



پیشنهاد طرح بهینه در دیوارهای حائل مسلح شده با ژئوگرید با استفاده از مدل‌سازی نرم افزاری

وحید حیدری^۱، بهنام اسدی^۲، بهروز حلیمی^۳

۱- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد زنجان

۲- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، مدرس دانشگاه آزاد اسلامی واحد همدان

۳- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، مدرس دانشگاه ملایر

behnam.asadi.ce@gmail.com

چکیده

یکی از روش‌های تثبیت مکانیکی و مقاوم سازی خاکها استفاده از عناصر کششی نظیر نوارهای فلزی، ژئوتکستایل و یا ژئوگرید می باشد. طی ۴۰ سال اخیر بسیاری از سازه های ژئوتکنیکی نظیر دیوارهای حائل و خاکریزها در سراسر جهان با استفاده از تکنیک خاک مسلح ساخته شده و به خوبی عمل کرده اند. برتری ژئوگریدها نسبت به سایر مسلح کننده ها، دیوارهای خاکی مسلح شده توسط ژئوگریدها به عنوان یکی از گزینه های مهم در طراحی دیوارهای حایل مطرح کرده است. عدم مشکلاتی نظیر خوردگی و زنگ زدگی، رفتار همسوتر با خاک، درگیری بهتر با مصالح و سهولت در اجرا از جمله این برتری هاست. طراحی دیوارهای حائل بر اساس مقدار کل فشار جانبی خاک است که در حالت استاتیکی و در حالت بارگذاری دینامیکی به دیوار وارد می شود. مقدار این نیرو علاوه بر مشخصات بارگذاری، به نحوه تغییر مکان دیوار نیز بستگی دارد. بر این اساس دو نوع فشار جانبی به دیوارها وارد می شود. اولین نوع، فشار جانبی حالت سکون است که در دیوارهایی اتفاق می افتد که به هر علت، جابجایی یا چرخش دیوار میسر نیست. اما دومین نوع فشار جانبی مربوط به حالتی است که دیوار یا به سمت خاک نزدیک می شود و یا از آن دور می شود. این شکل که معمولاً در دیوارهای حائل اتفاق می افتد، به دو حالت فعال و غیر فعال طبقه بندی می شود. فشار جانبی خاک در حالت غیر فعال هنگامی به دیوار وارد می شود که دیوار به خاک نزدیک شود، اما آنچه که عموماً در دیوارها رخ می دهد فاصله گرفتن دیوار از خاک است که باعث تولید فشار جانبی خاک در حالت فعال می شود. در این تحقیق برای تحلیل استاتیکی و دستیابی به دیوار حایل مسلح بهینه از نرم افزار abaqus استفاده شده است و مدل‌های شبیه سازی شده تحت بارگذاری استاتیکی فرار گرفته اند. جهت صحت سنجی در نرم افزار از نتایج روش عددی شبه استاتیکی با رعایت نوع مصالح و بارگذاری استفاده شده است. بارگذاری بصورت یکنواخت صفحه ای بر بالای خاک پشت دیوار اعمال می گردد و پس از بارگذاری نیروهای بدست آمده در لایه های مختلف و همچنین در طول لایه با فاصله های متفاوت از پشت دیوار را بررسی نموده و با دولا به کردن ژئوگرید و تغییر در مقاومت مجاز ژئوگرید مجدداً بارگذاری و آنالیز انجام گردیده و در نهایت طرح بهینه پیشنهاد می گردد.

کلیدواژه: دیوارحایل، خاک مسلح، بار استاتیکی، ژئوگرید

۱. مقدمه

برتری ژئوسینتتیک ها نسبت به سایر مسلح کننده ها، امروزه دیوارهای خاک مسلح ژئوسینتتیکی را به عنوان یکی از گزینه های مهم در طراحی دیوارهای حایل مطرح کرده است. عدم مشکلاتی نظیر خوردگی و زنگ زدگی، رفتار همسوتر با خاک، درگیری بهتر با مصالح و سهولت در اجرا از جمله این برتری هاست. از طرف دیگر مشاهدات در حین زلزله این دیوارها و نیز مطالعات آزمایشگاهی حاکی از رفتار و انعطاف پذیری مناسب آنها است. نتایج آنالیز تعادل حدی مطالعه حاضر نشان می دهد که روش بارگذاری شبه استاتیکی به علت عدم وارد کردن اثر مشخصات بارگذاری باعث طراحی دست بالا و غیراقتصادی شدن دیوار می گردد. همچنین به نظر می رسد که این موضوع یکی از علل سلامت دیوارهایی شده که با وجود عدم دقت در طراحی دینامیکی، زلزله های شدیدی را تجربه کرده اند. با ایجاد برخی تغییرات در طول و فاصله لایه های مسلح کننده و همچنین دو لایه کردن مسلح کننده در قسمت هایی که بیشترین نیرو به آن محل وارد می شود می توان به طرح بهینه ای دست یافت که با استفاده از آن، سازه با صرفه اقتصادی، افزایش پایداری، کارایی بهتر و کاهش زمان ساخت همراه گردد.



۲. طراحی دیوارهای حائل مسلح شده با ژئوگرید

طراحی دیوارهای حائل بر اساس مقدار کل فشار جانبی خاک است که در حالت استاتیکی و در حالت بارگذاری دینامیکی به دیوار وارد می شود. مقدار این نیرو علاوه بر مشخصات بارگذاری، به نحوه تغییر مکان دیوار نیز بستگی دارد. بر این اساس دو نوع فشار جانبی به دیوارها وارد می شود. اولین نوع، فشار جانبی حالت سکون است که در دیوارهایی اتفاق می افتد که به هر علت، جابجایی یا چرخش دیوار میسر نیست. از این نوع دیوارها می توان به دیوارهای زیرزمین و دیوارهای ثابت شده از دو طرف در دال بتنی اشاره کرد.

اما دومین نوع فشار جانبی مربوط به حالتی است که دیوار یا به سمت خاک نزدیک می شود و یا از آن دور می شود. این شکل که معمولاً در دیوارهای حائل اتفاق می افتد، به دو حالت فعال و غیر فعال طبقه بندی می شود. فشار جانبی خاک در حالت غیر فعال هنگامی که دیوار وارد می شود که دیوار به خاک نزدیک شود، اما آنچه که عموماً در دیوارها رخ می دهد فاصله گرفتن دیوار از خاک است که باعث تولید فشار جانبی خاک در حالت فعال می شود. اگر نوع قرار گیری دیوار به گونه ای نباشد که یا ثابت بماند و یا به سمت خاک حرکت کند، مقدار فشار جانبی خاک در حالت فعال مبنای طراحی قرار می گیرد که به صورت معمول در دیوارهای حائل اتفاق می افتد. [۱]

تئوری های مورد استفاده در تعیین فشار جانبی خاک شامل تئوری رانکین (استاتیکی) [۲]، تئوری کولمب (استاتیکی) [۳]، تئوری مونونوبه - اکابه (شبه-استاتیکی). در بیشتر موارد از تئوری مونونوبه-اکابه استفاده می گردد. اکابه در سال ۱۹۲۶ [۴] و مونونوبه و ماتسو در سال ۱۹۲۹ [۵]، مبنای روش آنالیز شبه استاتیکی در تعیین فشار جانبی خاک در حین زلزله را ارائه کردند. تئوری آنها در واقع همان تئوری کولمب بود که تنها دو پارامتر و در معادلاتشان اضافه شده بود. این پارامترها که به ترتیب ضرائب افقی و قائم زلزله خوانده می شوند، نیروی حاصل از زلزله را به صورت ضربی از وزن به سیستم تحمیل می کنند. این نیروها طبق شکل زیر (شکل ۱) در محل مرکز سطح گوه گسیختگی اعمال می شوند. مقدار فشار جانبی خاک در حالت فعال در این روش از روابط زیر بدست می آید:

(۱)

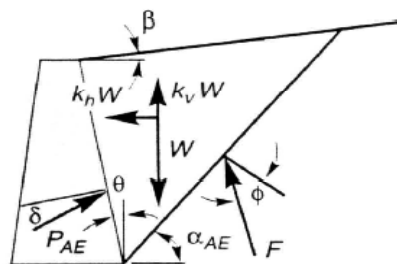
$$P_A = \frac{1}{2} K_{AE} \gamma H^2 (1 - K_v)$$

(۲)

$$K_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta - \psi)}{\cos\varphi \cdot \cos^2\theta \cdot \cos(\varphi + \theta + \psi) \left[1 + \frac{\sin(\varphi + \theta) \sin(\varphi - \theta - \psi)}{\cos(\theta + \psi) \cos(\theta - \varphi)} \right]}$$

$$\psi = \tan^{-1} \left(\frac{K_h}{1 - K_v} \right)$$

(۳)



شکل ۱- تئوری حالت فعال مونونوبه - اکابه

در این روابط ضریب حالت فعال مونونوبه - اکابه خوانده می شود و بقیه پارامترها نیز به مانند تئوری های قبلی است. طبق این روش سطح گسیختگی بر روی خطی با زاویه ایجاد می شود که از روابط زیر بدست می آید:

$$\alpha_{AE} = \theta - \psi + \tan^{-1} \left[\frac{-\tan\theta \cos(\varphi - \psi - \theta) + C_{1E}}{C_{2E}} \right]$$

(۴)



$$C_{ER} = \sqrt{[\tan(\varphi - \psi - \theta)\tan(\varphi - \psi - \theta) + \cot(\varphi - \psi - \theta)] [1 + \tan(\delta + \psi + \theta)\cot(\varphi - \psi - \theta)]} \quad (5)$$

$$C_{ES} = 1 + \{\tan(\delta + \psi + \theta)[\tan(\varphi - \psi - \theta) + \cot(\varphi - \psi - \theta)]\} \quad (6)$$

۳. تحلیل استاتیکی توسط نرم افزار

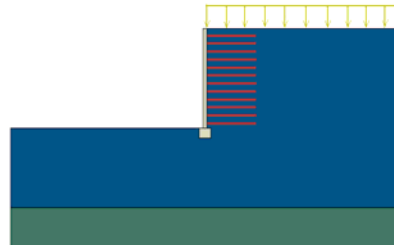
برای تحلیل استاتیکی و به دست آوردن دیوار حایل مسلح شده بهینه بارگذاری را بر روی مدل دیوار حایل با ارتفاع ۱۰ متر با ژئوگریدهایی به طول ۶/۳ متر و فاصله عمودی ۰/۸ متر که از آنالیز شبه استاتیکی بدست آمده انجام می دهیم. پس از بارگذاری نیروهای بدست آمده در لایه های مختلف و همچنین در طول لایه با فاصله های متفاوت از پشت دیوار را بررسی نموده و در نهایت طرح بهینه پیشنهاد می گردد.

۴. نیرو ایجاد شده در لایه های ژئوگرید

بارگذاری بصورت یکنواخت صفحه ای به میزان ۲۰ kN/m و ۲۰۰ kN/m بر بالای خاک پشت دیوار اعمال می گردد .

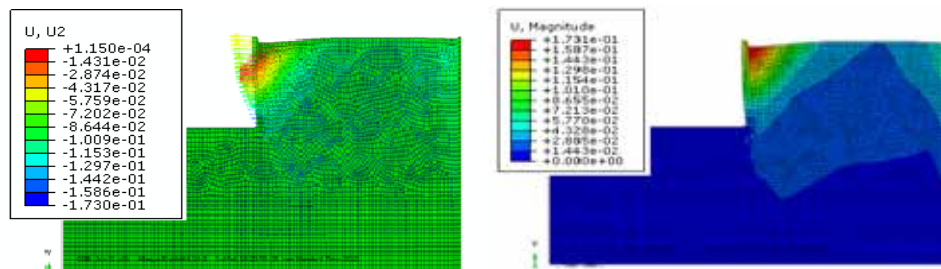
جدول ۱- نمونه های تحلیل استاتیکی

میزان بار وارده (kN/m)	فاصله ژئوگرید (متر)	طول ژئوگرید (متر)	تعداد ژئوگرید	عرض خاک (متر)	عمق فونداسیون (متر)	ارتفاع دیوار (متر)	نوع آنالیز	ردیف
۲۰	۰/۸	۶/۳	۱۲	۱۵	۱۶	۱۰	Static 1	۱
۲۰۰	۰/۸	۶/۳	۱۲	۱۵	۱۶	۱۰	Static 2	۲



شکل ۲- مدل مورد مطالعه استاتیکی و بارگذاری مربوط

بارگذاری مطابق شکل بالا بر مدل اعمال می گردد. در مورد مدل Static ۱ خروجی ها به شرح زیر می باشد.



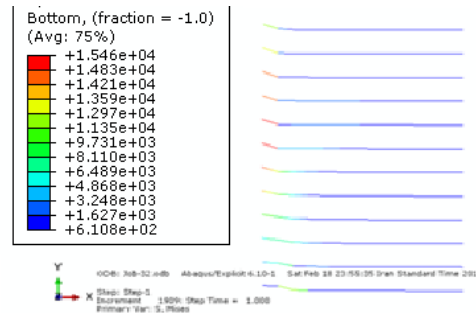
شکل ۳- کانتور بردار تغییر مکان برای مدل Static ۱



دومین کنفرانس ملی مهندسی ژئوتکنیک ایران

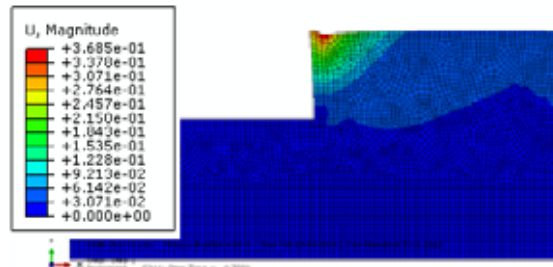
کرمانشاه، ۹ و ۱۰ مهر ماه ۱۳۹۳

در اثر بارگذاری اعمال شده بر مدل سازه دچار تغییر شکل کلی می گردد که همان گونه که از شکل های بالا مشخص است دارای ماکزیمم جابجایی حدود ۱۷ سانتی متر می باشد. در این شرایط ژئوگریدها در پشت دیوار حائل دچار تنش کششی شده و به محدوده تنش مجاز نزدیک می گردند که در کانتور تنش کششی زیر برای ژئوگریدها این مطلب قابل مشاهده است:



شکل ۴- تنش ایجاد شده در ژئوگریدها

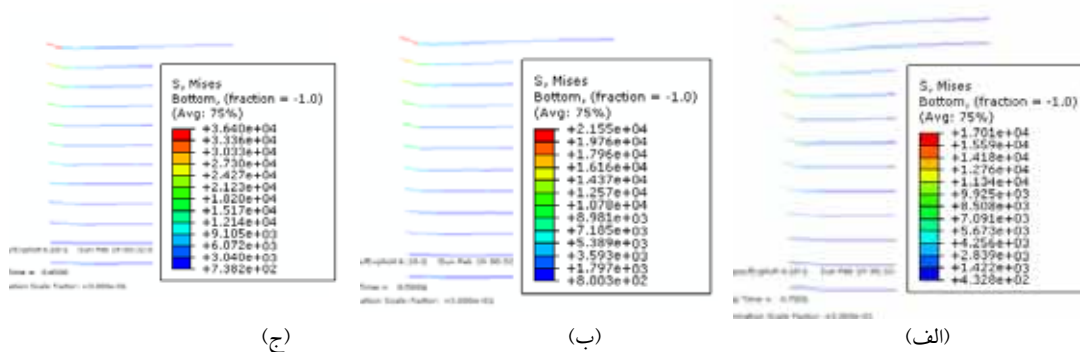
بیشترین تنش ایجاد شده در ژئوگریدها در قسمت پشت دیوار و در مرکز دیوار اتفاق می افتد که میزان آن در حدود ۱۵/۴۶ کیلونیوتن بر مترمربع می باشد که کمتر از تنش مجاز ژئوگریدها (۲۰ Kpa) می باشد ولی از این حد تجاوز نمی کند که نشان دهنده این مطلب است که دیوار مسلح طراحی شده تاب تحمل بارگذاری حالت اول را دارا می باشد. در مورد مدل Static2 خروجی ها به شرح زیر می باشد.



شکل ۵- کانتور تغییر مکان برای مدل Static2

در اثر بارگذاری اعمال شده بر مدل سازه دچار تغییر شکل کلی می گردد که همان گونه که از شکل بالا مشخص است دارای ماکزیمم جابجایی حدود ۳۵ سانتی متر می باشد. در این شرایط ژئوگریدها در پشت دیوار حائل دچار تنش کششی شدیدی شده اند به گونه ای که تا ۰/۴۵ زمان تحلیل یعنی ۰/۴۵ برابر مقدار بار نهایی (۹۰ kN) مقدار تنش ایجاد شده در ژئوگریدها کمتر از تنش مجاز می باشد اما در زمانه ۰/۵ برابر تحلیل مقدار تنش ایجاد شده از تنش مجاز فراتر رفته و عملاً ژئوگریدها دچار آسیب می گردند به گونه ای که در مرحله نهایی بارگذاری مقدار تنش ایجاد شده در ژئوگریدها تقریباً برابر ۳۶ کیلوپاسکال می باشد یعنی تقریباً دو برابر میزان مجاز. البته این تجاوز در تمام ژئوگریدها رخ نداده است و تنها در ۳ ژئوگرید بالای دیوار این تنش ها ایجاد گشته است که در کانتور تنش کششی زیر برای ژئوگریدها این مطلب قابل مشاهده است:

بیشترین تنش ایجاد شده در ژئوگریدها در قسمت پشت دیوار و در بالای آن اتفاق می افتد که میزان آن در حدود ۳۶/۴۰ کیلونیوتن بر مترمربع می باشد که بسیار بیشتر از تنش مجاز ژئوگریدها (۲۰ Kpa) می باشد که بیانگر این مطلب است که دیوار مسلح طراحی شده تاب تحمل بارگذاری حالت دوم را دارا نمی باشد و تحت بارگذاری ۲۰۰ کیلونیوتن بر متر دچار آسیب شدید گشته و بایستی بهینه گردد.



شکل ۶- تنش ایجاد شده در ژئوگریدها
 (الف) قبل از تنش مجاز
 (ب) مرحله تجاوز از تنش مجاز
 (ج) تنش نهایی

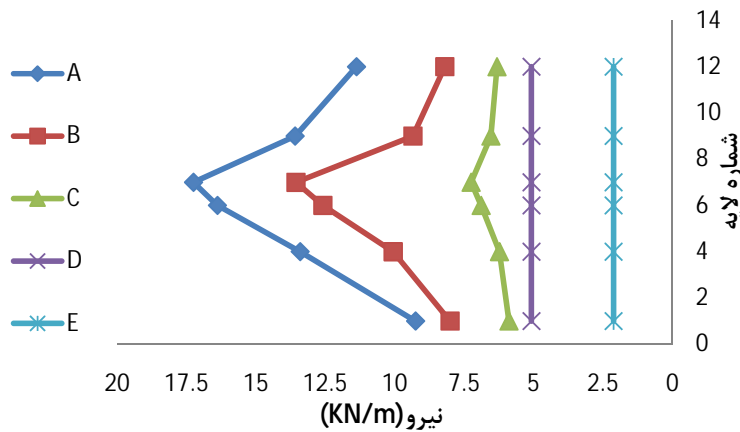
۵. نیروی ایجاد شده در طول ژئوگرید

برای به دست آوردن نیروهای داخلی ایجاد شده در ژئوگریدها که صرفاً به صورت کششی عمل می کنند نقاطی را بر روی تعدادی از ژئوگریدها تعبیه کرده و خروجی ها مورد بررسی واقع می گردد تا ضعف و قوت نقاط مشخص گردد. این نقاط بر روی لایه های ۴، ۶، ۷، ۹ و ۱۲ قرار گرفته اند که نقاط A، B، C، D، E به ترتیب ۳/۰، ۳/۱، ۳/۳، ۴/۸ و ۶ متر از لبه دیوار فاصله دارند.



شکل ۷- نقاط و ژئوگریدهای انتخاب شده جهت مطالعه بیشتر

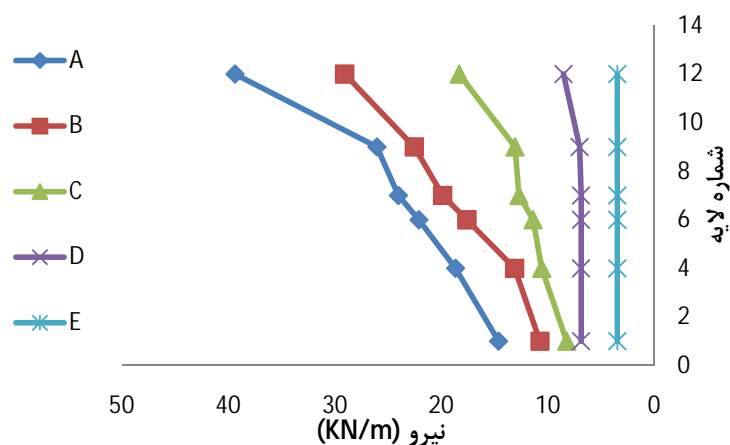
برای نقاط تعیین شده بر لایه های مختلف ژئوگریدها خروجی نیروهای داخلی به شرح زیر می باشد.



شکل ۸- نیروهای ایجاد شده در فواصل مختلف ژئوگریدها و لایه های مختلف در مدل Static ۱



برای نقاط تعیین شده بر لایه های مختلف ژئوگریدها در مدل استاتیک ۲ خروجی نیروهای داخلی به شرح جدول زیر می باشد.

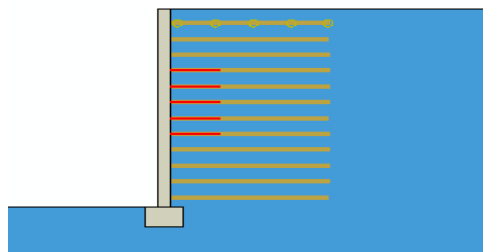


شکل ۹- نیروهای ایجاد شده در فواصل مختلف ژئوگریدها و لایه های مختلف در مدل Static ۲

۶. بهینه کردن ژئوگرید در دیوار حائل

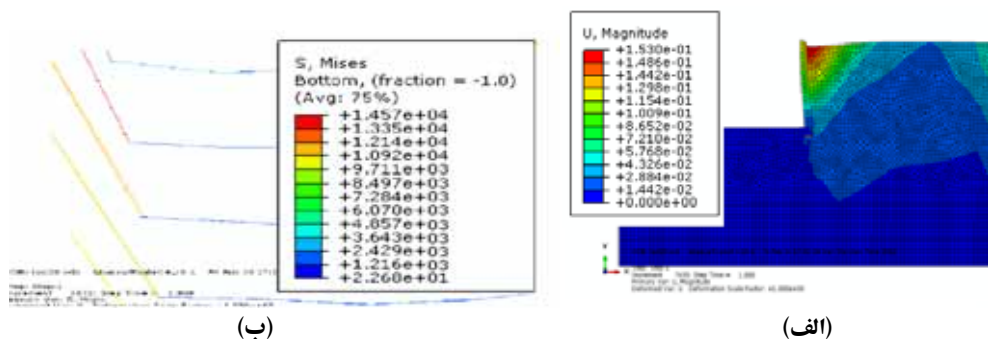
الف) دیوار با بار ۲۰ KN/m

از نمودار شکل ۷ دیوار حائل ۱۰ متری مسلح شده تحت بار گسترده ۲۰ کیلو نیوتن بر متر مشخص شد که بیشترین نیرو وارده در لایه های ۴، ۵، ۶، ۷ و ۸ ایجاد می گردد. به منظور بهینه کردن مدل این لایه ها را از ابتدای پشت دیوار که بیشترین نیرو در این محل وارد می شود بایک لایه ژئوگرید به طول ۲ متر دو لایه کرده و سپس آنالیز را انجام می دهیم. مقاومت مجاز ژئوگرید را برابر ۱۵ کیلو پاسکال در نظر می گیریم.



شکل ۱۰- مدل تقویت شده دیوار حائل با بار گسترده ۲۰ KN/m

پس از انجام آنالیز و اعمال بار گذاری نتایج زیر بدست آمد.



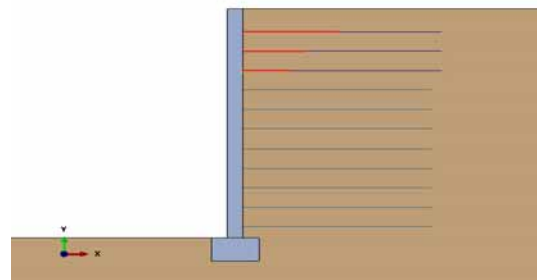
شکل ۱۱- الف) کانتور تنش ایجاد شده در ژئوگریدها با بزرگنمایی، ب) تغییر شکل کلی سازه مسلح شده



با بهینه کردن طرح و دو لایه کردن قسمت های پر تنش مقدار از ژئوگرید با تنش مجاز کششی ۱۵ کیلو پاسکال استفاده می کنیم. نیرو بوجود آمده در لایه ها به صورت شکل بالا می باشد. ماکزیمم نیرو ایجاد شده در لایه ها برابر ۱۴.۵۷ کیلو پاسکال بدست می آید و در محدوده مجاز می باشد. پس با استفاده از این طرح بهینه و استفاده از ژئوگرید با مقاومت مجاز کمتر که صرفه اقتصادی داشته جایجایی نیز کاهش یافته است، دیوار حایل پایدار و کارایی خود را حفظ می نماید.

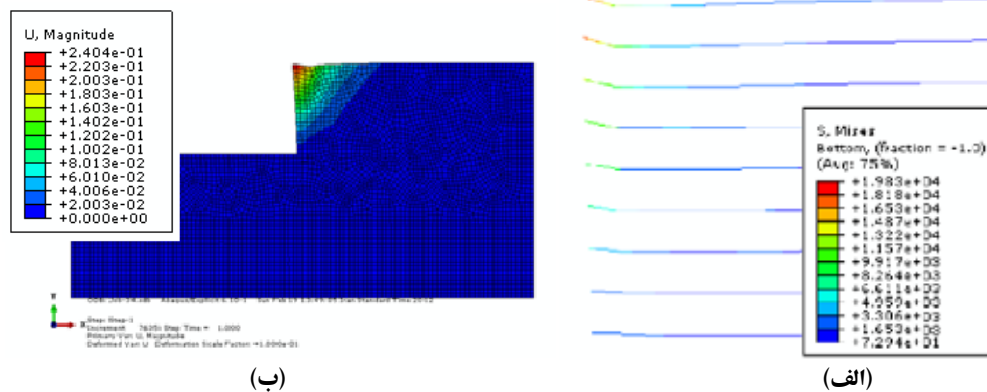
ب) دیوار با بار ۲۰۰ KN/m

همان گونه که از شکل ۹ و مطالب بیان شده قابل برداشت می باشد اینست که انتهای دور از دیوار ژئوگریدها تنش چندانی را تحمل نمی کند در عوض قسمت های نزدیک به دیوار تنش بیش از حد مجاز را تحمل می کنند، لذا جهت بهینه سازی طرح می توان در ژئوگریدها با کاهش طول و افزایش فاصله در نقاط ضعف از دو لایه ژئوگرید استفاده کرد. بدین منظور در مدل استاتیک ۲ فاصله ژئوگریدها را از ۰/۸ به ۰/۸۵ افزایش داده و به غیر از ۳ ژئوگرید بالایی طول باقی ژئوگریدها را به میزان ۰/۳ کاهش داده و به طول ۶ متر می رسانیم و ۳ ژئوگرید به طول های ۳ متر، ۲ متر و ۱/۵ متر به ترتیب به ژئوگریدهای بالا اضافه می کنیم. در این حالت میزان ژئوگرید مصرفی به میزان ۵٪ کاهش میابد.



شکل ۱۲- مدل تقویت شده دیوار حائل

پس از اعمال بارگذاری حالت دوم بر روی مدل تقویت شده آنالیز مجددا انجام می گیرد تا نتایج به دست آمده با نتایج قبل مقایسه می گردد. کانتور تغییر شکل در زیر نشان داده شده است.



شکل ۱۳- الف) تغییر شکل کلی سازه مسلح شده ، ب) کانتور تنش ایجاد شده در ژئوگریدها

با توجه به شکل های بالا مشخص است جایجایی به میزان ۱۲ سانتی متر نسبت به حالت استاتیک ۲ کاهش یافته است یعنی در حدود ۳۳٪ کاهش داشته است. میزان تنش ایجاد شده در حدود ۱۹/۸۳ کیلو پاسکال می باشد که این مقدار کمتر از حد مجاز کششی ژئوگرید است، پس می توان نتیجه گرفت ساختار و شکل قرارگیری درست مسلح کننده ها در دیوار حائل علاوه بر اقتصادی تر کردن طرح (کاهش ۵ درصدی مصرف ژئوگرید) باعث کاهش نشست (۳۳ درصد) و کاهش محسوس تنش های کششی می گردد.



۷. نتیجه گیری

طراحی صحیح و بهینه هرگونه سازه از وظایف هر طراح می باشد. دیوارهای حایل خاکی مسلح شده نیز از این قانون مستثنی نیستند. در این تحقیق به مدلسازی عددی دیوارهای حائل مسلح شده در نرم افزار ABAQUS پرداخته شده است و به منظور بهینه کردن مدلسازی تغییراتی در مسلح کننده ها ایجاد و طرح بهینه در تحلیل های استاتیکی و دینامیکی مشخص گردید. بر این اساس نتایج کلی این تحقیق به شرح زیر است:

۱. تحلیل استاتیکی با بار گسترده ۲۰ کیلونیوتن بر متر بیشترین تنش ایجاد شده در ژئوگریدها در قسمت پشت دیوار و در مرکز دیوار اتفاق می افتد که میزان آن در حدود ۴۶/۱۵ کیلونیوتن بر مترمربع می باشد. در تحلیل بار گسترده ۲۰۰ کیلونیوتن بر متر بیشترین تنش ایجاد شده در لایه های بالایی ژئوگریدها به میزان ۴۰/۳۶ کیلونیوتن بر مترمربع بوجود می آید که در طرح بهینه از این نتایج استفاده می کنیم.
۲. با تغییر مقدار بارگذاری نیروهای تولید شده در انتهای لایه های مسلح کننده دارای کمترین مقدار نیرو و روند نسبتا ثابتی دارند که می توان از ژئوگرید با حد مجاز کششی کمتر استفاده کرد.
۳. با ایجاد برخی تغییرات در طول و فاصله لایه های مسلح کننده و همچنین دو لایه کردن مسلح کننده در قسمت هایی که بیشترین نیرو به آن محل وارد می شود می توان به طرح بهینه ای دست یافت که با استفاده از آن، سازه با صرفه اقتصادی، افزایش پایداری، کارایی بهتر و کاهش زمان ساخت همراه گردد.

آنچه از برآیند بحث می توان عنوان کرد این است که، ساختار سازه های اجزای سازنده دیوارهای خاکی مسلح شده با ژئوسینتتیک ها، باعث رفتار مناسب و انعطاف پذیری قابل قبول آنها در برابر بارهای ناشی از زلزله می شوند. به همین خاطر طراحی این قبیل سازه ها بایستی بیش از پیش مورد توجه طراحان واقع گردد.

۸. مراجع:

1. Bathurst, R.J., Geosynthetics in walls, the International Geosynthetics Society (IGS).
2. Rankin, W. (1857), "On the Stability of Loose Earth", Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 147
3. Coloumb, C. A. (1776), "Essai sur une application des maximis et minimis a quelques problems de statique relatifs a l'architecture", Memoires de l'Academie Royal Pres
4. Okabe, S. (1926), "General Theory of Earth Pressures", Journal of the Japan Society of Civil Engineering, 12(1)
5. Mononobe, N., and Matsuo, H. (1929), "On the Determination of Earth Pressures during Earthquakes", Proceedings, World Engineering Congress, 9 p