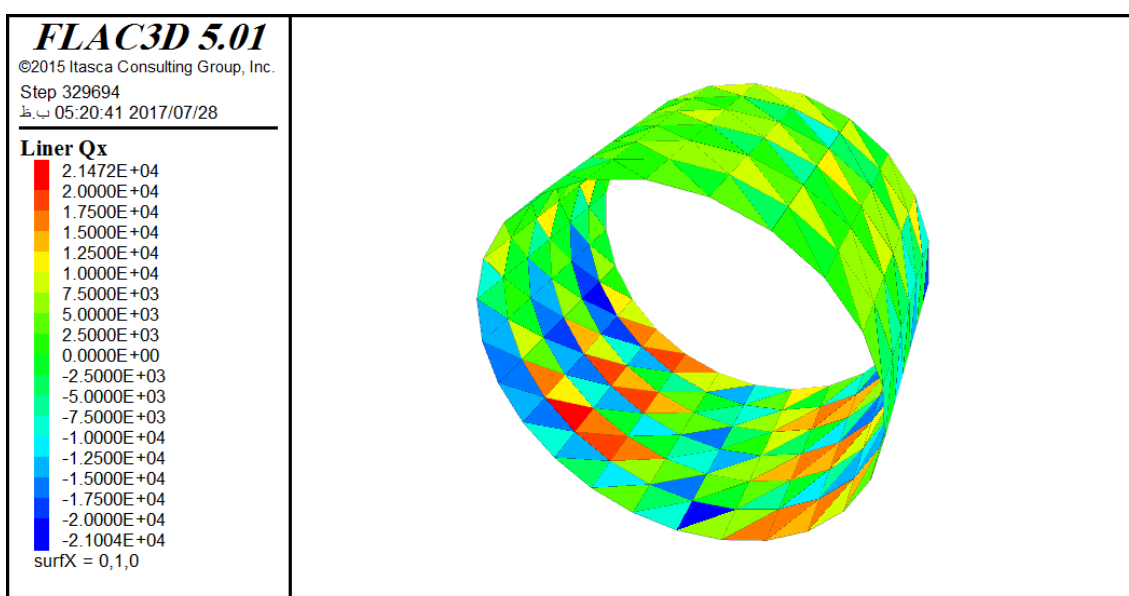
شکل ۱۹- کنتور نیروی برشی پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



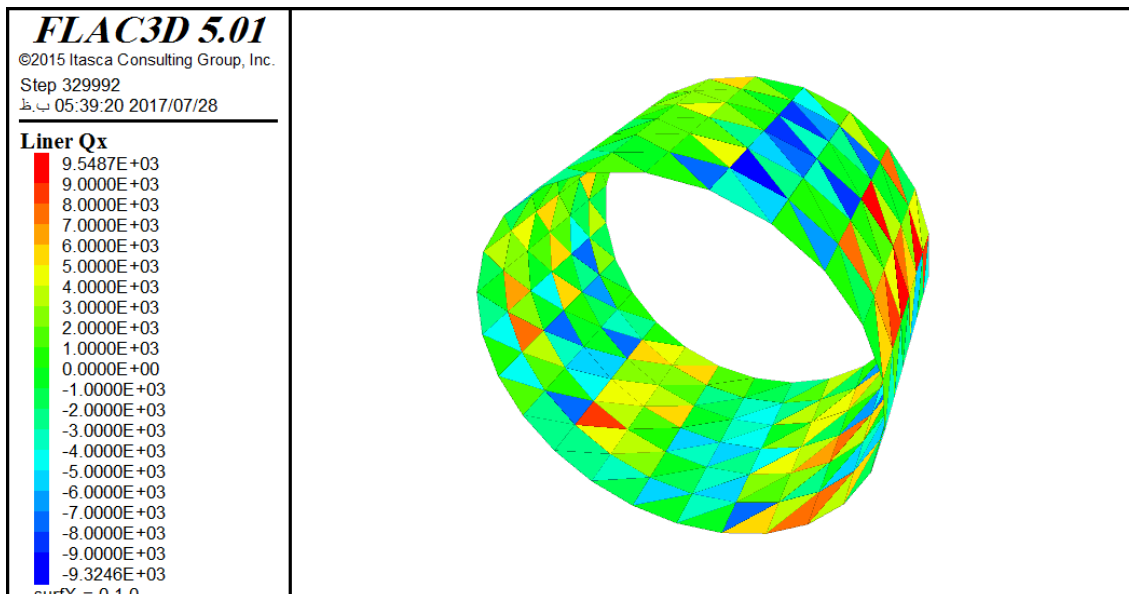
شکل ۲۰- کنتور نیروی برشی پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



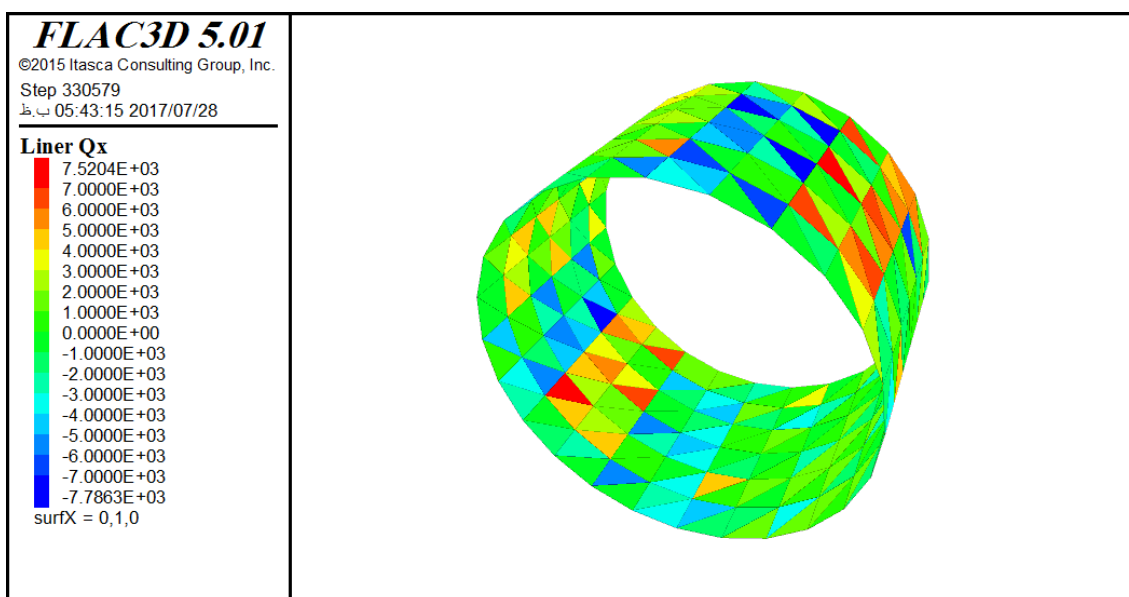
شکل ۲۱- کنترل نیروی برشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



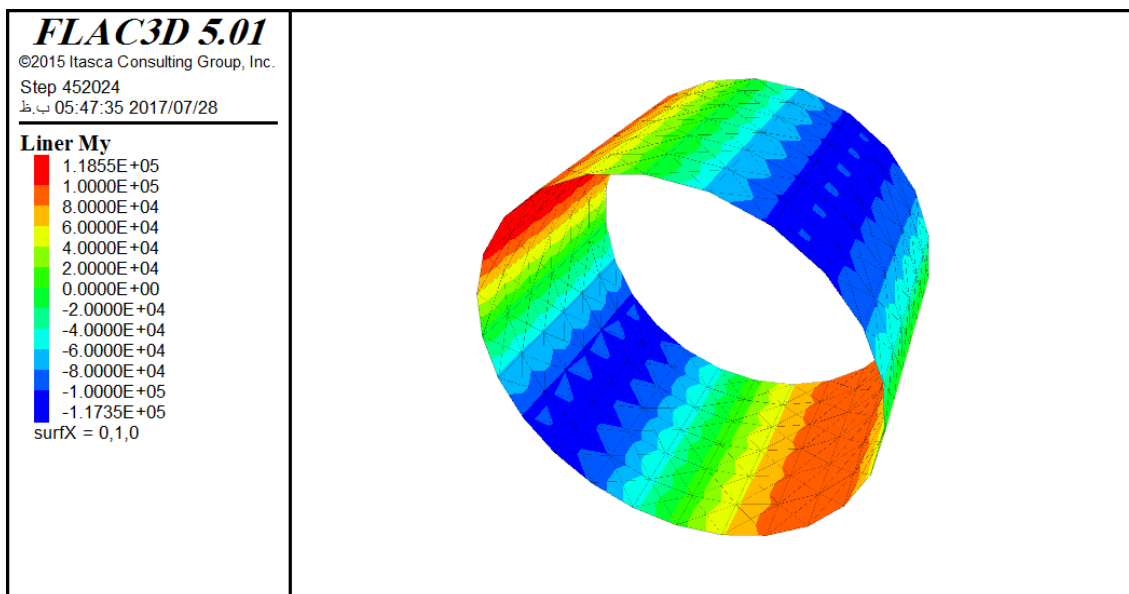
شکل ۲۲- کنترل نیروی برشی پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



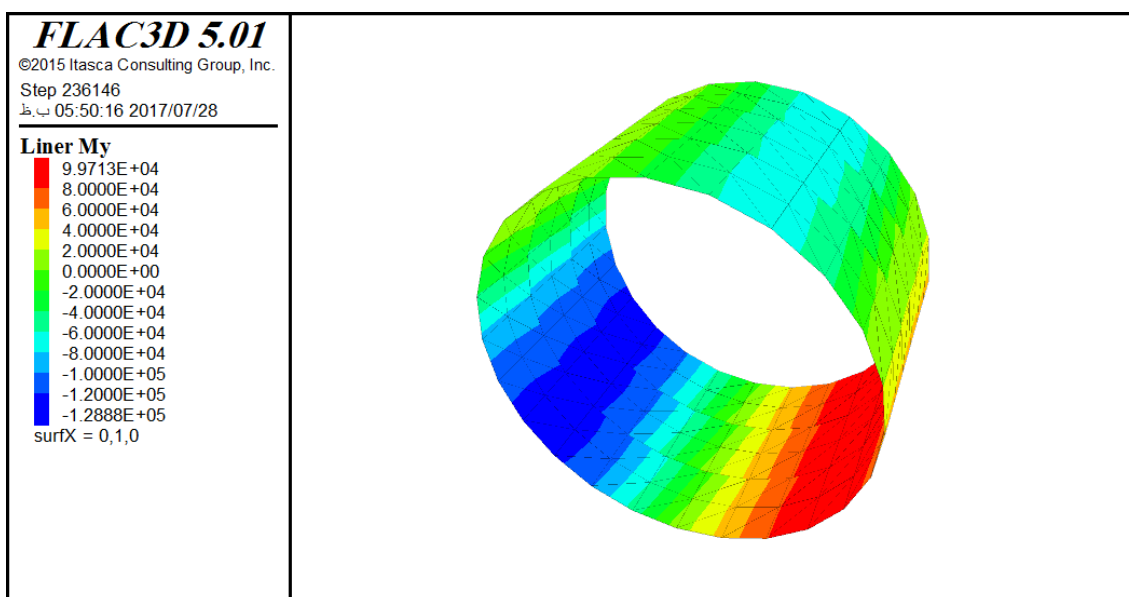
شکل ۲۳- کنتور نیروی برشی پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



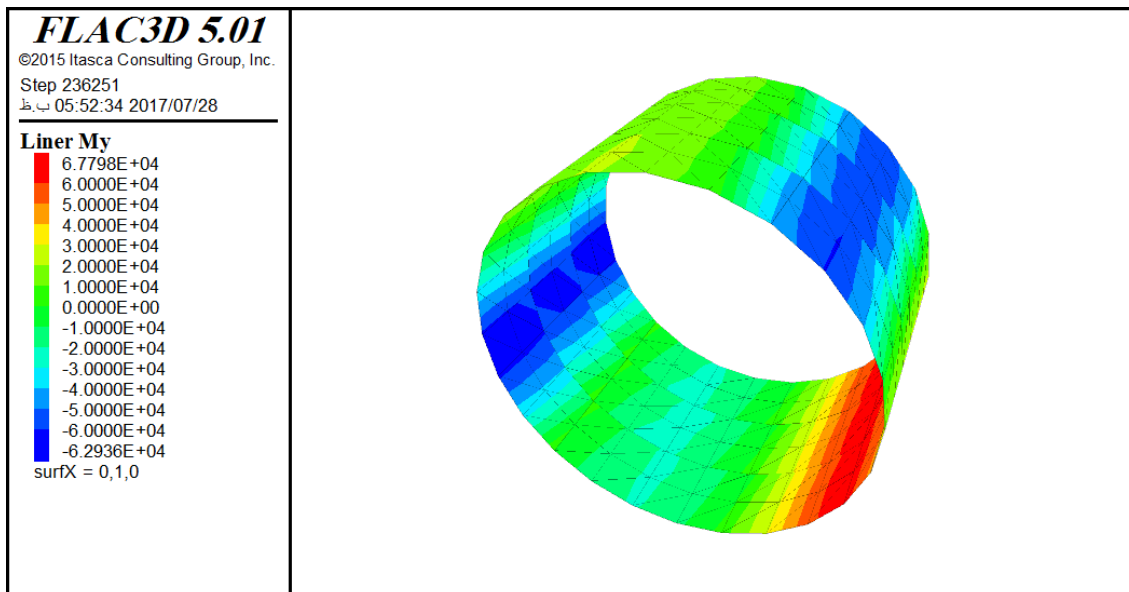
شکل ۲۴- کنتور نیروی برشی پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW متراکم



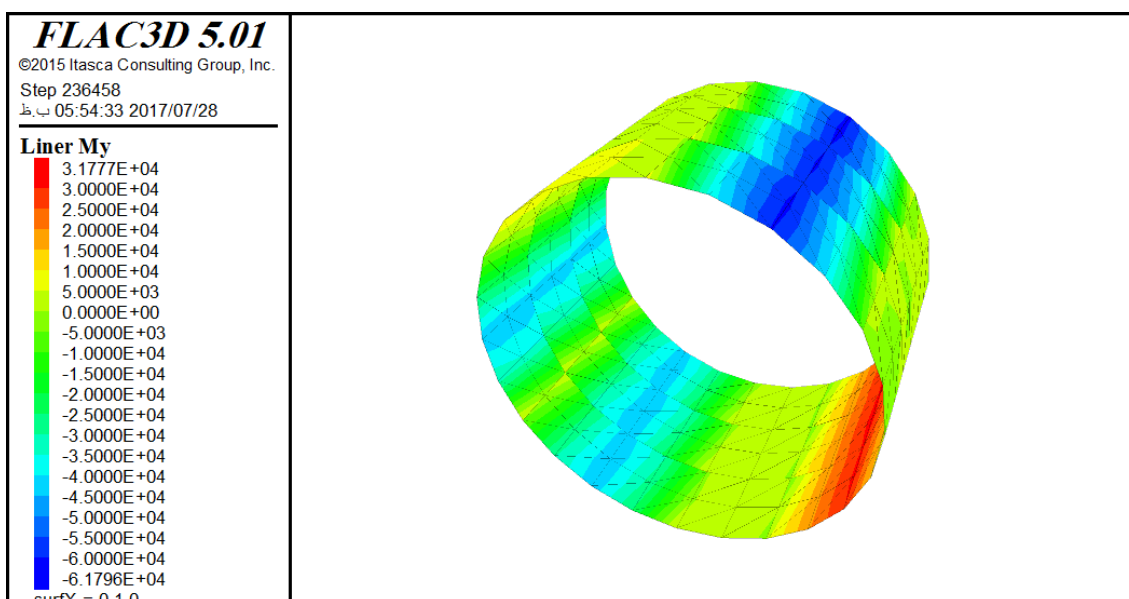
شکل ۲۵- کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



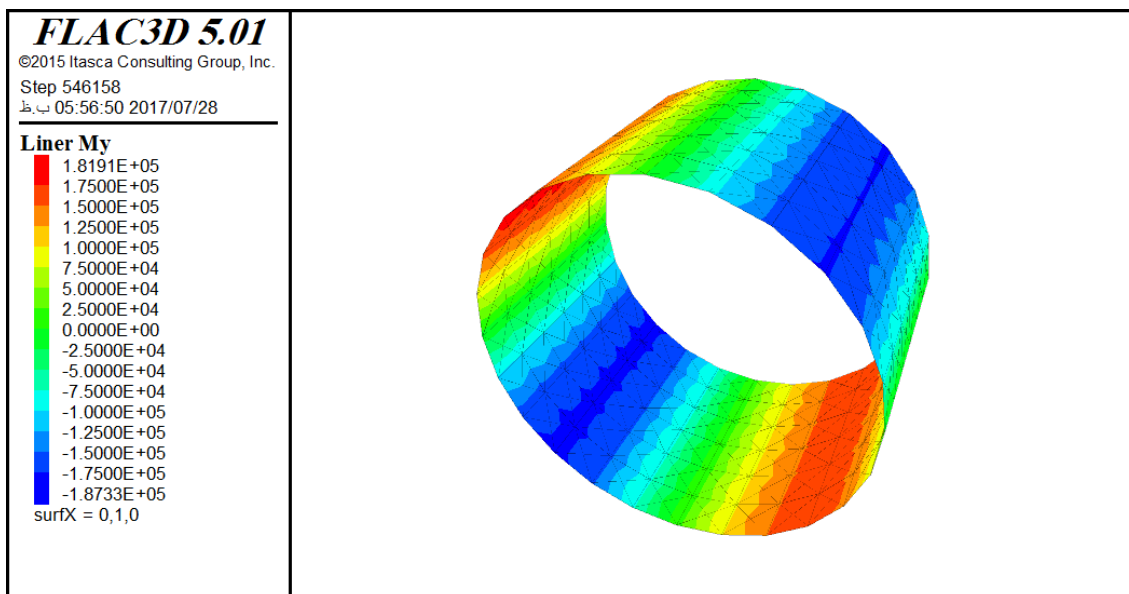
شکل ۲۶- کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



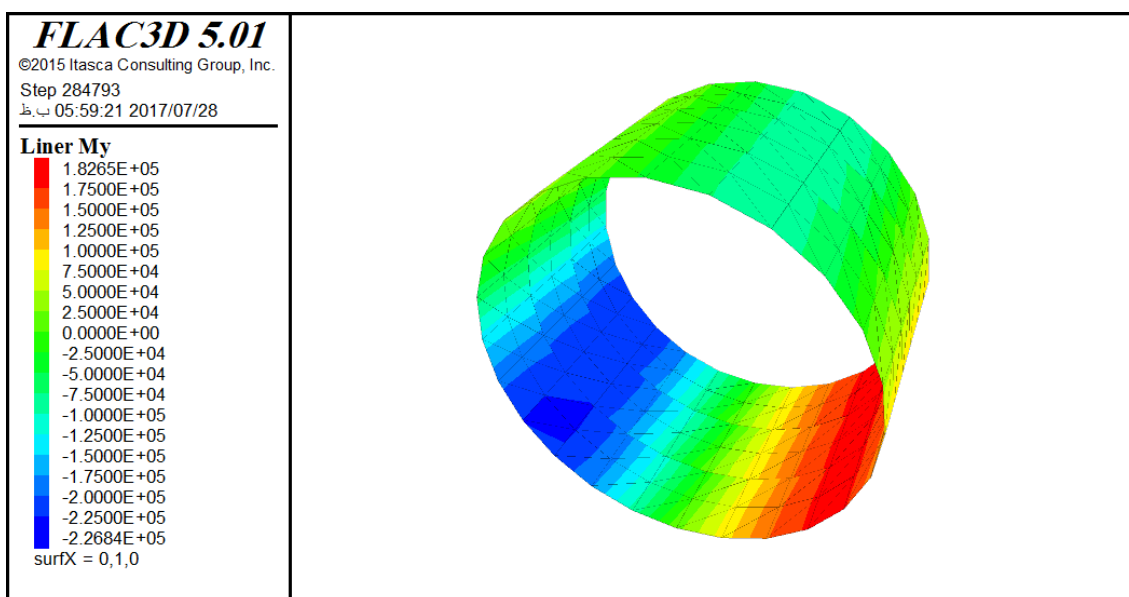
شکل ۲۷- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



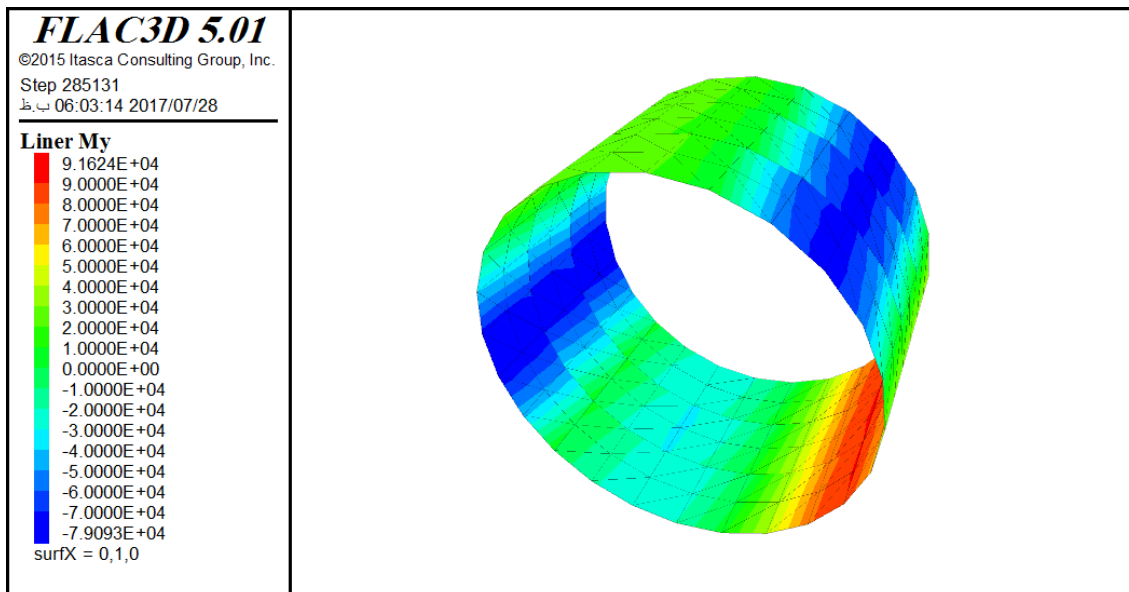
شکل ۲۸- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



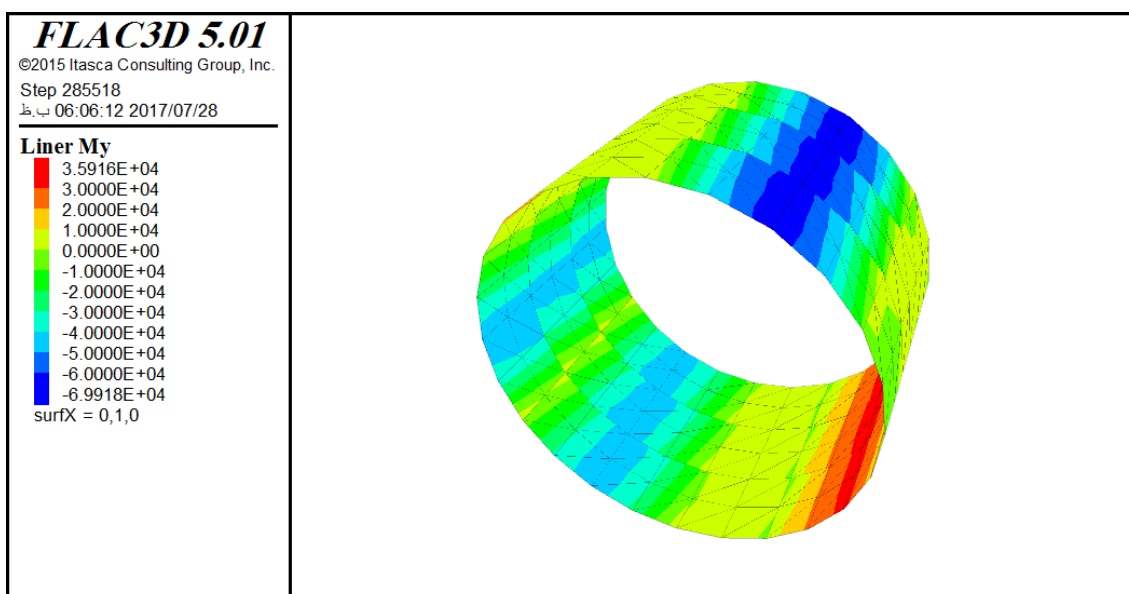
شکل ۲۹- کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



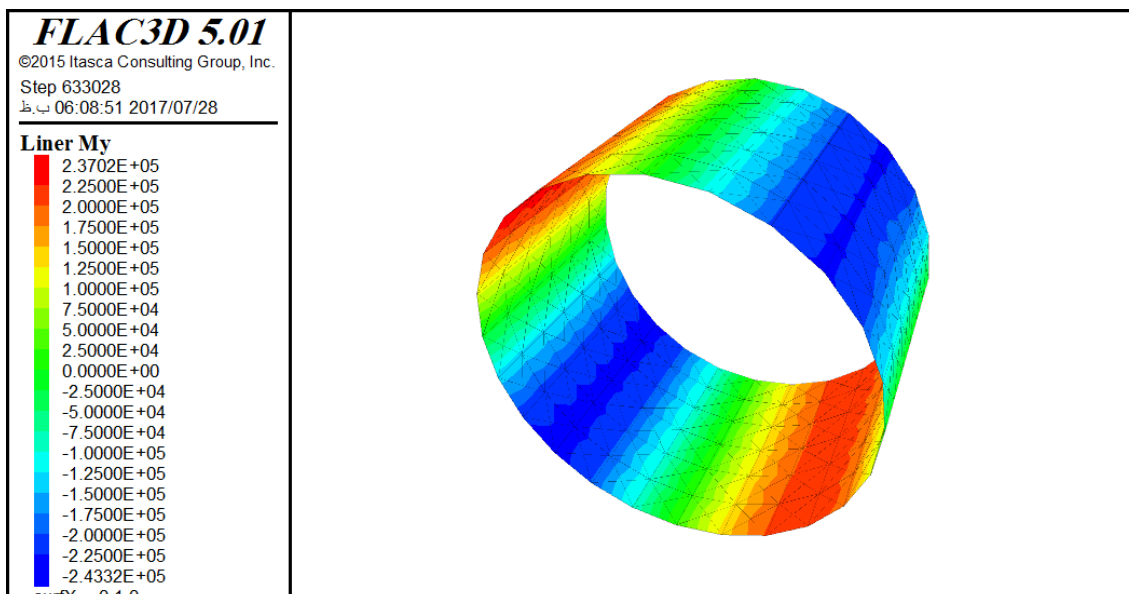
شکل ۳۰- کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی و ضخامت ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



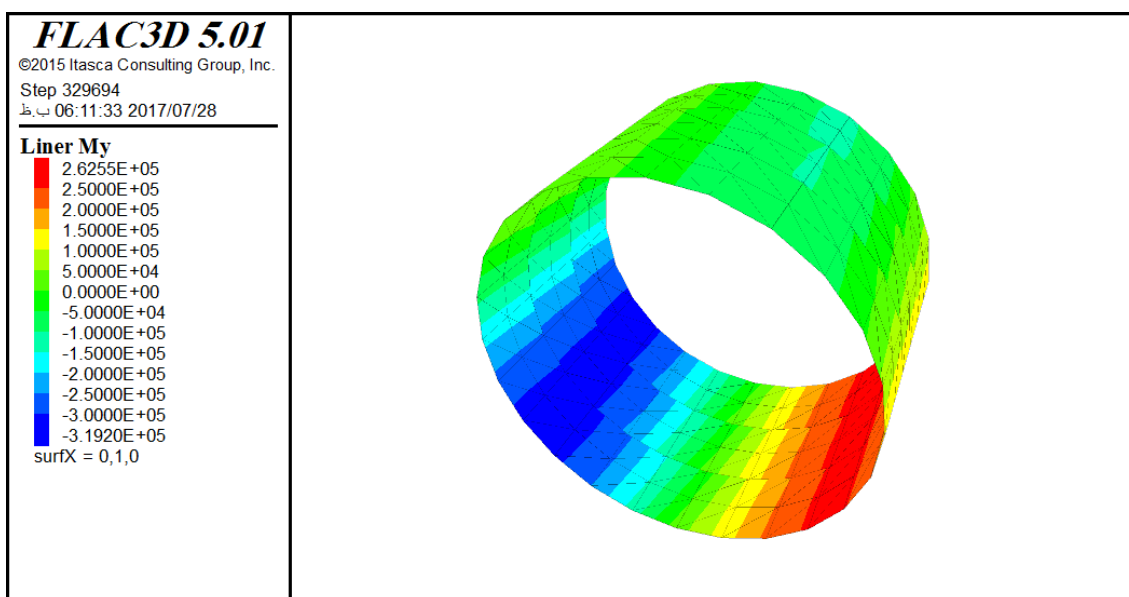
شکل ۳۱- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی متر برای خاک GW غیر متراکم



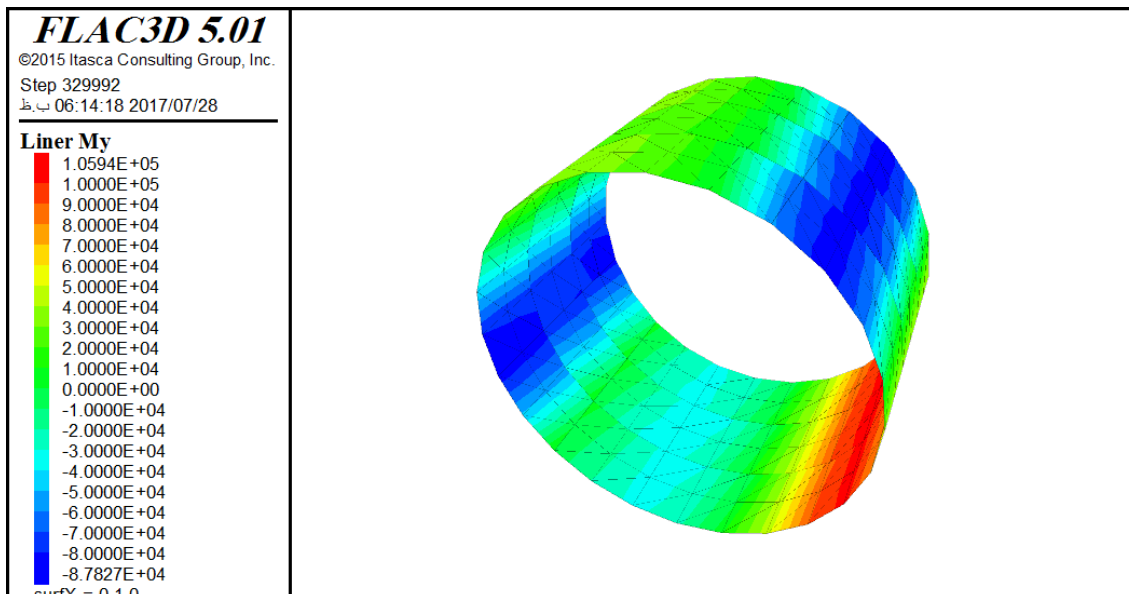
شکل ۳۲- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی متر برای خاک GW غیر متراکم



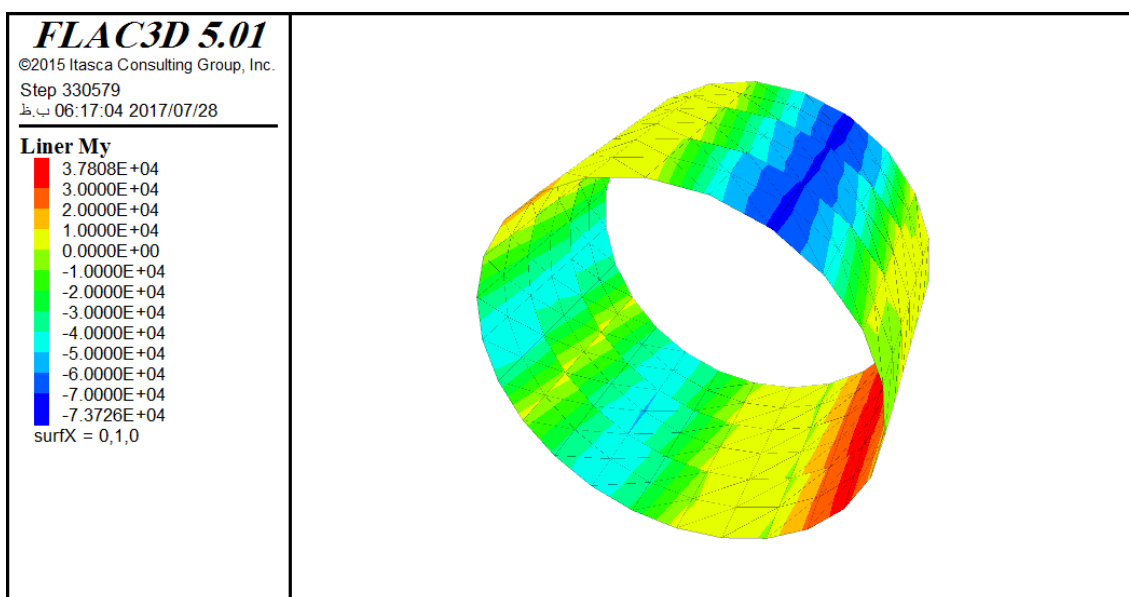
شکل ۳۳- کنتور گشتاور خمشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



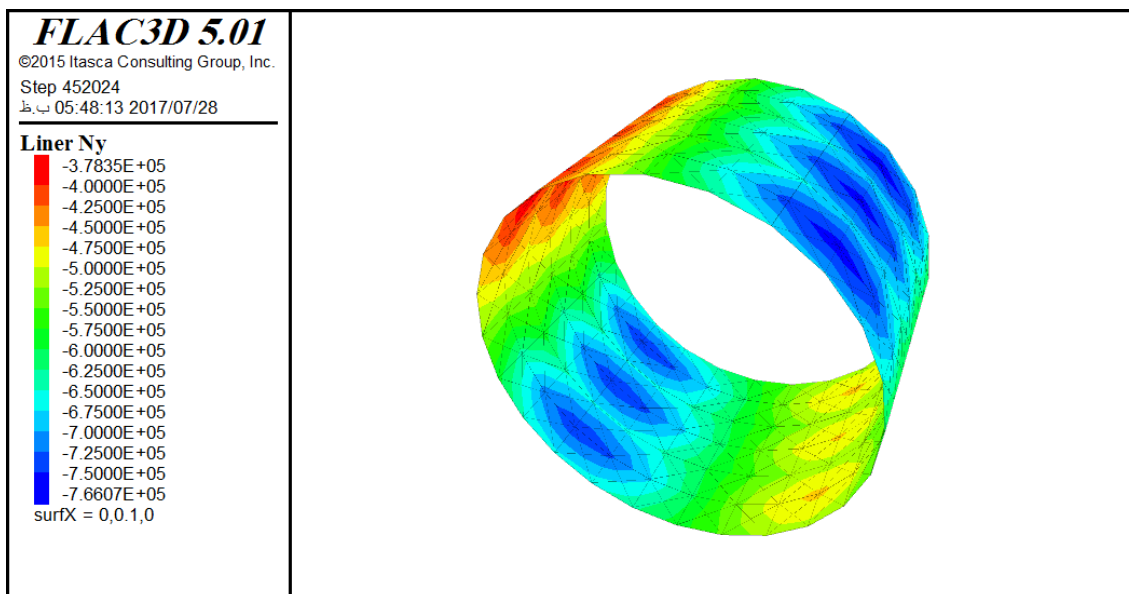
شکل ۳۴- کنتور گشتاور خمشی پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



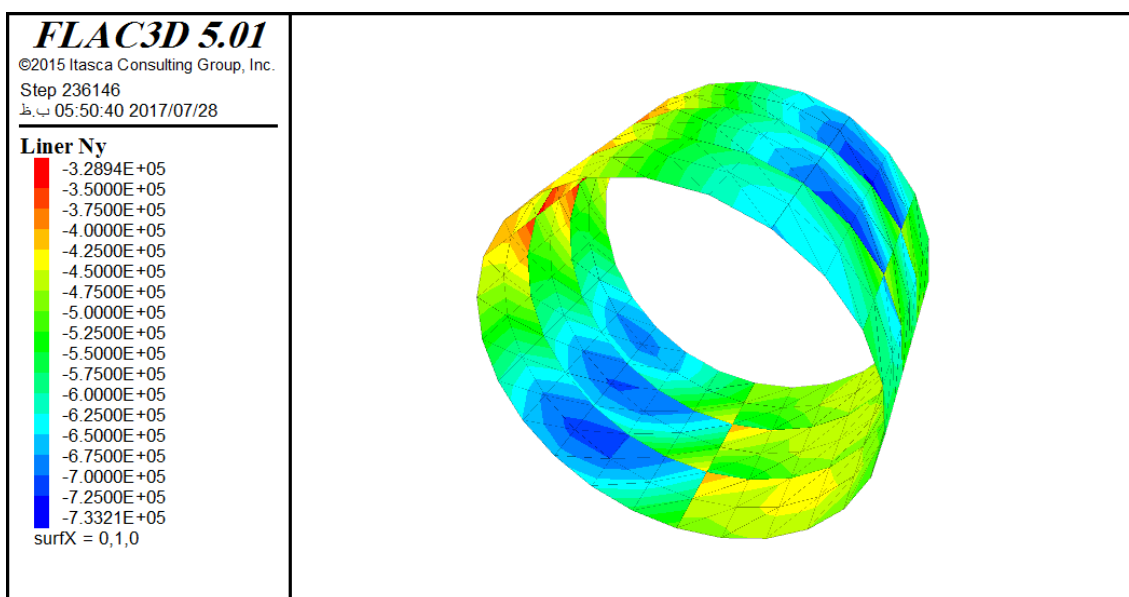
شکل ۳۵- کنتور گشتاور خمشی پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی متر برای خاک GW غیر متراکم



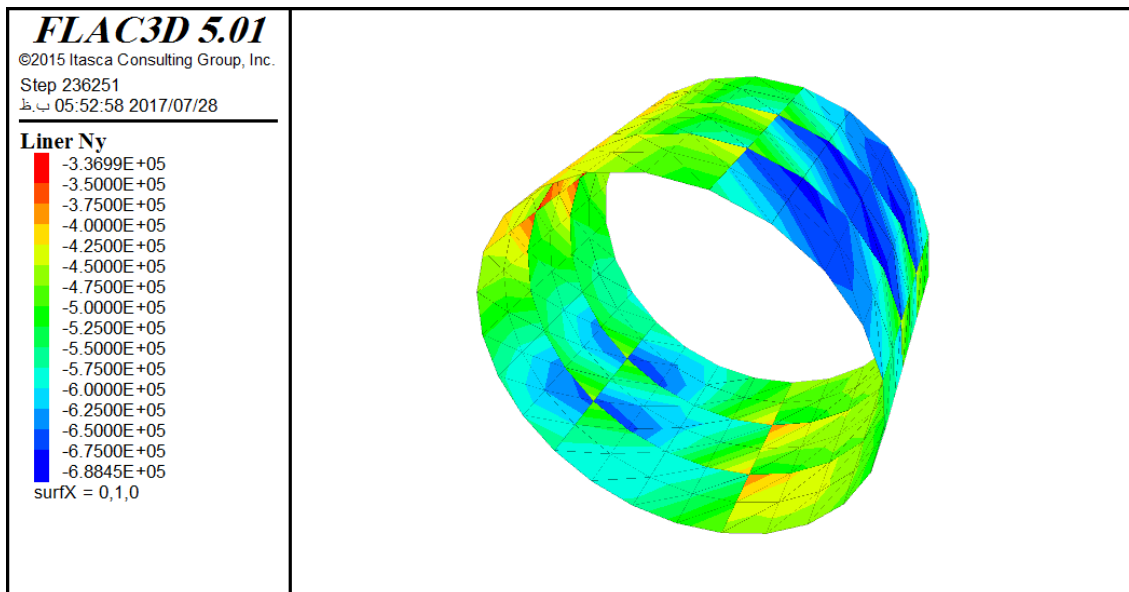
شکل ۳۶- کنتور گشتاور خمشی پوشش پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی متر برای خاک GW غیر متراکم



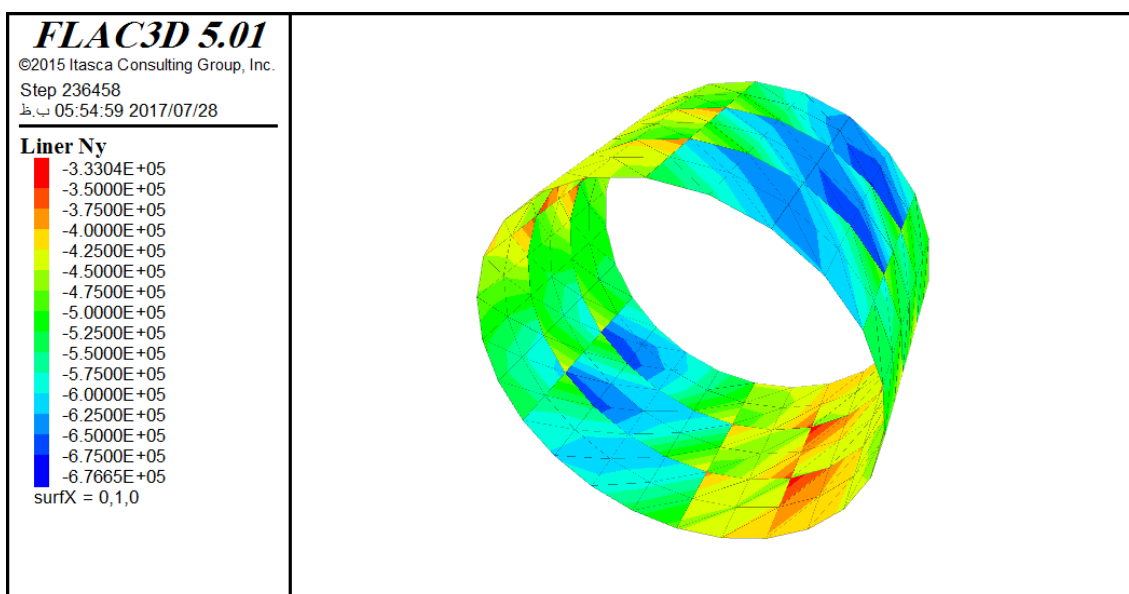
شکل ۳۷- کنتور نیروی محوری پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



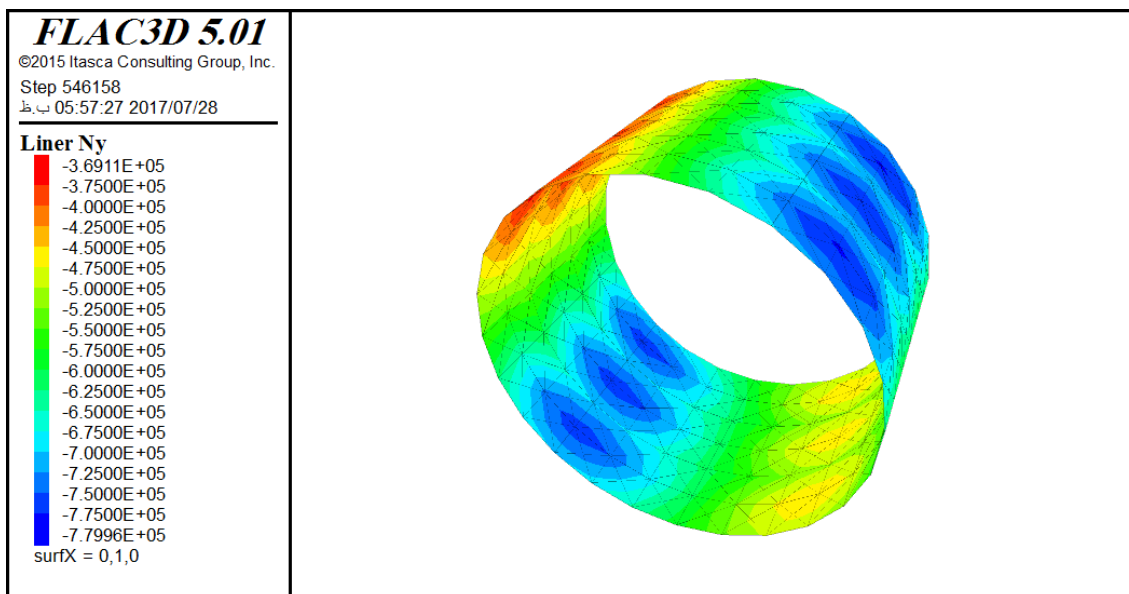
شکل ۳۸- کنتور نیروی محوری پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



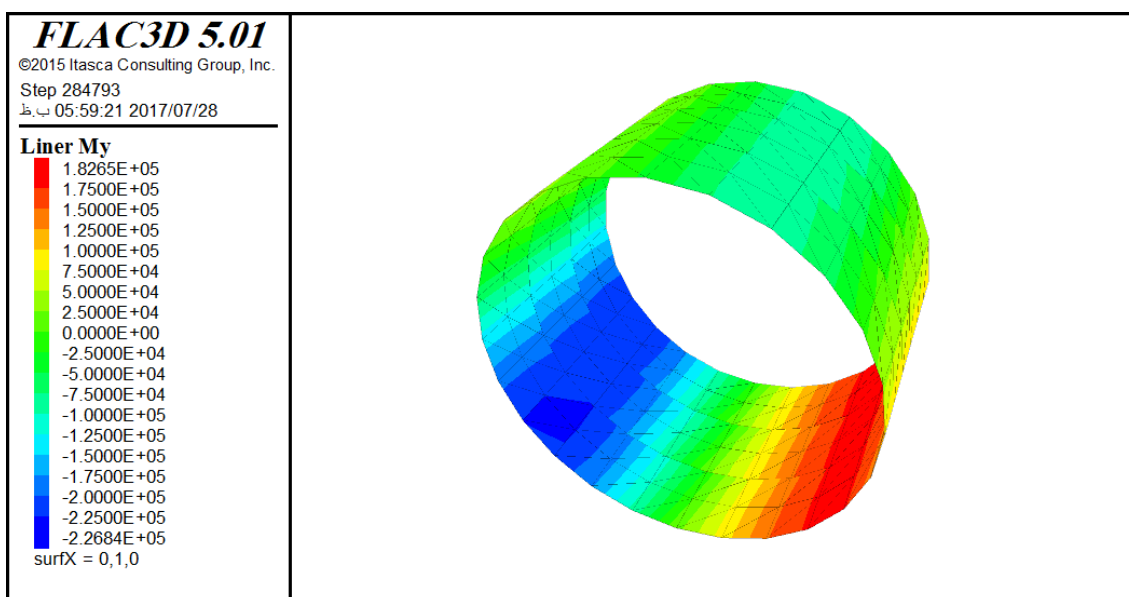
شکل ۳۹- کنتور نیروی محوری پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



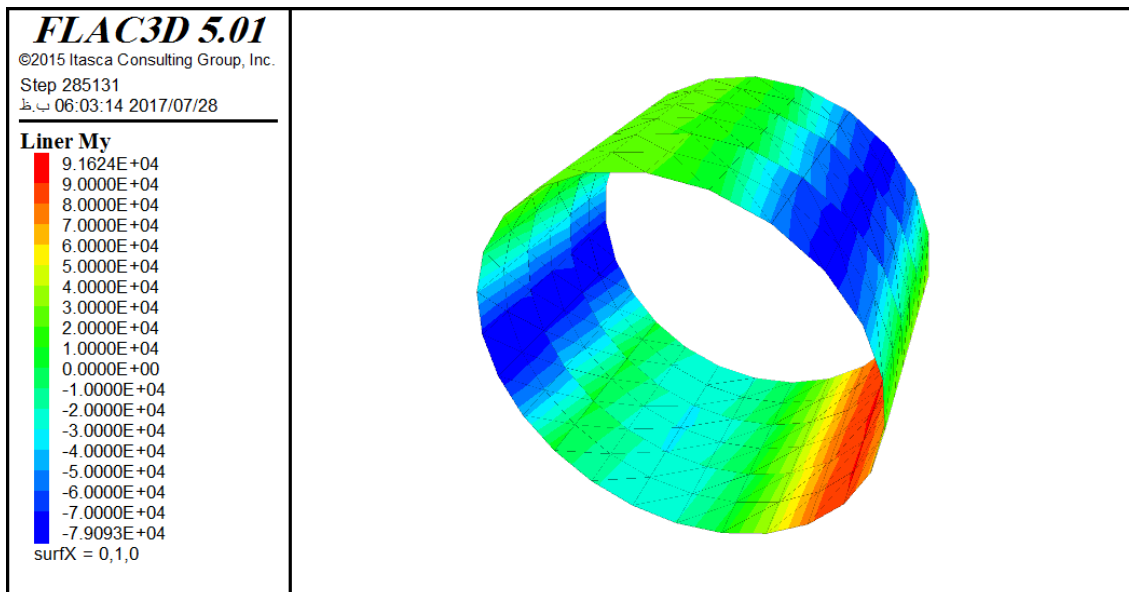
شکل ۴۰- کنتور نیروی محوری پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



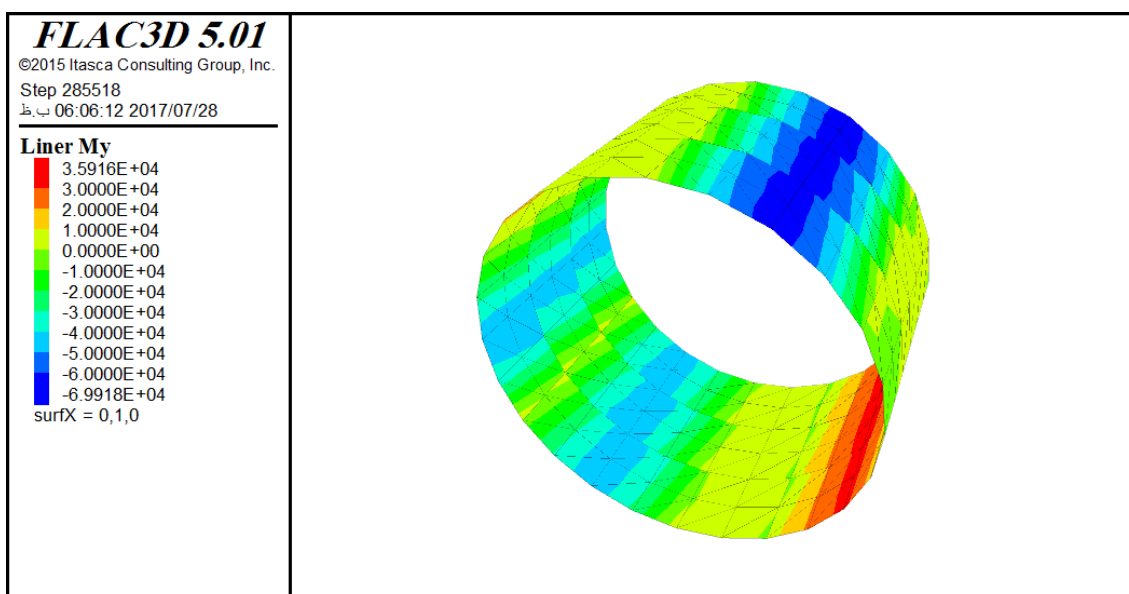
شکل ۴۱- کنتور نیروی محوری پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



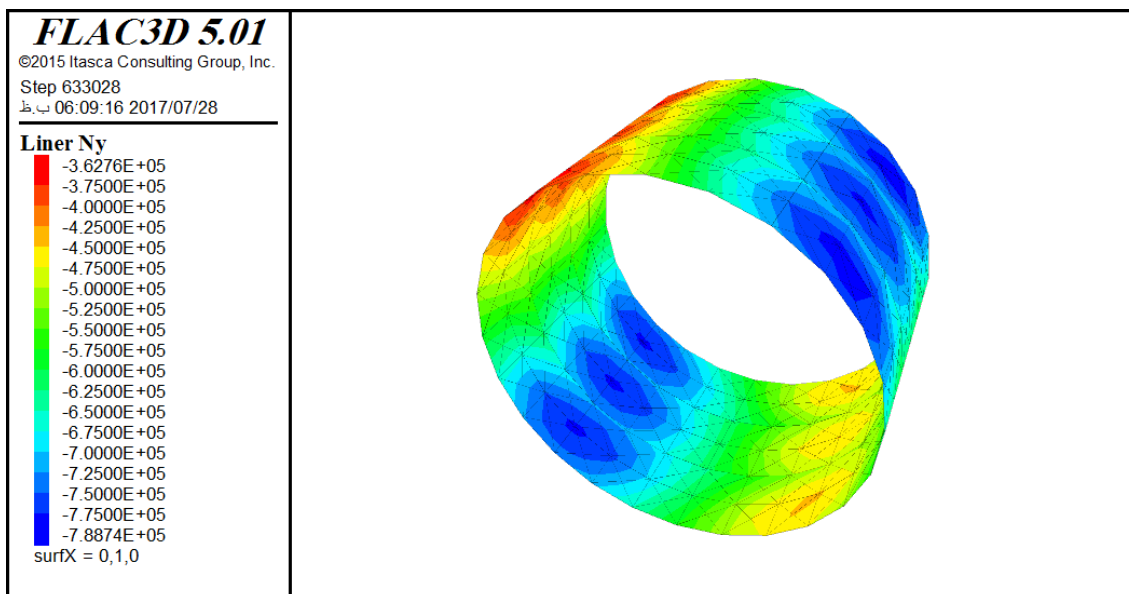
شکل ۴۲- کنتور نیروی محوری پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



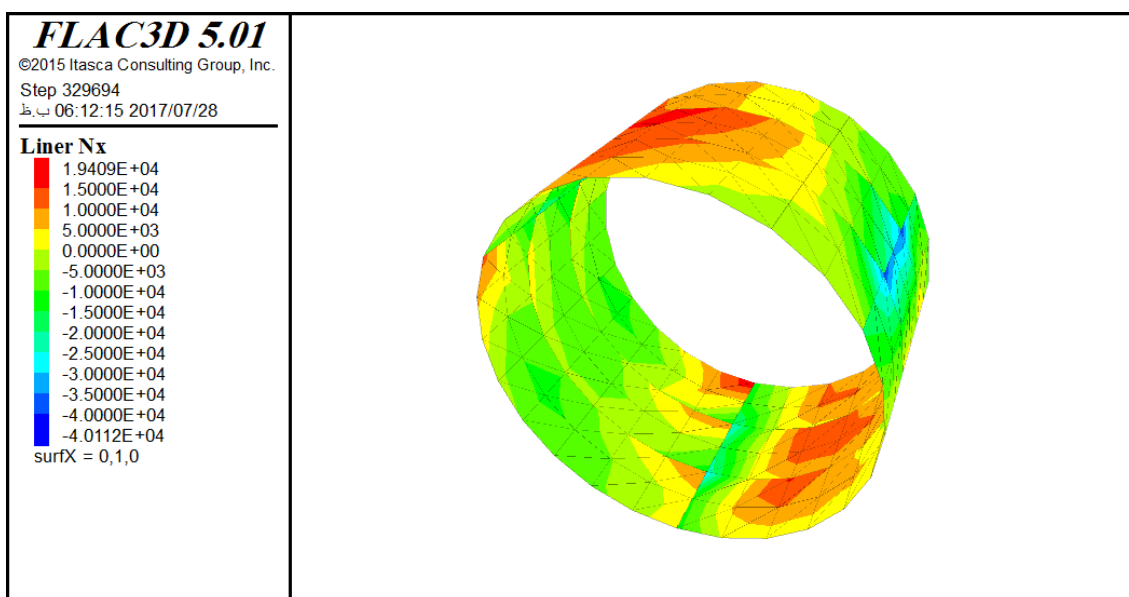
شکل ۴۳- کنتور نیروی محوری پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



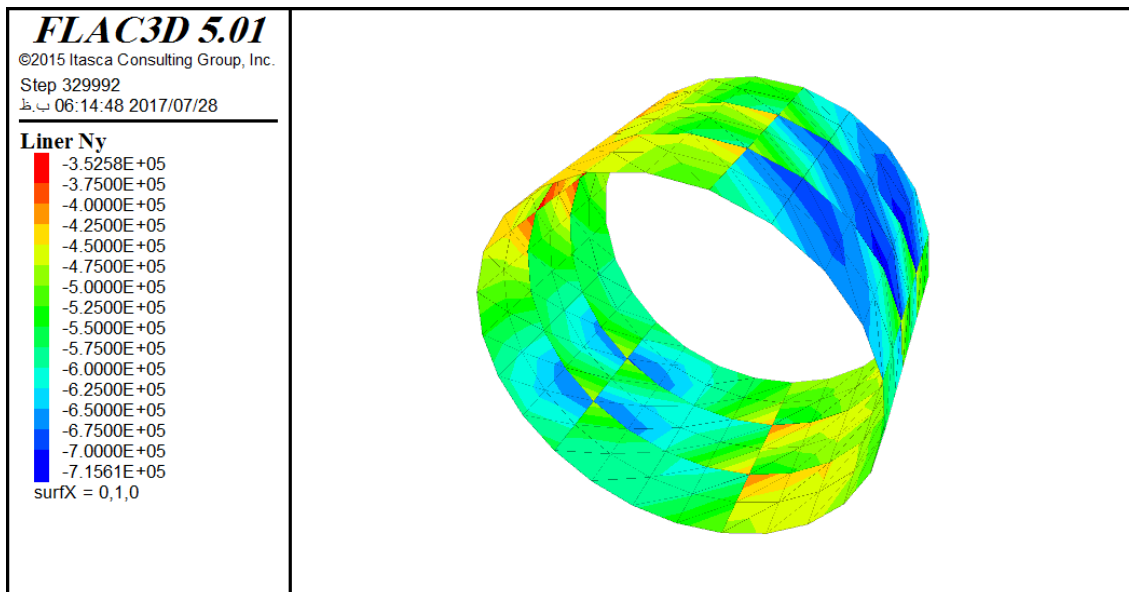
شکل ۴۴- کنتور نیروی محوری پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



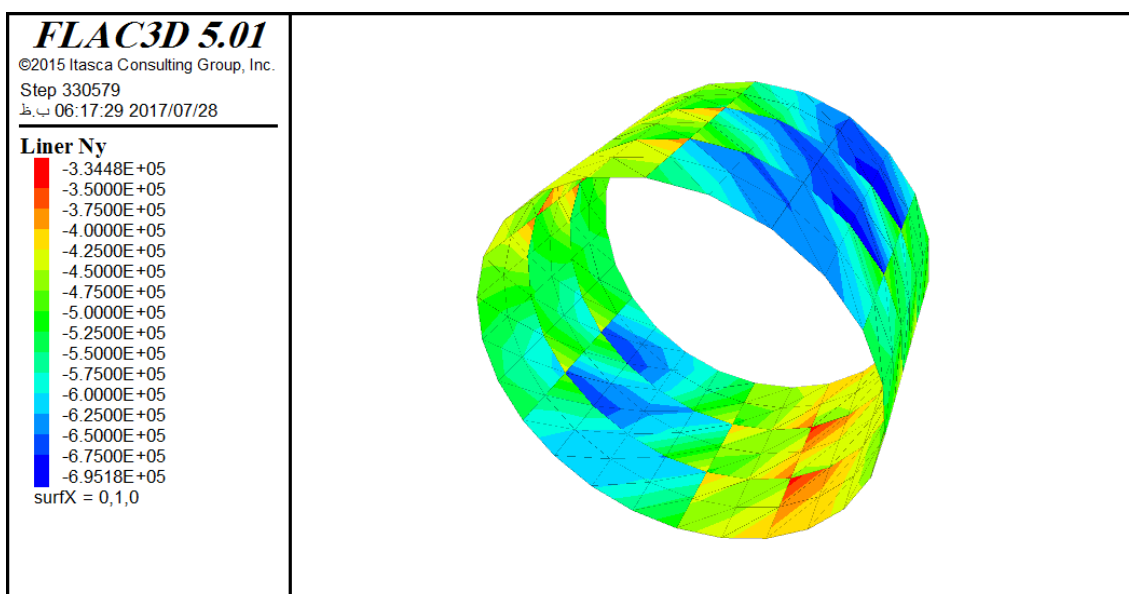
شکل ۴۵- کنتور نیروی محوری پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



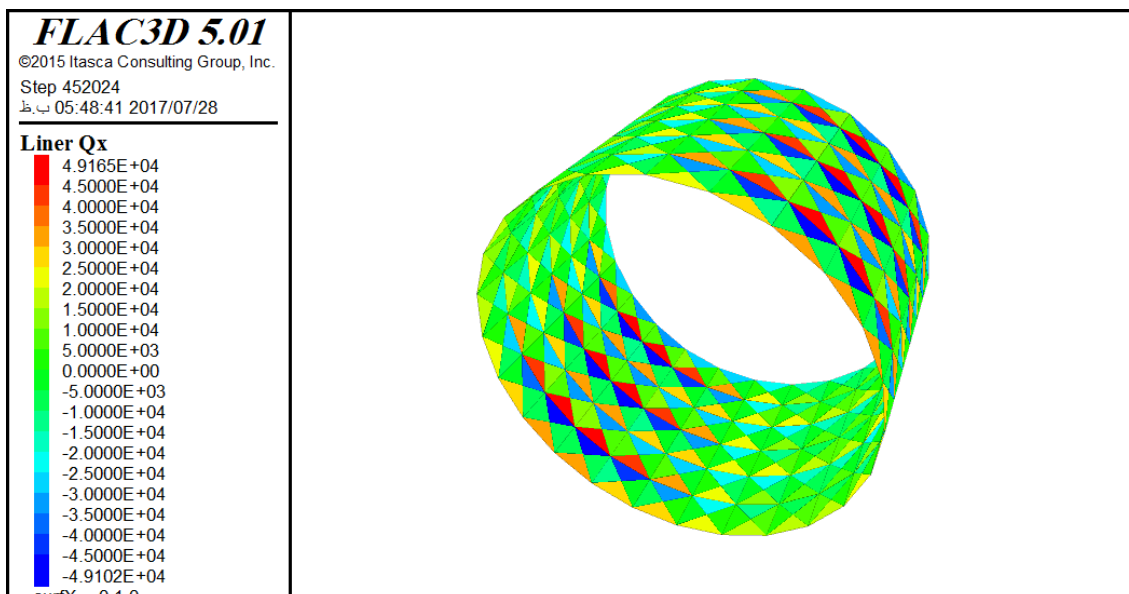
شکل ۴۶- کنتور نیروی محوری پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



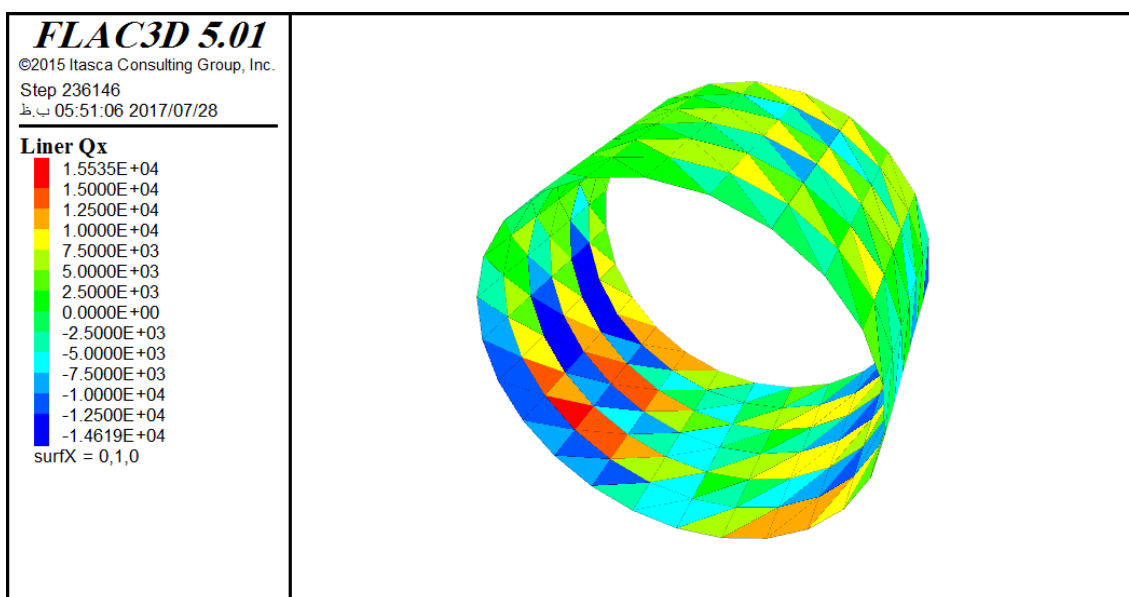
شکل ۴۷- کنتور نیروی محوری پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



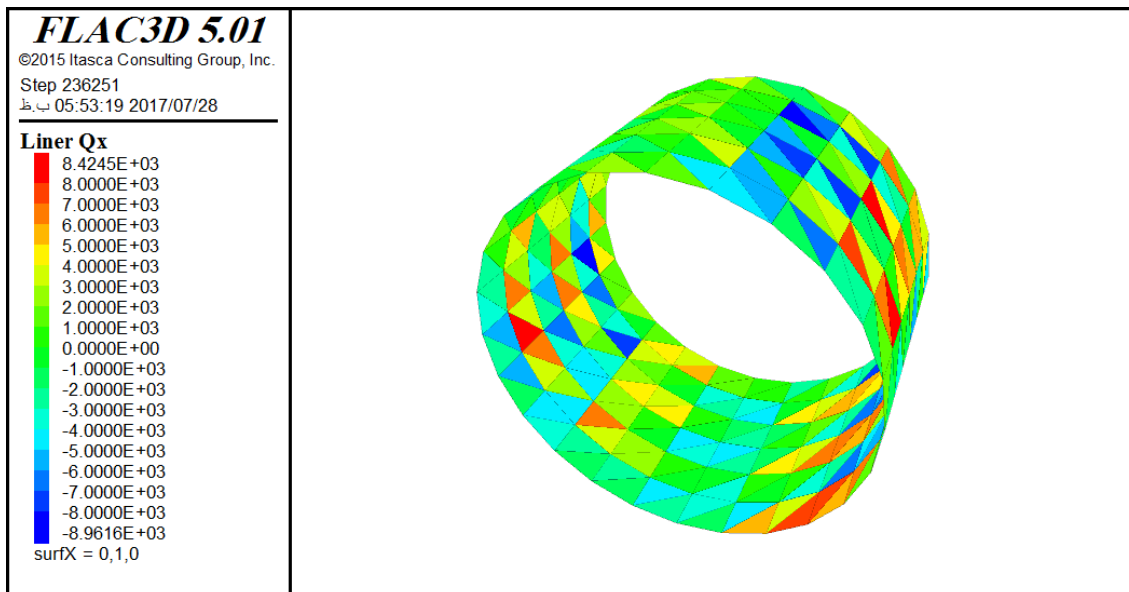
شکل ۴۸- کنتور نیروی محوری پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



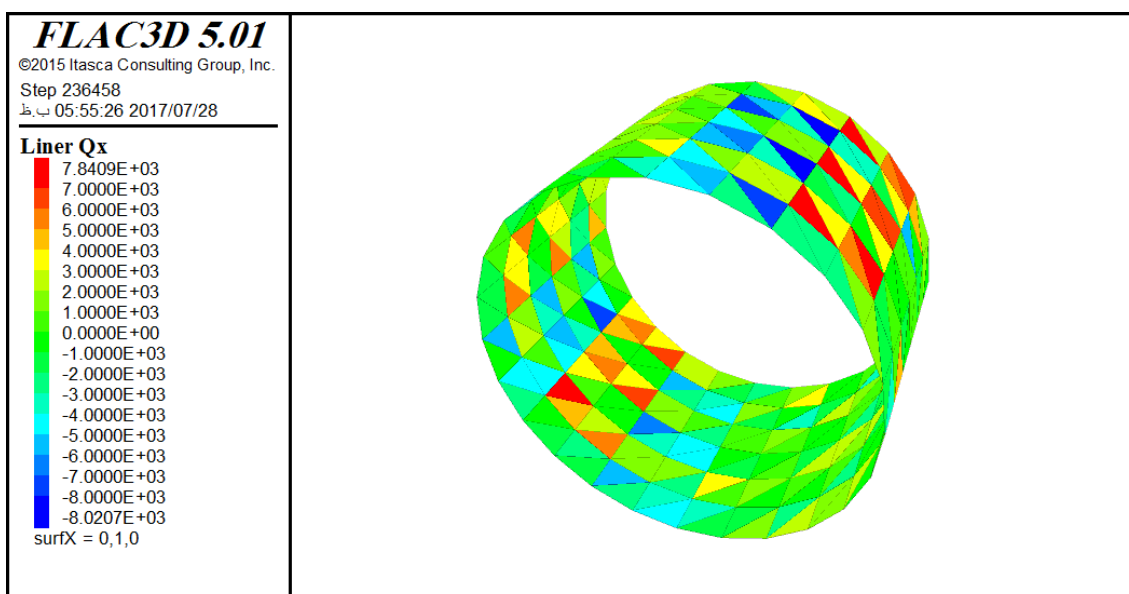
شکل ۴۹- کنتور نیروی برشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



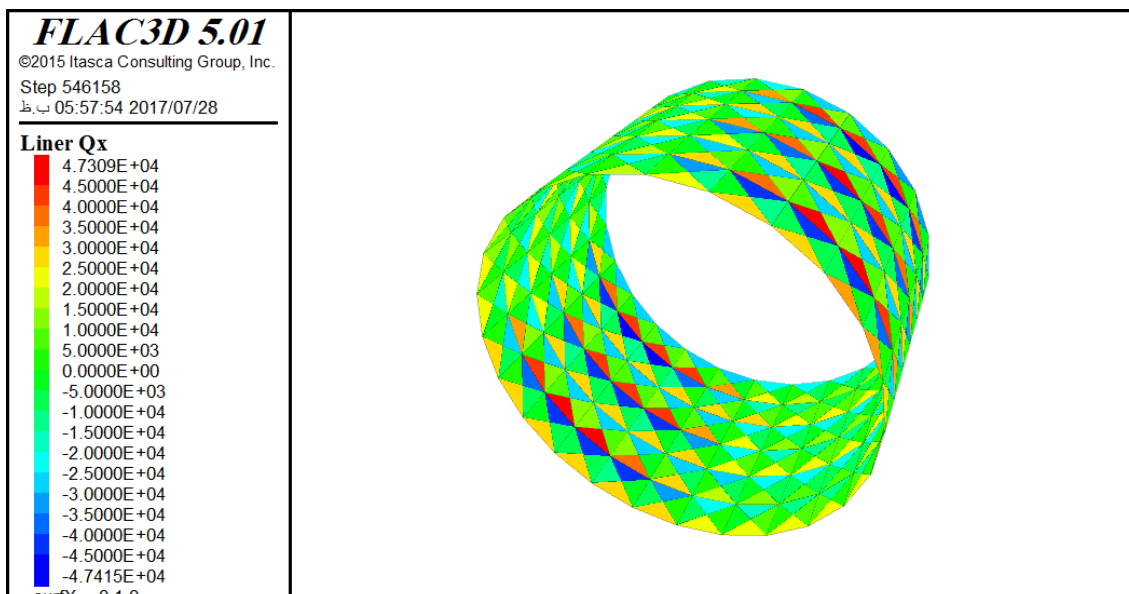
شکل ۵۰- کنتور نیروی برشی پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



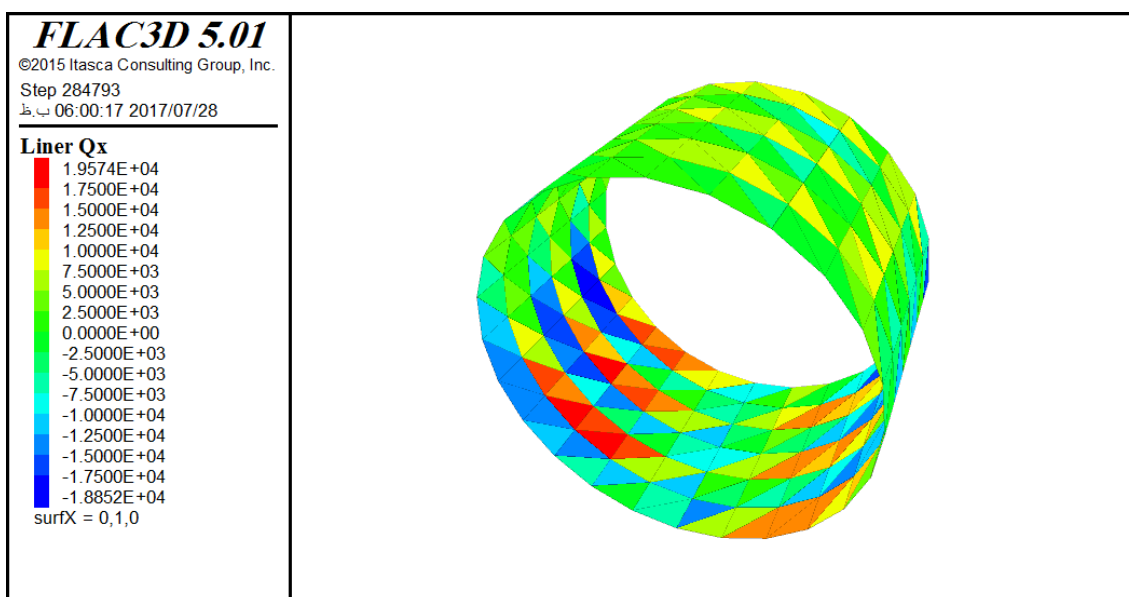
شکل ۵۱- کنتور نیروی برشی پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



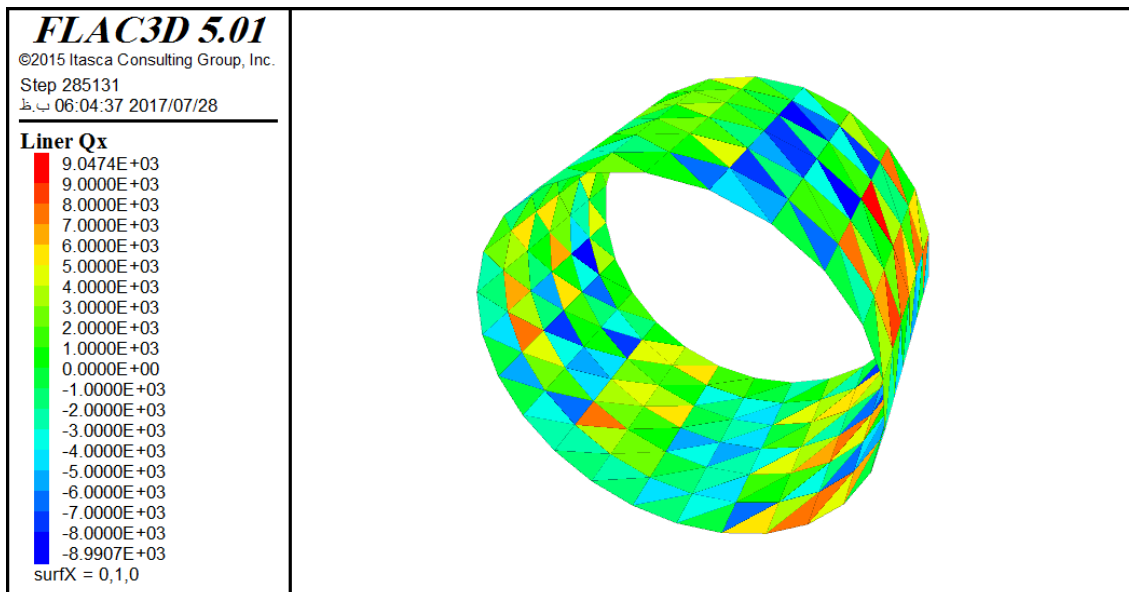
شکل ۵۲- کنتور نیروی برشی پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۳۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



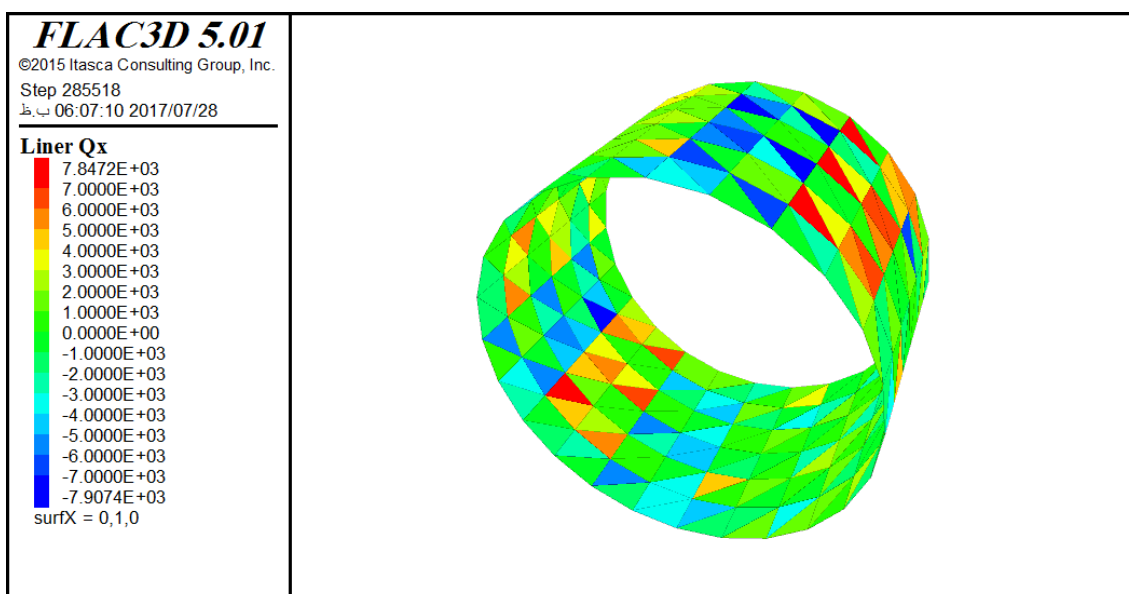
شکل ۵۳- کنتور نیروی برشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



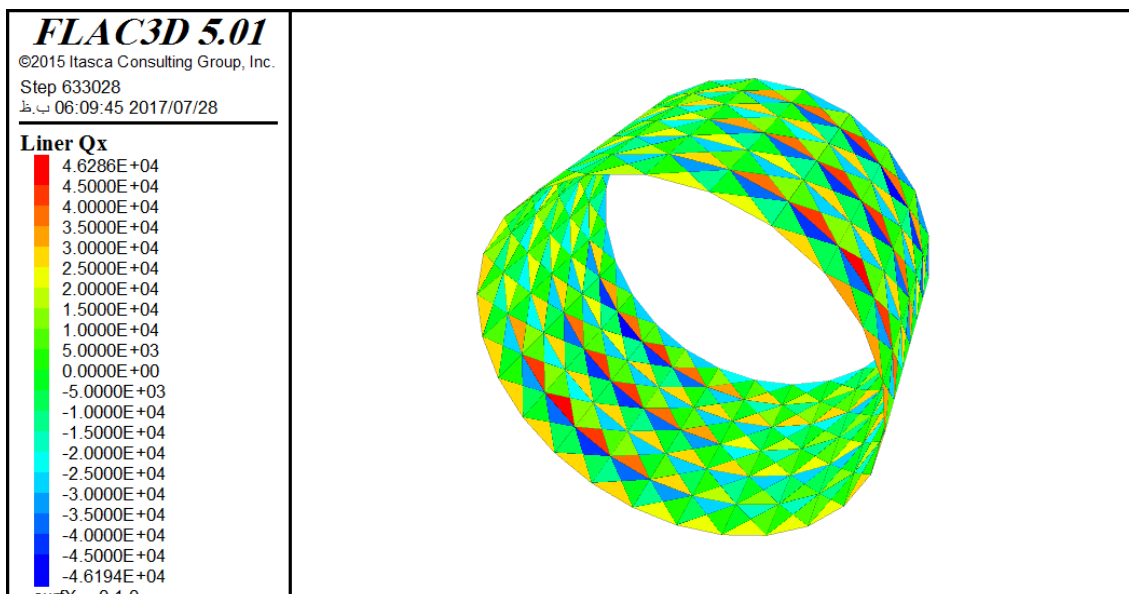
شکل ۵۴- کنتور نیروی برشی پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



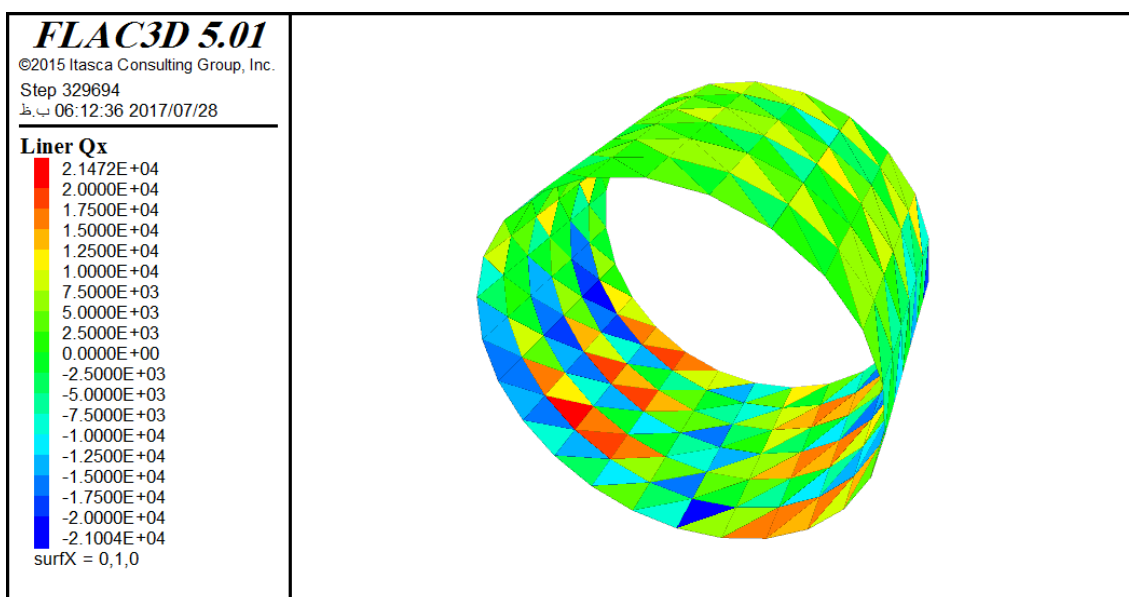
شکل ۵۵- کنتور نیروی برشی پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



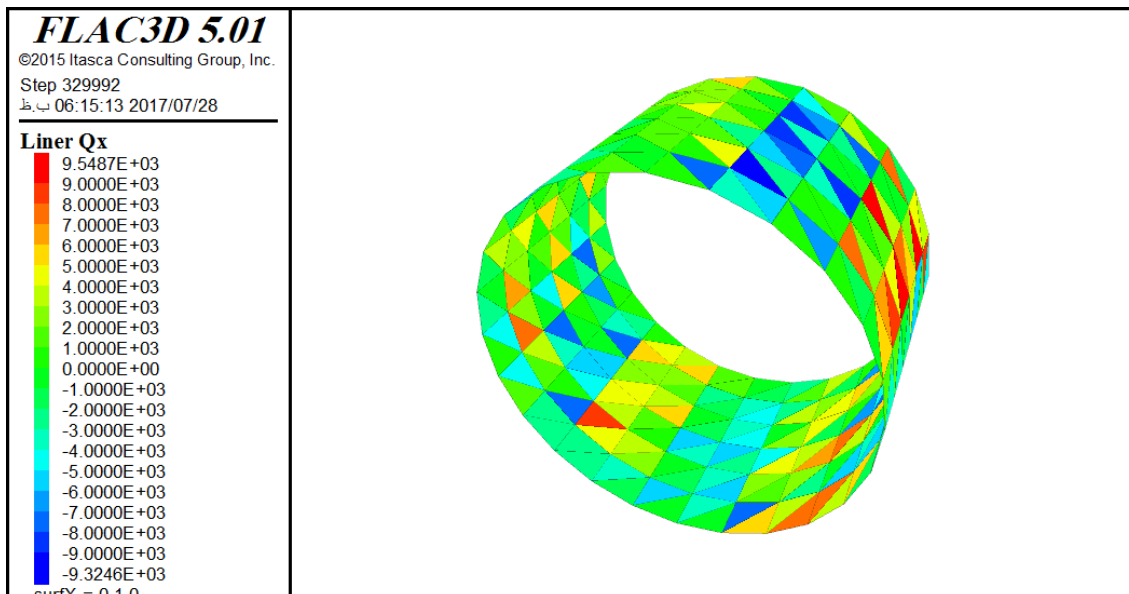
شکل ۵۶- کنتور نیروی برشی پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۴۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



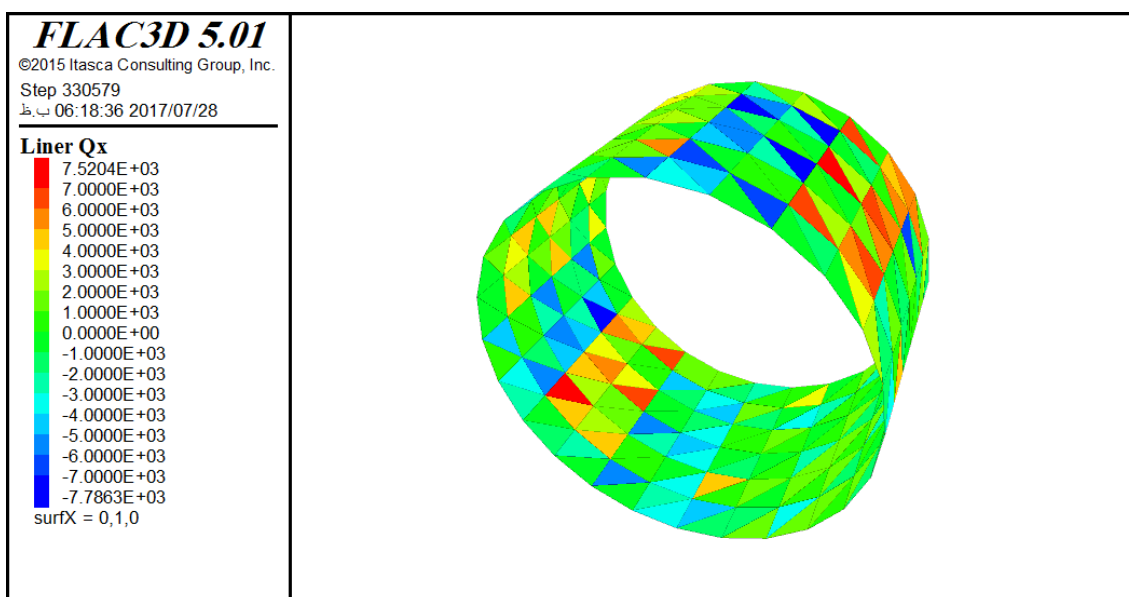
شکل ۵۷- کنتور نیروی برشی پوشش بتنی پیوسته با ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



شکل ۵۸- کنتور نیروی برشی پوشش با ۳ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



شکل ۵۹- کنتور نیروی برشی پوشش با ۵ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم



شکل ۶۰- کنتور نیروی برشی پوشش با ۷ قطعه بتنی و ضخامت ۵۰ سانتی‌متر برای خاک GW غیر متراکم

کد FLAC3D

کد کامپیوتری نرم‌افزار FLAC3D برای نمونه مدلی با پوشش نگهداری پیوسته و برای ۳ ثانیه ابتدایی زمین‌لرزه در ادامه ارائه شده است.

✓ فایل اول با نام Model.f3dat :

```
;Model.f3dat
new
set fish autocreate on
title
GW - Loose Model for Continuous Lining - Full Slip Case
define _mod_param
; Geometry
global rad_ = 3.3
global width_ = 4.2
; Ground Mass Properties
global E_m_ = 320e6
global nu_m_ = 0.3
global bulk_ = (E_m_)/(3.*(1-2.*nu_m_))
global shear_ = (E_m_)/(2.*(1+nu_m_))
global Fric_ = 40
global coh_m_ = 0
global Density_m = 2153
; Liner Properties
global E_s_ = 25e9
global nu_s_ = 0.15
global thick_ = 0.3
global width_s_ = 1.4
global Density_s = 2200
global no_slip = 0 ; no-slip case
global coh_ = 1e20 ; no-slip case
; global no_slip = 0 ; full-slip case
; global coh_ = 0 ; full-slip case
end
@_mod_param

def _mod_setup
local nsize = 0.5*pi*rad_/6
local delzmin = 7*1.05 ; approx. zone thickness at tunnel surface
global lk_ = 100*( (bulk_ + (4.0/3.0)*shear_)/delzmin )
end
@_mod_setup

; Create the ground mass (zones).
gen zone radcyl size 5 6 6 12 rat 1 1 1 1.01 &
p0 0 0 0 p1 30 0 0 p2 0 4.2 0 p3 0 0 15 dim @rad_ @rad_ @rad_ @rad_ fill
gen zone reflect dip 90 dd 90 origin 0 0 0
```

```

gen zone reflect dip 0 dd 0 origin 0 0 0
model mech mohr
prop bul @bulk_shea @shear_friction @Fric_coh @coh_m_
ini density @Density_m
set gravity 0 0 -10
;
; Specify boundary conditions.
fix x range x 29.9 30.1
fix x range x -29.9 -30.1
fix y range y -0.1 0.1
fix y range y 4.19 4.21
fix z range z -14.9 -15.1
;
; Histories
history add id 1 unbal
history nstep 20
save pre
solve
def titletext
local tmp = "GW - Loose Model for Continuous Lining"
titletext = tmp + " - First Steady State"
end
title @titletext
save First_state
restore First_state
ini xvel=0 yvel=0 zvel=0
ini xdisp=0 ydisp=0 zdisp=0
model null range cyl end1 0 0 0 end2 0 14 0 rad 3.3 z -3.3 3.3
; Create the support (linerSELS).
sel liner id=1 crossdiag elemtype dkt_cst range cyl end1 0 0 0 end2 0 1.4 0 rad 3.3
sel liner id=2 crossdiag elemtype dkt_cst range cyl end1 0 1.4 0 end2 0 2.8 0 rad 3.3
sel liner id=3 crossdiag elemtype dkt_cst range cyl end1 0 2.8 0 end2 0 4.2 0 rad 3.3
sel liner prop iso=(@E_s_, @nu_s_) thick=@thick_ ...
cs_nk @lk_cs_sk @lk_cs_scoh @coh_density @Density_s cs_ncut=4e6
cs_sfric=20.0
cycle 0
;
call liner
hist add sel recover sres my surfx 0 1 0 id = @cid0
hist add sel recover sres my surfx 0 1 0 id = @cid45
hist add sel recover sres my surfx 0 1 0 id = @cid90
hist add sel recover sres my surfx 0 1 0 id = @cid135
hist add sel recover sres my surfx 0 1 0 id = @cid180
hist add sel recover sres my surfx 0 1 0 id = @cid225
hist add sel recover sres my surfx 0 1 0 id = @cid270
hist add sel recover sres my surfx 0 1 0 id = @cid315
hist add sel recover sres my surfx 0 1 0 id = @cid360
hist add sel recover sres ny surfx 0 1 0 id = @cid0
hist add sel recover sres ny surfx 0 1 0 id = @cid45

```

```

hist add sel recover sres ny surfx 0 1 0 id = @cid90
hist add sel recover sres ny surfx 0 1 0 id = @cid135
hist add sel recover sres ny surfx 0 1 0 id = @cid180
hist add sel recover sres ny surfx 0 1 0 id = @cid225
hist add sel recover sres ny surfx 0 1 0 id = @cid270
hist add sel recover sres ny surfx 0 1 0 id = @cid315
hist add sel recover sres ny surfx 0 1 0 id = @cid360
hist add sel recover sres qx surfx 0 1 0 id = @cid0
hist add sel recover sres qx surfx 0 1 0 id = @cid45
hist add sel recover sres qx surfx 0 1 0 id = @cid90
hist add sel recover sres qx surfx 0 1 0 id = @cid135
hist add sel recover sres qx surfx 0 1 0 id = @cid180
hist add sel recover sres qx surfx 0 1 0 id = @cid225
hist add sel recover sres qx surfx 0 1 0 id = @cid270
hist add sel recover sres qx surfx 0 1 0 id = @cid315
hist add sel recover sres qx surfx 0 1 0 id = @cid360
solve
def titletext
local tmp = "GW - Loose Model for Continuous Lining"
titletext = tmp + " - Second Steady State Tunnel Excavated"
end
title @titletext
save Tunnel_excavated
restore Tunnel_excavated
ini xdisp=0 ydisp=0 zdisp=0
sel node ini xdisp=0 ydisp=0 zdisp=0
config dynamic
set dy on
set dyn time 0.0
;Dynamic Boundry Condition
range name bottom z=-14.9 -15.1
apply nquiet squiet dquiet ran z -15
fix z ran z -14.9 -15.1
apply ff
fix z ran z -14.9 -15.1
set dy damp rayleigh 0.01 1.1 mass ;Set Damping Parameters
hist dytime ;1
; Apply Shear Stress due to El Centro Eartquake
table 1 0 0
table 1 0.01 -143.157224
table 1 0.02 -207.431896
table 1 0.03 -283.392872
table 1 0.04 -452.84428
table 1 0.05 -718.707696
table 1 0.06 -972.884808
table 1 0.07 -1110.19888
table 1 0.08 -1130.649912
table 1 0.09 -1165.708824
table 1 0.1 -1341.003384

```

table 1 0.11 -1659.455168
table 1 0.12 -1960.377496
table 1 0.13 -2077.240536
table 1 0.14 -2150.279936
table 1 0.15 -2243.770368
table 1 0.16 -2278.82928
table 1 0.17 -2343.103952
table 1 0.18 -2533.006392
table 1 0.19 -2839.771872
table 1 0.2 -3272.16512
table 1 0.21 -3467.910712
table 1 0.22 -3073.497952
table 1 0.23 -2588.516336
table 1 0.24 -2506.712208
table 1 0.25 -2641.104704
table 1 0.26 -2953.713336
table 1 0.27 -3587.695328
table 1 0.28 -4545.972256
table 1 0.29 -5457.503968
table 1 0.3 -5951.250312
table 1 0.31 -6231.721608
table 1 0.32 -6500.5066
table 1 0.33 -6760.526864
table 1 0.34 -6818.958384
table 1 0.35 -6482.977144
table 1 0.36 -5752.583144
table 1 0.37 -4805.99252
table 1 0.38 -3502.969624
table 1 0.39 -2033.416896
table 1 0.4 -902.766984
table 1 0.41 35.058912
table 1 0.42 931.982744
table 1 0.43 1788.004512
table 1 0.44 2600.20264
table 1 0.45 3587.695328
table 1 0.46 4960.836048
table 1 0.47 6719.6248
table 1 0.48 8866.98316
table 1 0.49 11017.2631
table 1 0.5 12790.65973
table 1 0.51 14187.17306
table 1 0.52 15399.6271
table 1 0.53 16626.68902
table 1 0.54 17593.73067
table 1 0.55 18020.28077
table 1 0.56 17906.3393
table 1 0.57 17251.90628
table 1 0.58 16059.90327
table 1 0.59 14327.4087

table 1 0.6 12054.42258
table 1 0.61 10134.94714
table 1 0.62 9460.063088
table 1 0.63 10032.69198
table 1 0.64 11849.91226
table 1 0.65 14911.7239
table 1 0.66 19221.0485
table 1 0.67 23536.21626
table 1 0.68 26618.47894
table 1 0.69 29128.11272
table 1 0.7 31722.47221
table 1 0.71 34398.63582
table 1 0.72 37092.3289
table 1 0.73 39742.19833
table 1 0.74 42415.44037
table 1 0.75 45176.32969
table 1 0.76 48428.04378
table 1 0.77 51372.99238
table 1 0.78 52813.32935
table 1 0.79 52749.05468
table 1 0.8 51180.16837
table 1 0.81 48106.67042
table 1 0.82 43528.56082
table 1 0.83 37445.83959
table 1 0.84 30875.21517
table 1 0.85 24839.23915
table 1 0.86 19332.06839
table 1 0.87 14362.46762
table 1 0.88 9921.672096
table 1 0.89 5521.77864
table 1 0.9 669.040904
table 1 0.91 -3765.911464
table 1 0.92 -6906.605664
table 1 0.93 -8755.963272
table 1 0.94 -9311.062712
table 1 0.95 -8574.82556
table 1 0.96 -6547.251816
table 1 0.97 -3225.419904
table 1 0.98 1387.7486
table 1 0.99 7295.175272
table 1 1 14493.93854
table 1 1.01 22984.03839
table 1 1.02 31138.15701
table 1 1.03 37328.97655
table 1 1.04 41553.57545
table 1 1.05 43811.9537
table 1 1.06 44104.1113
table 1 1.07 42430.04825
table 1 1.08 38792.68613

table 1 1.09 33189.10336
table 1 1.1 25619.29994
table 1 1.11 18020.28077
table 1 1.12 12323.20757
table 1 1.13 8531.00192
table 1 1.14 6640.742248
table 1 1.15 6655.350128
table 1 1.16 8574.82556
table 1 1.17 12396.24697
table 1 1.18 18122.53593
table 1 1.19 25750.77086
table 1 1.2 30103.9191
table 1 1.21 25993.26167
table 1 1.22 18616.28227
table 1 1.23 13164.62146
table 1 1.24 9638.279224
table 1 1.25 8037.255576
table 1 1.26 8364.472088
table 1 1.27 8744.276968
table 1 1.28 7312.704728
table 1 1.29 4066.833792
table 1 1.3 -993.33584
table 1 1.31 -6696.252192
table 1 1.32 -11870.36329
table 1 1.33 -16296.55093
table 1 1.34 -19755.69691
table 1 1.35 -22253.64439
table 1 1.36 -23784.55022
table 1 1.37 -24351.33596
table 1 1.38 -23954.00162
table 1 1.39 -23433.9611
table 1 1.4 -23632.62826
table 1 1.41 -24550.00313
table 1 1.42 -26115.96786
table 1 1.43 -28257.48307
table 1 1.44 -30974.54875
table 1 1.45 -33323.49586
table 1 1.46 -34354.81218
table 1 1.47 -34068.49774
table 1 1.48 -32467.47409
table 1 1.49 -30828.46995
table 1 1.5 -30431.13562
table 1 1.51 -31272.5495
table 1 1.52 -32146.10073
table 1 1.53 -31851.02155
table 1 1.54 -30387.31198
table 1 1.55 -27749.12885
table 1 1.56 -23942.31532
table 1 1.57 -20126.73706

table 1 1.58 -17459.33818
table 1 1.59 -15940.11866
table 1 1.6 -15569.0785
table 1 1.61 -14762.72353
table 1 1.62 -11928.79481
table 1 1.63 -7073.135496
table 1 1.64 -2348.947104
table 1 1.65 81.804128
table 1 1.66 222.039776
table 1 1.67 -1931.161736
table 1 1.68 -6377.800408
table 1 1.69 -10935.45897
table 1 1.7 -13427.5633
table 1 1.71 -13854.11339
table 1 1.72 -12215.10926
table 1 1.73 -10500.14414
table 1 1.74 -10690.04658
table 1 1.75 -12787.73815
table 1 1.76 -16796.14042
table 1 1.77 -20895.11155
table 1 1.78 -23264.50969
table 1 1.79 -23907.25641
table 1 1.8 -23948.15847
table 1 1.81 -24514.94422
table 1 1.82 -25610.53522
table 1 1.83 -27232.0099
table 1 1.84 -28461.99339
table 1 1.85 -28388.95399
table 1 1.86 -27012.8917
table 1 1.87 -25408.94647
table 1 1.88 -24658.10144
table 1 1.89 -24538.31682
table 1 1.9 -24824.63127
table 1 1.91 -25517.04478
table 1 1.92 -25639.75098
table 1 1.93 -24211.10031
table 1 1.94 -21234.01437
table 1 1.95 -16705.57157
table 1 1.96 -11998.91263
table 1 1.97 -8481.335128
table 1 1.98 -6155.760632
table 1 1.99 -5022.189144
table 1 2 -5080.620664
table 1 2.01 -5264.679952
table 1 2.02 -4510.913344
table 1 2.03 -3590.616904
table 1 2.04 -3278.008272
table 1 2.05 -3578.9306
table 1 2.06 -3669.499456

table 1 2.07 -2740.438288
table 1 2.08 -791.747096
table 1 2.09 2179.495696
table 1 2.1 6173.290088
table 1 2.11 11186.7145
table 1 2.12 17219.76894
table 1 2.13 23092.1367
table 1 2.14 27620.5795
table 1 2.15 30805.09734
table 1 2.16 32642.76865
table 1 2.17 33136.51499
table 1 2.18 32286.33638
table 1 2.19 30089.31122
table 1 2.2 26548.36111
table 1 2.21 23045.39149
table 1 2.22 20956.46465
table 1 2.23 20287.42374
table 1 2.24 19571.63762
table 1 2.25 17342.47514
table 1 2.26 13599.93628
table 1 2.27 8344.021056
table 1 2.28 1574.729464
table 1 2.29 -4624.854808
table 1 2.3 -8168.726496
table 1 2.31 -9056.8856
table 1 2.32 -7292.253696
table 1 2.33 -2874.830784
table 1 2.34 972.884808
table 1 2.35 1016.708448
table 1 2.36 -151.921952
table 1 2.37 58.43152
table 1 2.38 1644.847288
table 1 2.39 4613.168504
table 1 2.4 8957.552016
table 1 2.41 14677.99782
table 1 2.42 21777.4275
table 1 2.43 27944.87444
table 1 2.44 30863.52886
table 1 2.45 30539.23393
table 1 2.46 26966.14648
table 1 2.47 22294.54646
table 1 2.48 18674.71379
table 1 2.49 16103.72691
table 1 2.5 14584.50739
table 1 2.51 12700.09087
table 1 2.52 9042.27772
table 1 2.53 3611.067936
table 1 2.54 -2170.730968
table 1 2.55 -6877.389904

table 1 2.56 -10505.9873
table 1 2.57 -13056.52314
table 1 2.58 -14531.91902
table 1 2.59 -15951.80496
table 1 2.6 -18341.65413
table 1 2.61 -21701.46653
table 1 2.62 -25108.02414
table 1 2.63 -27629.34423
table 1 2.64 -29265.42679
table 1 2.65 -30022.11498
table 1 2.66 -29896.48721
table 1 2.67 -30247.07633
table 1 2.68 -32438.25833
table 1 2.69 -36472.95478
table 1 2.7 -40440.45499
table 1 2.71 -42441.73455
table 1 2.72 -42476.79346
table 1 2.73 -40542.71015
table 1 2.74 -38041.8411
table 1 2.75 -36379.46435
table 1 2.76 -35552.65834
table 1 2.77 -35561.42307
table 1 2.78 -35485.4621
table 1 2.79 -34401.5574
table 1 2.8 -32309.70898
table 1 2.81 -29206.99527
table 1 2.82 -25099.25942
table 1 2.83 -19983.57984
table 1 2.84 -15051.95955
table 1 2.85 -11508.08786
table 1 2.86 -9346.121624
table 1 2.87 -8568.982408
table 1 2.88 -8247.609048
table 1 2.89 -7450.0188
table 1 2.9 -6179.13324
table 1 2.91 -4826.443552
table 1 2.92 -3783.44092
table 1 2.93 -2921.576
table 1 2.94 -2118.1426
table 1 2.95 -2091.848416
table 1 2.96 -2705.379376
table 1 2.97 -3278.008272
table 1 2.98 -3976.264936
table 1 2.99 -4414.501336
table 1 3 -4215.834168
apply sxz 1 his table 1 syz 0.0 szz 0.0 range nrange bottom
hist add gp xacc 0 2.1 15
hist add gp xvel 0 2.1 5
hist add gp xvel 0 2.1 10

```

hist add gp xvel 0 2.1 15
hist add gp zdisp 30 2.1 -15
solve age=15
def titletext
local tmp = "GW - Loose Model for Continuous Lining"
titletext = tmp + " - After Earthquake Dynamic Load"
end
title @titletext
save dynamic_tunnel
return

```

✓ فایل دوم با نام : liner.f3dat

```

;liner.f3dat
def _responses
R = rad_
sp0 = s_near(3.3, 2.1, 0)
cid0 = s_cid(sp0)
sp45 = s_near(rad_* cos(pi/4) , 2.1, rad_* sin(pi/4))
cid45 = s_cid(sp45)
sp90 = s_near(rad_* cos(pi/2) , 2.1, rad_* sin(pi/2))
cid90 = s_cid(sp90)
sp135 = s_near(rad_* cos(3.*pi/4) , 2.1, rad_* sin(3.*pi/4))
cid135 = s_cid(sp135)
sp180 = s_near(rad_* cos(pi) , 7, rad_* sin(pi))
cid180 = s_cid(sp180)
sp225 = s_near(rad_* cos(5.*pi/4) , 2.1, rad_* sin(5.*pi/4))
cid225 = s_cid(sp225)
sp270 = s_near(rad_* cos(3.*pi/2) , 2.1, rad_* sin(3.*pi/2))
cid270 = s_cid(sp270)
sp315 = s_near(rad_* cos(7.*pi/4) , 2.1, rad_* sin(7.*pi/4))
cid315 = s_cid(sp315)
sp360 = s_near(rad_* cos(2.*pi) ,2.1, rad_* sin(2.*pi))
cid360 = s_cid(sp360)
end
@_responses

```

در این کدها فقط فایل Model.f3dat اجرا می شود و فایل دوم بطور خودکار از فایل اول فراخوانی خواهد شد.

Abstract :

Nowadays, considering the increasing trend of world population, as well as the need to move and transport people in urban environments, application of underground structures is increasing day by day. In order to transport people under the ground, underground trains (subways) are utilized which move through tunnels excavated by machined methods. Also in Iran, these tunnels have been used in metropolises such as Tehran, Mashhad, Tabriz, Shiraz, etc. In these tunnels, precast concrete segments are used as linings.

One of the factors that causes the axial and shear forces as well as the bending moment in the tunnel concrete lining is earthquake. Despite the fact that the tunnels have high security against the structures constructed on the ground, the recent damages caused by the earthquake to some of these tunnels highlighted the need for considering a dynamic load when designing underground structures.

Due to the fact that Iran is considered as one of the seismic countries in the world, study of the stability of these tunnels against earthquake loads is of particular importance. Various factors affect the amount of damage caused by earthquake, including the frequency content of earthquake waves, the parameters of tunnel environment and protective lining of tunnel, as well as its dimensions.

The purpose of this study was to investigate the parameters related to the tunnel environment by numerical methods, and compare these results with analytical methods. For this purpose, the effect of environmental parameters of the tunnel on the performance and response of concrete segments of tunnel lining under seismic loading has been investigated. In this regard, numerical analysis were carried out in different soil environments by finite difference method and using FLAC3D software. The FLAC3D software is capable of modeling the behavior of structures constructed in soil, stone and other materials that may show non-linear behavior.

In order to investigate the research topic, the dynamic response of concrete segments based on axial force, shear force and bending momentum has been studied and a comparison between the results of numerical modeling with analytical methods is presented which has been developed for continuous lining.

Generally, the results of the research show that with increase in deformation modulus and the internal friction angle of soil, the amount of maximum bending moment increases, the maximum axial force is first reduced and then increased and shear force increases. By increasing the thickness of the lining, the bending moment of the tunnel is significantly increased, but no change happens in the axial force and maximum shear force. Also, with the increase in the number of concrete segments of the lining, the maximum bending moment, axial force and maximum shear force are reduced.

Keywords: Dynamic Analysis, Numerical Methods, Tunnel, Precast Concrete Segments, Earthquake



Shahrood University of Technology
Faculty of Mining, petroleum and Geophysics Engineering

M.Sc. Thesis in Mineral Tunnel and underground spaces

**Numerical assessment of influence of soil
parameters on the seismic response of concrete
segmental tunnel lining**

**By:
Alireza Jangi**

**Supervisor :
Dr. Majid Nikkhah**

August 2017