

اثر طول و فاصله لایه‌های ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل خاک مسلح با استفاده از روش اجزای محدود

هلدا پهلوانی، دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی شریف، تهران
وهب توفیق*، استادیار، گروه سازه، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

E-mail: toufigh@sharif.edu

دریافت: ۱۳۹۵/۰۵/۳۱ - پذیرش: ۹۵/۰۹/۱۵

چکیده

این مقاله به بررسی جزئیات مدل‌سازی دیوار حائل خاک مسلح ژئوگریدی با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود به صورت کرنش مسطح و در فضای دو بعدی پرداخته است. در این تحقیق، در مدل‌سازی رفتار خاک از مدل موهر-کولمب استفاده شده است و مدل رفتاری لایه‌های ژئوگرید نیز به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است. به منظور اعتبارسنجی مدل، از داده‌های حاصل از سنسورگذاری در یکی از دیوارهای پروژه‌ای در توسان ایالت آریزونا در آمریکا استفاده شده است. کرنش‌های افقی در لایه‌های ژئوگرید و کرنش‌های قائم و افقی خاک در ارتفاع‌های مشخصی از این دیوار با استفاده از نرم‌افزار محاسبه شده‌اند. نتایج عددی تطابق خوبی با نتایج واقعی اندازه‌گیری شده دارند. در ادامه، با تغییر چیدمان لایه‌های ژئوگرید و تغییر طول این لایه‌ها، میزان جابه‌جایی رأس دیوار و بیشینه نیروی ایجاد شده در لایه‌های ژئوگرید مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که با تغییر طول و فاصله بین لایه‌ها می‌توان به طراحی اقتصادی‌تری نسبت به نتایج حاصل از روش تعادل حدی دست یافت. همچنین، این نتیجه به دست آمد که لایه‌های زیرین ژئوگرید نسبت به سایر لایه‌ها بیشترین تأثیر را در جابه‌جایی راس دیوار دارند و از این رو طراحان باید در این قسمت از تعداد لایه‌های بیشتری استفاده کنند. این تحقیق نشان می‌دهد که روش اجزای محدود روش مناسبی برای مدل‌سازی دیوارهای حائل خاک مسلح، پیش‌بینی رفتار آنها و رفع نواقص داده‌های حاصل از سنسورگذاری است.

واژه‌های کلیدی: دیوار حائل، ژئوگرید، مدل موهر-کولمب

۱. مقدمه

در اثر خاکریزی، خاکبرداری و یا عوامل طبیعی استفاده می‌شود. همچنین، این دیوارها برای تحمل سربار ناشی از وسایل نقلیه، راه‌آهن و راه مورد استفاده قرار می‌گیرند. در گذشته، از دیوارهای حائل وزنی برای

دیوارهای حائل در زیرساخت‌های حمل‌ونقل و در شبکه راه‌ها بسیار پرکاربرد هستند. از این دیوارها به منظور تحمل فشار ناشی از اختلاف تراز به وجود آمده

توانمندی روش مدل‌سازی عددی را بیان می‌کنند (فیثمن و دسای، ۱۹۹۱؛ الحسینی، ۱۹۹۹؛ دامیانس و همکاران، ۲۰۱۴؛ یو و همکاران، ۲۰۱۶؛ اوریا و همکاران، ۲۰۱۶). اوریا و همکاران در سال ۲۰۱۶ مدل‌سازی دیوار حائل مسلح شده به CFRP را با استفاده از نرم‌افزار اجزای محدود پلکسیس و با استفاده از المان‌های مثلثی انجام دادند و مدل رفتاری سخت-شونده را برای خاک در نظر گرفتند.

در این تحقیق، با استفاده از روش اجزای محدود، اثر تغییر طول و فاصله بین لایه‌های ژئوگرید بر جابه‌جایی رأس دیوار و همچنین نیروی ایجاد شده در ژئوگریدها بررسی شده است. در مدل‌سازی دیوار حائل، از نرم‌افزار اجزای محدود آباکوس و برای تحلیل رفتار خاک از مدل موهر-کولمب استفاده شده است.

۲. روش کار

در این تحقیق، دیوار حائل خاک مسلح ژئوسیتیک با استفاده از روش اجزای محدود مدل‌سازی شده و عملکرد آن تحت اثر سربار مورد ارزیابی قرار می‌گیرد. برای مدل‌سازی خاک و بتن از المان‌های چهارگره‌ای که نسبت به المان‌های مثلثی با ابعاد مشابه، دقت بیشتری در محاسبه تنش دارند، استفاده شده است (پپر و هانریش، ۲۰۰۵). همچنین، به منظور مدل‌سازی رفتار خاک، از مدل رفتاری موهر-کولمب استفاده شده و مدل رفتاری الاستیک خطی نیز به لایه‌های ژئوگرید اختصاص داده شده است. از آنجا که بهره‌گیری از نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی مستلزم انجام اعتبارسنجی مناسبی روی آن است، به منظور انجام فرایند تصحیح مدل‌سازی عددی از داده‌های حاصل از سنسورگذاری در یکی از دیوارهای پروژه‌ای در توسان ایالت آریزونا، آمریکا، استفاده شده است. پس از اعتبارسنجی مدل، عملکرد این دیوار با تغییر چیدمان لایه‌های ژئوگرید و تغییر طول این لایه‌ها، مورد ارزیابی قرار گرفته است.

تأمین پایداری استفاده می‌شد. ولی این موضوع که خاک مقاومت کمی در برابر تنش‌های کششی دارد، موجب شد که مهندسين و محققين در طول تاريخ به دنبال روش‌هایی برای بهبود ظرفیت کششی خاک باشند. استفاده از المان‌های کششی در توده خاک به منظور افزایش مقاومت کششی آن برای اولین بار توسط ویدال (۱۹۶۰) با استفاده از تسمه‌های فلزی برای خاک‌های بدون چسبندگی ارائه شد. پس از مدتی، برای مقابله با خوردگی، مصالح پلیمری به عنوان جایگزینی برای تسمه‌های فلزی پیشنهاد شدند (گری و اوهاشی، ۱۹۸۳). اگرچه در ابتدا، به دلیل تمایل این مصالح پلیمری به خزش، در قابلیت استفاده از آنها در دیوارحائل تردید ایجاد شده بود، اما امروزه برتری دیوارهای حائل خاک مسلح ژئوستتیک با قابلیت ساخت آسان و هزینه کمتر نسبت به سایر مواد مسلح کننده، موجب رونق آنها در سراسر دنیا شده است (فنانین و هرمان، ۱۹۹۰). دیوارهای حائل خاک مسلح مزایایی نسبت به دیوارهای حائل وزنی دارند. در مواردی که ارتفاع دیوار بیش از ۳ متر باشد یا به منظور تأمین پایداری دیوار نیاز به شالوده‌های خاص باشد، استفاده از دیوار خاک مسلح مقرون به صرفه‌تر از دیوار حائل وزنی است. همچنین، از مزایای مهم دیوارهای خاک مسلح، انعطاف‌پذیری این دیوارها و توانایی آنها برای جذب تغییرشکل‌ها می‌باشد (FHWA، ۱۹۸۹).

روش‌های تعادل حدی و اجزای محدود برای تحلیل و طراحی دیوارهای حائل استفاده می‌شوند. روش تعادل حدی روش ساده‌تری برای طراحی این دیوارها است. اما این روش برای تعیین توزیع تنش و کرنش خاک و مسلح‌کننده‌ها کاربرد ندارد (رو و هو، ۱۹۹۲). در مواردی نیز شکست دیوار حائل را کمتر از مقدار واقعی برآورد می‌کند (وو، ۱۹۹۲). پژوهش‌های بسیاری نیز در زمینه مدل‌سازی عددی دیوار حائل خاک مسلح انجام شده است که همگی این پژوهش‌ها

۳. مدل‌سازی اجزای محدود

در این تحقیق، با فرض شرایط کرنش مسطح، دیوار حائل خاک مسلح در فضای دوبعدی و با استفاده از نرم‌افزار آباکوس ۶.۱۳-۴ مدل‌سازی شده است.

۱-۳. مدل عددی

به منظور مدل‌سازی خاک و بتن دیوار نما از المان‌های چهارگره‌ای solid CPE4 و برای مدل‌سازی لایه‌های ژئوگرید از المان‌های دوگره‌ای خطی truss T2D2 استفاده شده است. رفتار پلاستیک خاک با استفاده از مدل رفتاری موهر-کولمب مدل‌سازی شده و مدل رفتاری ژئوگرید نیز به صورت الاستیک خطی در نظر گرفته شده است (یو و جانگ، ۲۰۰۶؛ کوکوتس و همکاران، ۲۰۰۶؛ لیو و همکاران، ۲۰۰۷). برای مدل‌سازی محل تماس خاک و ژئوگرید، ژئوگرید با استفاده از قید Embedded Region در داخل خاک مدفون شده است (حسین و مگوید، ۲۰۱۳). همچنین، لایه‌های ژئوگرید با استفاده از قید tie به دیوار بتنی متصل شده‌اند. برای مدل‌سازی اندرکنش بین خاک و دیوار نما، رفتار مماسی آن با استفاده از روش penalty و با ضریب اصطکاک ۰/۳ و رفتار قائم آن به صورت hard contact در نظر گرفته شده است (داس، ۲۰۱۵).

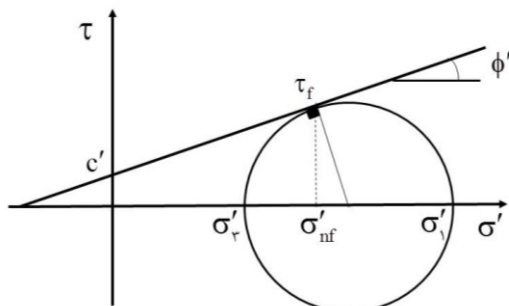
۲-۳. مدل رفتاری خاک

در این پژوهش، از مدل رفتاری موهر-کولمب به عنوان مدل رفتاری خاک استفاده شده است. در این مدل، پوش گسیختگی به صورت یک خط راست با معادله (۱) در صفحه تنش نرمال-تنش برشی نشان داده می‌شود:

$$\tau_f = c' - \sigma'_{nf} \tan \phi' \quad (1)$$

در این رابطه، τ_f تنش برشی در لحظه گسیختگی، σ'_{nf} تنش قائم در لحظه گسیختگی، c' چسبندگی خاک و

ϕ' زاویه اصطکاک داخلی خاک هستند. در شکل ۱، پوش گسیختگی موهر-کولمب به صورت شماتیک آورده شده است.



شکل ۱. سطح تسلیم در فضای تنش نرمال-تنش برشی

با توجه به شکل ۱ می‌توان نوشت:

$$\tau_f = \left(\frac{\sigma'_1 - \sigma'_3}{2} \right) \cos \phi' \quad (2)$$

$$\sigma'_{nf} = \frac{\sigma'_1 + \sigma'_3}{2} - \left(\frac{\sigma'_3 - \sigma'_1}{2} \right) \sin \phi' \quad (3)$$

در روابط (۲) و (۳)، σ'_1 و σ'_3 به ترتیب تنش‌های قائم و افقی می‌باشند ($\sigma'_1 = \sigma'_v$ و $\sigma'_3 = \sigma'_h$). با استفاده از روابط (۲) و (۳)، رابطه (۱) را می‌توان برحسب تنش‌های اصلی به صورت زیر نوشت:

$$\sigma'_3 - \sigma'_1 = 2c' \cos \phi' - (\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi' \quad (4)$$

اگر معیار گسیختگی رابطه (۲) به عنوان سطح تسلیم در نظر گرفته شود، این سطح به شکل زیر قابل تعریف است:

$$F(\sigma', k) = \sigma'_3 - \sigma'_1 - 2c' \cos \phi' \quad (5)$$

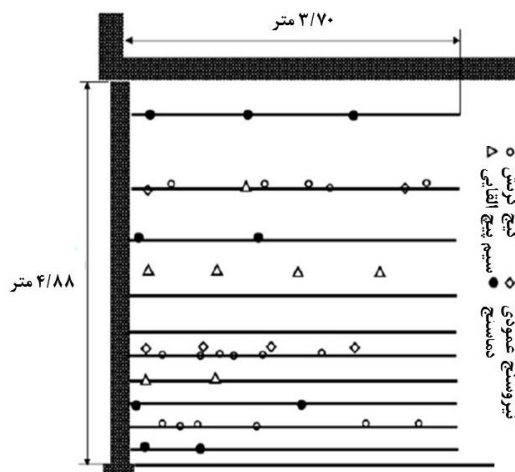
$$+(\sigma'_1 + \sigma'_3) \sin \phi' = 0$$

در رابطه (۵)، k پارامتر سخت و نرم شوندگی و تابعی از ϕ' و c' است. این پارامتر تابع کرنش نیست و مقداری ثابت دارد. رابطه‌ی سطح تسلیم در فضای نامتغیرهای تنش به شکل زیر قابل بازنویسی است (زینکوویچ و همکاران، ۱۹۷۷؛ ورم و دی بورست، ۱۹۸۴):

اثر طول و فاصله لایه‌های ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل خاک مسلح با استفاده از روش اجزای محدود

۳-۳. اعتبارسنجی مدل

به منظور اعتبارسنجی مدل، مدل بر اساس داده‌های یک دیوار واقعی ساخته شده است. این دیوار یکی از ۴۳ دیوار حائل ژئوگریدی ساخته شده در پروژه‌ای در توسان ایالت آریزونا، آمریکا (Tanque Verde Wrightstown-Pantano roads Project) در سال ۱۹۸۴ میلادی است. این دیوار به منظور ثبت کرنش‌های قائم و افقی سنسورگذاری شده است. هندسه دیوار و محل قرارگیری لایه‌های ژئوگرید در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳. هندسه دیوار و محل قرارگیری لایه‌های ژئوگرید (اوریا و همکاران، ۲۰۱۶)

دیوار از بتن مسلح پیش‌تندیده به ارتفاع ۴/۸۸ متر و عرض ۳ متر ساخته شده است. شکل ۳ محل اتصال لایه‌های ژئوگرید به دیوار را نشان می‌دهد. ژئوگرید مورد استفاده تک محوری (Tensar SR2) بوده و طول لایه‌های آن ۳/۷ متر در نظر گرفته شده است. جزئیات بیشتر در گزارش برگ و همکاران (۱۹۸۶) آورده شده است.

۳-۴. هندسه مدل

برای ساخت مدل، از اجزای دوبعدی شکل‌پذیر استفاده شده که از میان آنها خاک و دیوار بتنی به

$$F(j_1, j_2, j_3, k) = \frac{1}{3} j_1 \sin \varphi' + (j_2')^{0.5} \quad (6)$$

$$(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \varphi') - c' \cos \varphi' = 0 \quad (7)$$

$$\sin \theta = -\frac{3\sqrt{3}}{2} \times \frac{j_3}{(j_2')^{1.5}} \quad (8)$$

$$j_1 = \sigma_{ii} = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 \quad (9)$$

$$j_2' = \frac{1}{2} \sigma_{ij}' \sigma_{ij}' \quad (10)$$

$$j_3 = \frac{1}{3} \sigma_{ij}' \sigma_{jk}' \sigma_{ki}' \quad (11)$$

$$\sigma_{ij}' = \sigma_{ij} - \frac{1}{3} \sigma_{kk} \delta_{ij}$$

طبق معادله (۲)، تنش اصلی σ_p' در تابع سطح تسلیم مدل موهر-کولمب نقشی ندارد. این یکی از ویژگی‌های روش موهر-کولمب است. از آنجا که در تابع جریان نیز σ_p' وجود ندارد، کرنش پلاستیک نیز در جهت σ_p' وجود ندارد. بنابراین، تابع پتانسیل را می‌توان با رابطه‌ای شبیه تابع تسلیم، ولی با زاویه اتساع به جای زاویه اصطکاک داخلی، به شکل زیر تعریف کرد (زینکوویچ و همکاران، ۱۹۷۷؛ ورمر و دی بورست، ۱۹۸۴):

$$g(\sigma, k) = \sigma_2' - \sigma_1' - 2c' \cos \psi' \quad (12)$$

$$+ (\sigma_2' + \sigma_1') \sin \psi'$$

رابطه‌ی تابع پتانسیل پلاستیک در فضای نامتغیرهای

تنش به شکل زیر قابل بازنویسی است:

$$g(j_1, j_2', j_3, k) = \frac{1}{3} j_1 \sin \psi' + (j_2')^{0.5} \quad (13)$$

$$(\cos \theta - \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \theta \sin \psi') - c' \cos \psi' = 0$$

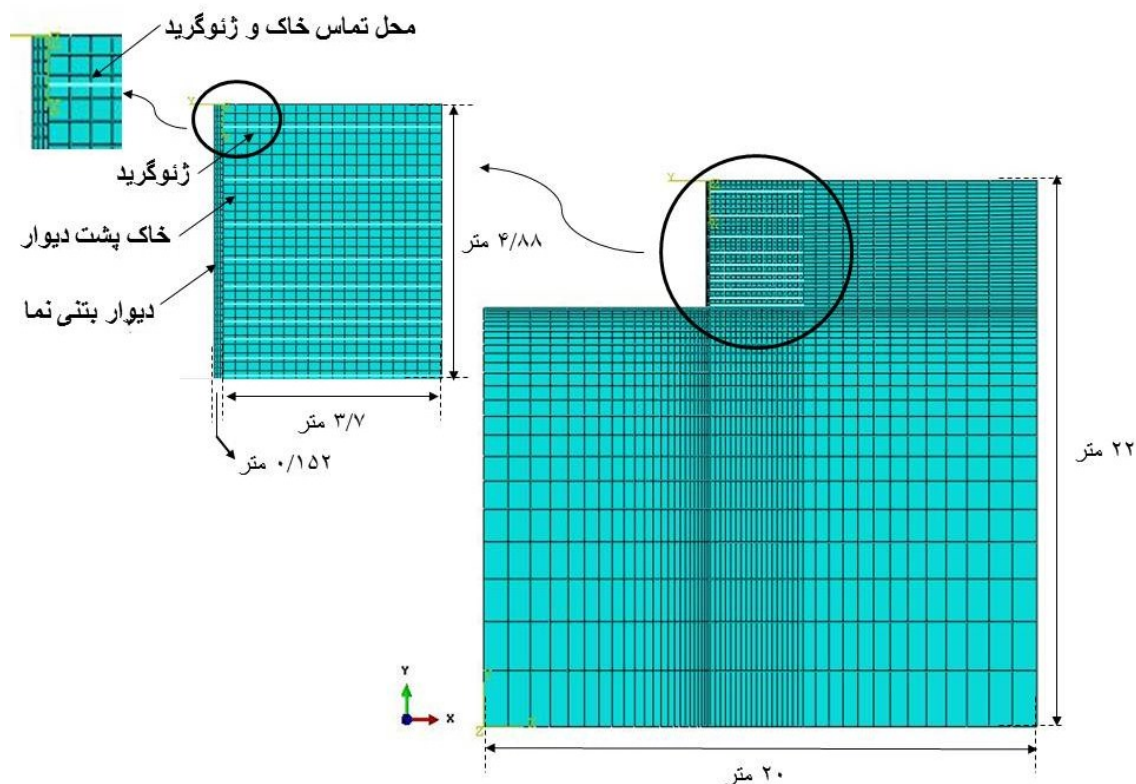
در نرم‌افزار آباکوس، رفتار الاستیک مدل رفتاری

موهر-کولمب با پارامترهای E' و ν' و رفتار پلاستیک

آن با پارامترهای C' ، ϕ' و ψ' اعمال می‌شوند.

طول ژئوگریدها و مرز کف خاک در فاصله ۳ برابر ارتفاع دیوار نسبت به کف دیوار در نظر گرفته شده‌اند (اوریا و همکاران، ۲۰۱۶). در شکل ۴، جزئیات مدل اجزای محدود نشان داده شده است.

صورت صفحه‌ای و ژئوگریدها به صورت سیمی تعریف شده‌اند. ارتفاع دیوار، طول لایه‌های ژئوگرید و فواصل بین آنها در مدل‌سازی با مدل واقعی مطابقت کامل دارند. به منظور مدل‌سازی فضای نیمه بی‌نهایت خاک، مرزهای جانبی توده خاک در فاصله ۲/۵ برابر



شکل ۴. مدل اجزای محدود

(بولتون، ۱۹۸۶). در جدول ۱، مشخصات خاک به کار رفته در مدل آورده شده است.

جدول ۱. مشخصات خاک

مقدار	نماد	مشخصات
۱۸۰۰	ρ	جرم مخصوص (kg/m^3)
۵۰	E	مدول الاستیسیته (MPa)
۴۰	ϕ	زاویه اصطکاک داخلی (درجه)
۱۰	ψ	زاویه اتساع (درجه)
۰/۳	ν	ضریب پواسون
۶۰۰	c	چسبندگی (kPa)

۳-۵. مشخصات مصالح

۳-۵-۱. خاک

مشخصات خاک مطابق با مقادیر مربوط به دیوار واقعی در نظر گرفته شدند. خاک پشت دیوار ماسه‌ای و مقدار چسبندگی آن نسبتاً کم است. به همین دلیل، در مدل‌سازی، مقداری ناچیز برای چسبندگی خاک در نظر گرفته شده است. مقدار زاویه اتساع نیز با استفاده از رابطه $\psi = \phi - \phi_{crit}$ به دست آمده است، که ϕ_{crit} زاویه اصطکاک داخلی بحرانی است و مقدار آن برای خاک‌های ماسه‌ای برابر با ۳۰ در نظر گرفته می‌شود

اثر طول و فاصله لایه‌های ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل خاک مسلح با استفاده از روش اجزای محدود

۳-۵-۲. ژئوگرید و دیوار نما

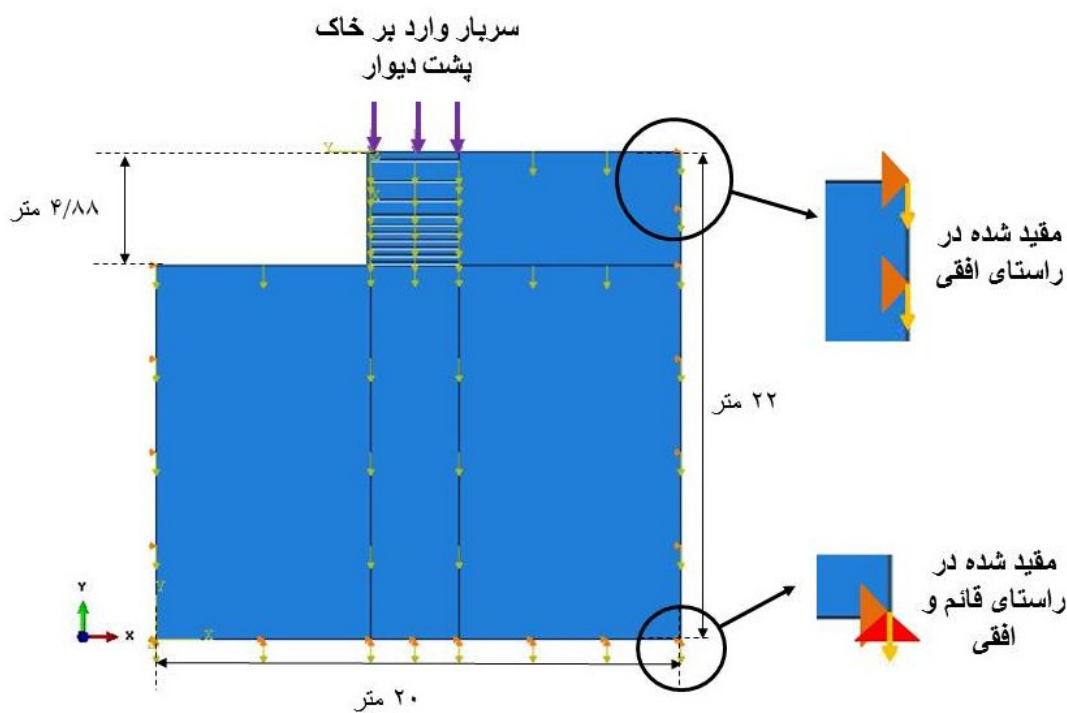
در این پروژه، از ژئوگرید تک محوره Tensar SR2 به عنوان المان مسلح‌کننده استفاده شده است. در مدل‌سازی ژئوگرید از ابعاد و مشخصات واقعی آن استفاده شده است. در جدول ۲، مشخصات بتن دیوار نما و ژئوگرید مصرفی در این مدل‌سازی آورده شده‌اند.

جدول ۲. مشخصات ژئوگرید و دیوار نما

مشخصات مصالح	نماد	ژئوگرید	دیوار بتنی
جرم مخصوص (kg/m^3)	ρ	۴۴۷	۲۴۸۰
مدول الاستیسیته (MPa)	E	۱۵۰۰	۲۱۰۰۰
ضریب پواسون	ν	۰/۳	۰/۱۵
ضخامت (mm)	t	۱/۵	۱۵۲/۲

۳-۶. بارگذاری و شرایط مرزی

بار وارده به دیوار حائل ناشی از سربار و وزن توده خاک پشت دیوار است. در مدل‌سازی، بار وزن در راستای قائم و بار سربار نیز به صورت خطی به سطح بالایی خاک پشت دیوار اعمال شده است. مقدار این بار، ۲۰ کیلونیوتن بر متر است. مطابق شکل ۵، شرایط مرزی این مدل به گونه‌ای است که در کف بستر خاکی حرکت در راستای افق و قائم مقید شده است. در مرز-های جانبی مدل، جابه‌جایی خاک در راستای افق مقید شده است و در راستای قائم امکان حرکت برای خاک وجود دارد.



شکل ۵. بارگذاری و شرایط مرزی

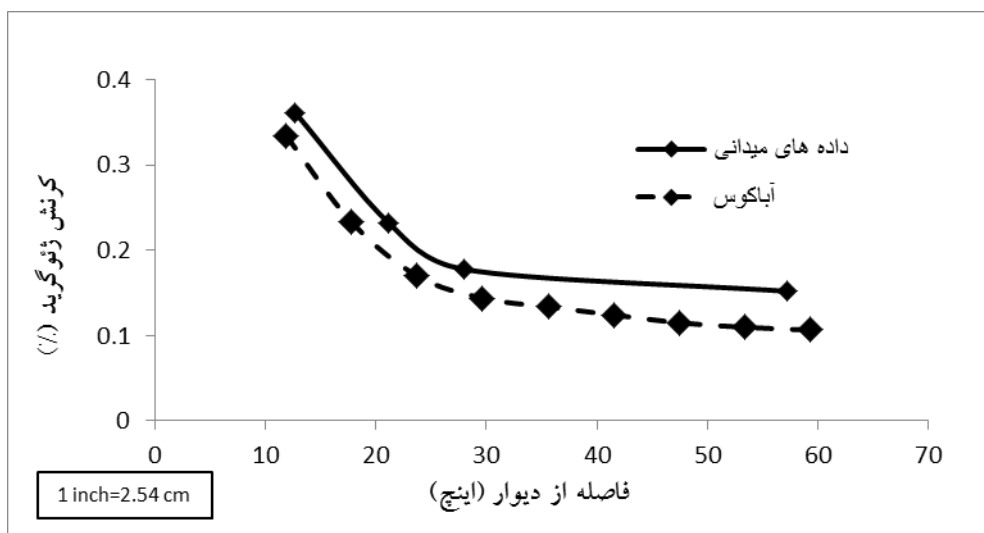
کرنش بر حسب فاصله از دیوار برای لایه‌های مختلف ژئوگرید و ارتفاعات مشخصی از خاک پشت دیوار است. شکل‌های ۶ تا ۹، نمودارهای مربوط به کرنش بر حسب فاصله از دیوار برای لایه‌های ژئوگریدی که در ارتفاعات ۰/۵، ۱/۵، ۴/۵ و ۱۱/۵ فوت (۰/۱۵، ۰/۴۶،

۴. نتایج و بحث

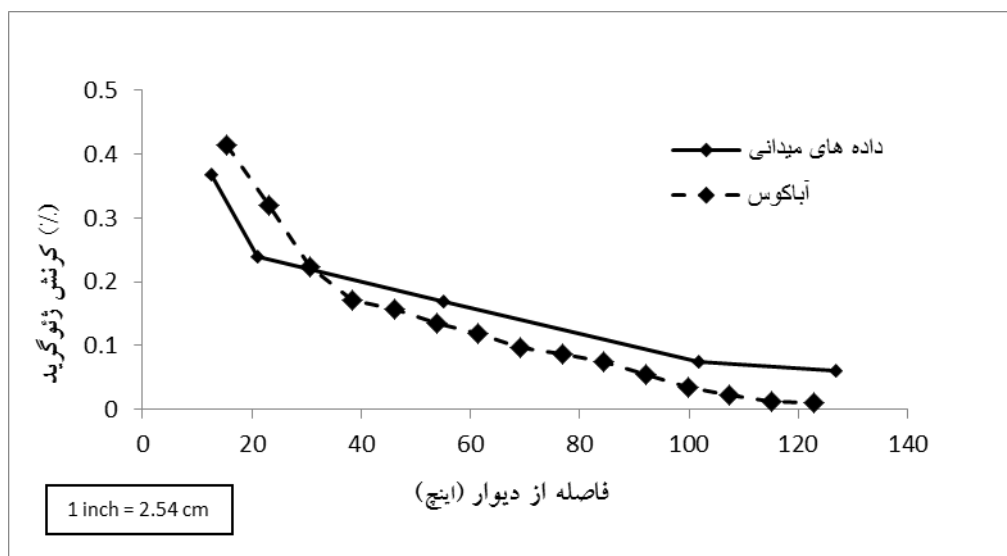
۴-۱. مقایسه مدل عددی با مدل واقعی

نتایج حاصل از مدل‌سازی عددی با داده‌های حاصل از سنسورگذاری مقایسه شدند. نتایج شامل نمودارهای

۱/۳۷ و ۳/۵۱ متر) از کف دیوار قرار دارند را نشان می - دهند. همچنین، نمودارهای مقادیر کرنش افقی و قائم خاک به ترتیب در ارتفاعات ۳/۵ و ۸ فوت (۱/۰۷ و ۲/۴۳ متر) از کف دیوار برحسب فاصله از دیوار به ترتیب در شکل های ۱۰ و ۱۱ رسم شده اند.

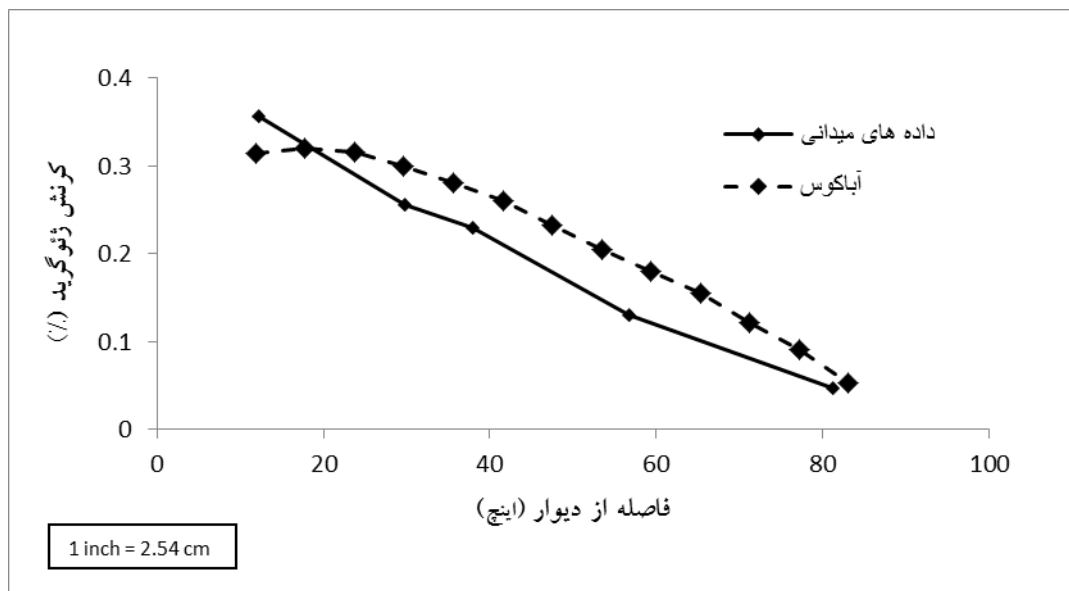


شکل ۶. نمودار کرنش افقی در لایه ی اول ژئوگرید (در ارتفاع ۰/۵ فوت از کف دیوار) برحسب فاصله از دیوار

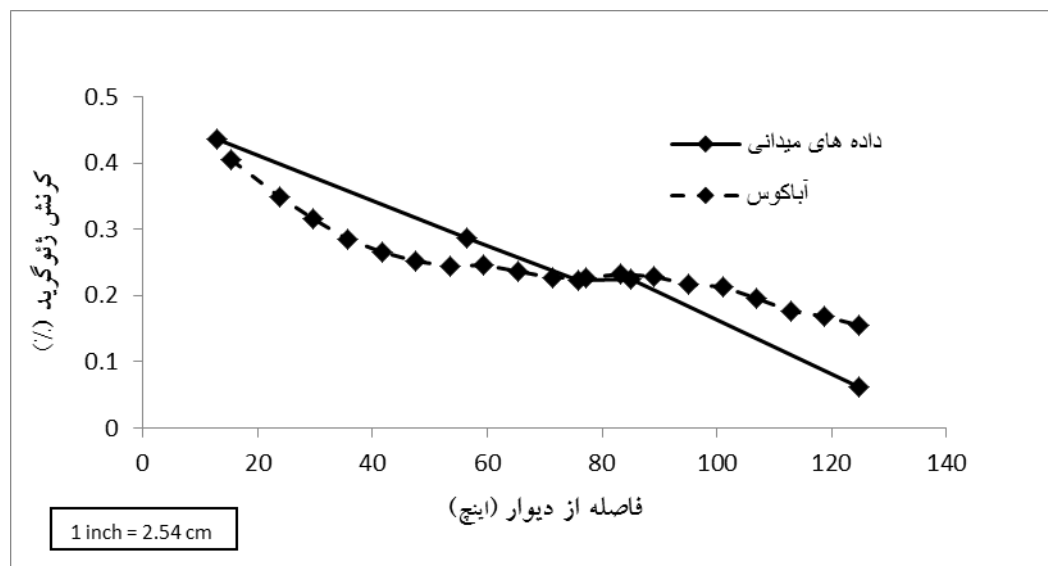


شکل ۷. نمودار کرنش افقی در لایه ی دوم ژئوگرید (در ارتفاع ۱/۵ فوت از کف دیوار) برحسب فاصله از دیوار

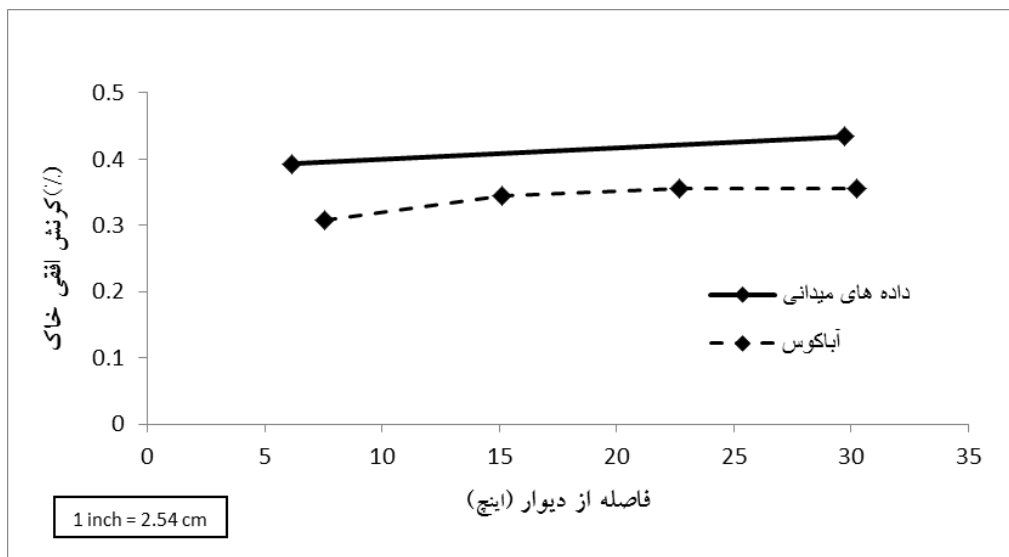
اثر طول و فاصله لایه‌های ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل خاک مسلح با استفاده از روش اجزای محدود



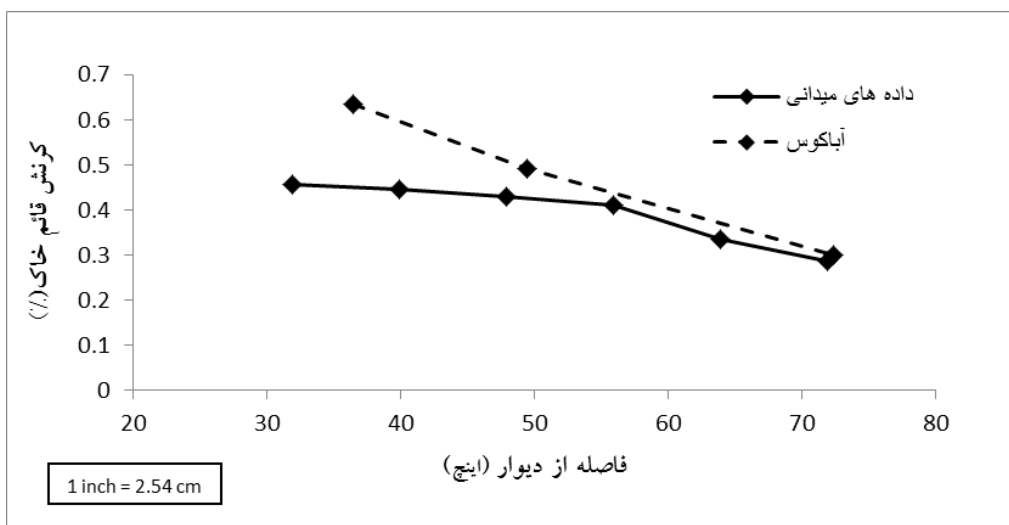
شکل ۸. نمودار کرنش افقی در لایه‌ی چهارم ژئوگرید (در ارتفاع ۴/۵ فوت از کف دیوار) برحسب فاصله از دیوار



شکل ۹. نمودار کرنش افقی در لایه‌ی نهم ژئوگرید (در ارتفاع ۱۱/۵ فوت از کف دیوار) برحسب فاصله از دیوار



شکل ۱۰. نمودار کرنش افقی خاک در ارتفاع ۳/۵ فوت از کف دیوار برحسب فاصله از دیوار



شکل ۱۱. نمودار کرنش قائم خاک در ارتفاع ۸ فوت از کف دیوار برحسب فاصله از دیوار

روش اجزای محدود روش مناسبی در تحلیل دیوار حائل خاک مسلح و پیش‌بینی رفتار آن است.

۴-۲. تأثیر تعداد لایه‌های ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل خاک مسلح

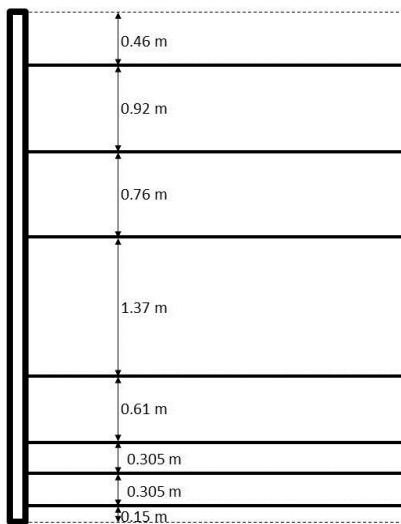
پس از اعتبارسنجی مدل و اطلاع از صحت آن، با تغییر چیدمان لایه‌های ژئوگرید، تأثیر تعداد لایه‌های ژئوگرید در عملکرد دیوار بررسی شد. شکل ۱۲ شش چیدمان مختلف برای لایه‌های ژئوگرید که مورد بررسی

این نمودارها نشان می‌دهند که نتایج مدل‌سازی و داده‌های حاصل از سنسورگذاری تطابق مناسبی با یکدیگر دارند. اگرچه این امکان وجود دارد که داده‌های حاصل از سنسورگذاری به دلیل خطا در نصب سنسور-ها و خطا در قرائت آنها اندکی با واقعیت متفاوت باشند، اما مهمتر از آن، محدودیت‌های مدل‌های رفتاری در نظر گرفته شده برای مصالح می‌تواند موجب عدم تطابق کامل نمودارها شوند. با این حال، به دلیل تطابق نسبتاً خوب نتایج نرم‌افزار با مقادیر واقعی، می‌توان گفت که

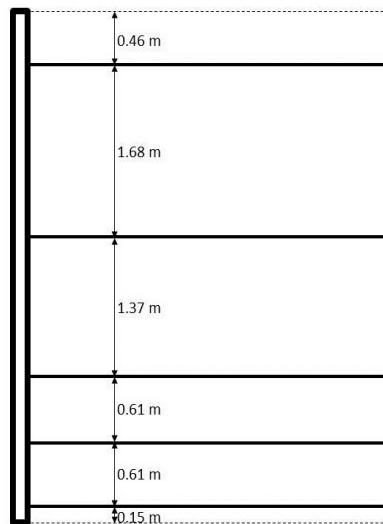
اثر طول و فاصله لایه‌های ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل خاک مسلح با استفاده از روش اجزای محدود

نباید کمتر از ۳ لایه باشد (توفیق، ۲۰۱۲).

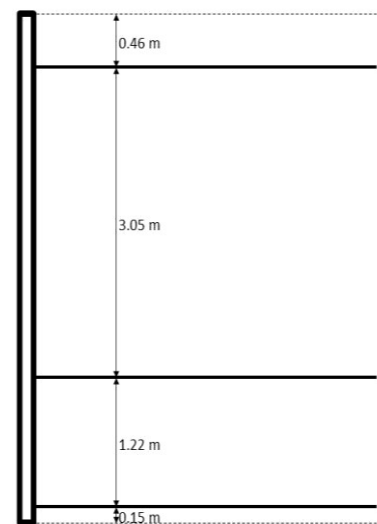
قرار گرفته‌اند را نشان می‌دهد. در انتخاب این چیدمان‌ها به این نکته توجه شده است که حداقل تعداد لایه‌ها



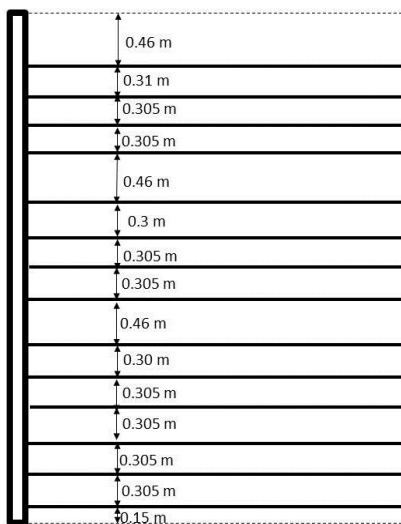
ج) دیوار حائل متشکل از هفت لایه ژئوگرید



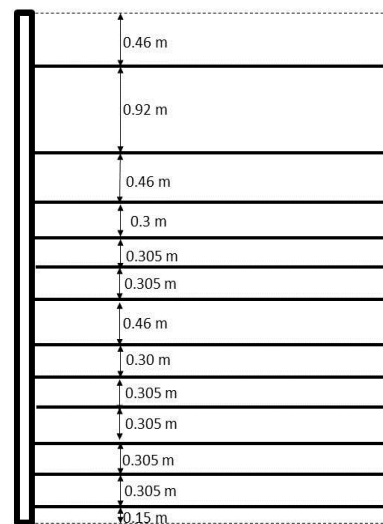
ب) دیوار حائل متشکل از پنج لایه ژئوگرید



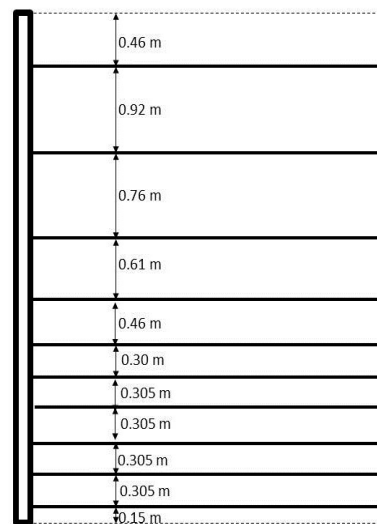
الف) دیوار حائل متشکل از سه لایه ژئوگرید



و) دیوار حائل متشکل از ۱۴ لایه ژئوگرید



ه) دیوار حائل متشکل از ۱۲ لایه ژئوگرید



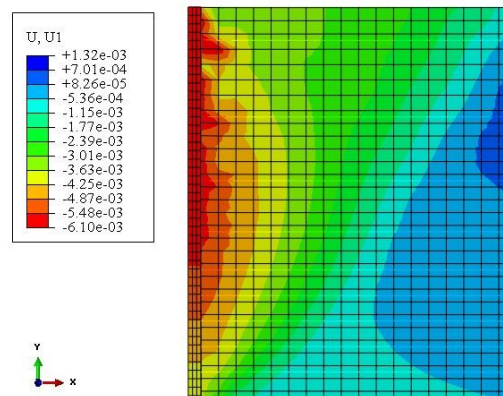
د) دیوار حائل متشکل از ۱۰ لایه ژئوگرید

شکل ۱۲. چیدمان‌های مختلف از لایه‌های ژئوگرید

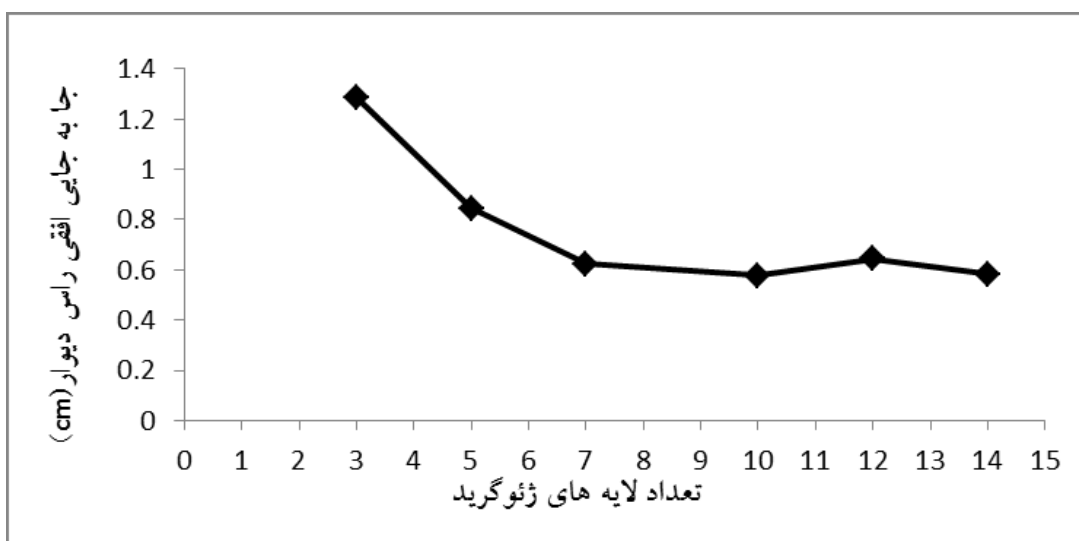
به‌دست آمده است. شکل ۱۳، کانتورهای جابه‌جایی افقی دیوار را نشان می‌دهد.

به منظور بررسی تأثیر چیدمان‌های مختلف ژئوگرید در عملکرد دیوار، مقدار جابه‌جایی رأس دیوار و مقادیر تنش در لایه‌های مختلف ژئوگرید از نرم‌افزار

لایه‌های مختلف ژئوگرید در شکل ۱۴ رسم شده است. طبق این شکل، با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید، جابه‌جایی دیوار کاهش می‌یابد. همچنین، این نمودار نشان می‌دهد که بعد از افزایش لایه‌های ژئوگرید به هفت لایه، تغییر زیادی در جابه‌جایی دیوار ایجاد نشده است. بنابراین، برای این دیوار خاص، به منظور کاهش جابه‌جایی دیوار، نیازی به استفاده از بیش از ۷ لایه ژئوگرید نیست. این در حالی است که روش تعادل حدی، استفاده از ۱۰ لایه ژئوگرید را توصیه کرده است، که این مقدار محافظه‌کارانه است.



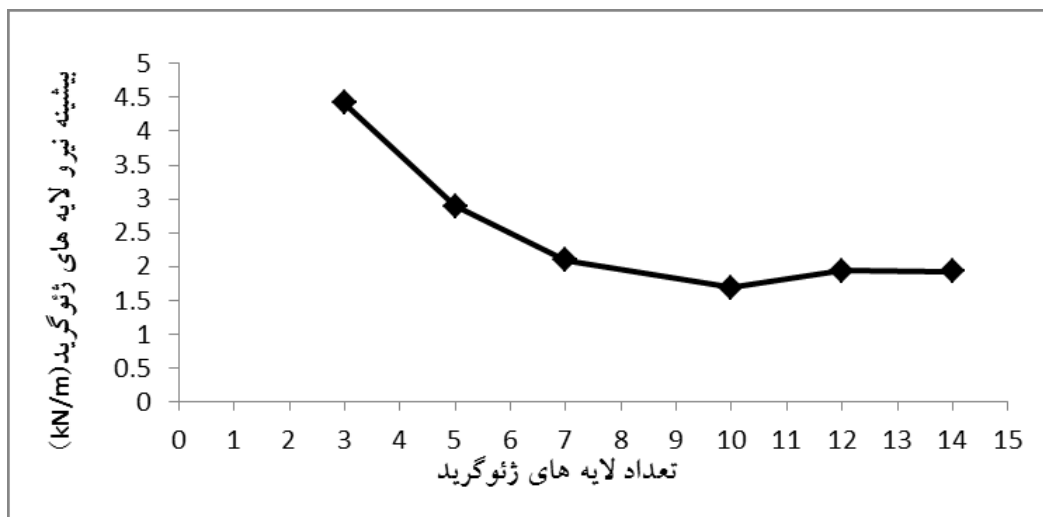
شکل ۱۳. کانتورهای جابه‌جایی افقی دیوار
 ۴-۲-۱. میزان جابه‌جایی رأس دیوار به‌ازای چیدمان-
 های مختلف لایه‌های ژئوگرید
 نمودار جابه‌جایی افقی رأس دیوار برحسب تعداد



شکل ۱۴. نمودار جابه‌جایی افقی رأس دیوار به‌ازای تعداد لایه‌های مختلف ژئوگرید

برابر با 19 kN/m است و مقادیر بیشینه نیروی ایجاد شده در لایه‌های ژئوگرید، بسیار کمتر از این مقدار و برای چیدمان‌های ۷، ۱۰، ۱۲ و ۱۴ لایه در حدود ۰/۱ بیشینه مقاومت کششی ژئوگرید هستند. این نتیجه نشان می‌دهد که با توجه به شرایط بارگذاری، هندسه و سایر مشخصات مدل، پارامتر مقاومت کششی تأثیر چندانی بر عملکرد دیوار حائل مورد نظر ندارد.

۴-۲-۲. نیروی ایجاد شده در لایه‌های ژئوگرید
 به منظور بررسی تأثیر چیدمان‌های مختلف بر بیشینه نیروی ایجاد شده در لایه‌های ژئوگرید، شکل ۱۵ رسم شده است. مطابق این شکل، بیشینه تنش ایجاد شده در لایه‌های ژئوگرید برای چیدمان‌هایی که شامل ۷ لایه و بیشتر هستند، تقریباً مقداری ثابت دارد. همچنین، بیشینه مقاومت کششی ژئوگرید مصرفی در این تحقیق

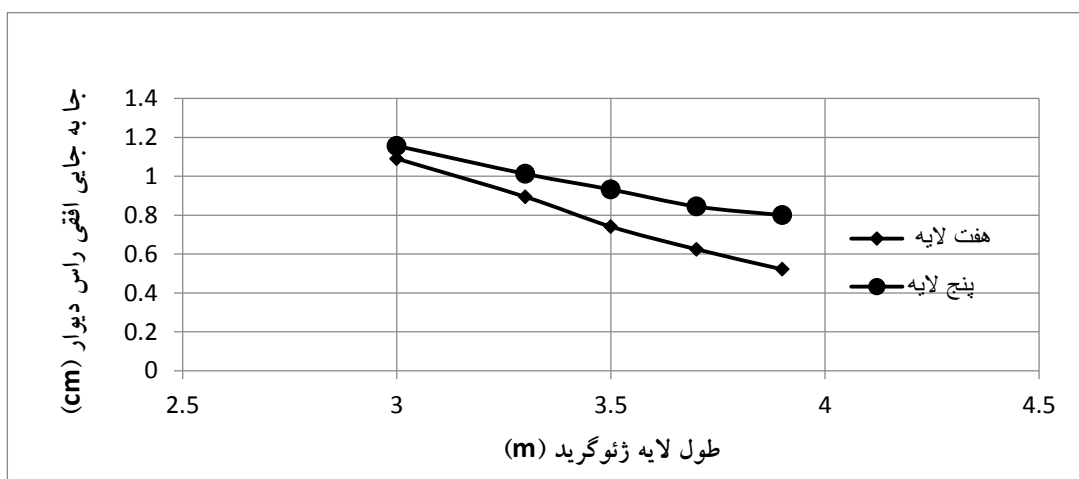


شکل ۱۵. نمودار بیشینه نیروی ایجاد شده در لایه‌های ژئوگرید به ازای تعداد لایه‌ها

ژئوگرید وجود ندارد. بنابراین، این امکان وجود دارد که با اندکی افزایش طول ۵ لایه ژئوگرید، همان جابه‌جایی در حالت ۷ لایه ژئوگرید حاصل شود. با تغییر طول لایه‌های ژئوگرید، این موضوع بررسی و نتایج حاصل از آن در نمودار شکل ۱۶ ارائه شده است.

۳-۴. تأثیر طول لایه‌های ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل خاک مسلح

به منظور اقتصادی‌تر شدن ساخت دیوار خاک مسلح، می‌توان با افزایش طول لایه‌های ژئوگرید، تعداد آنها را کاهش داد. طبق شکل ۱۶، تفاوت چندانی در جابه‌جایی دیوار به ازای ۷ لایه ژئوگرید و ۵ لایه



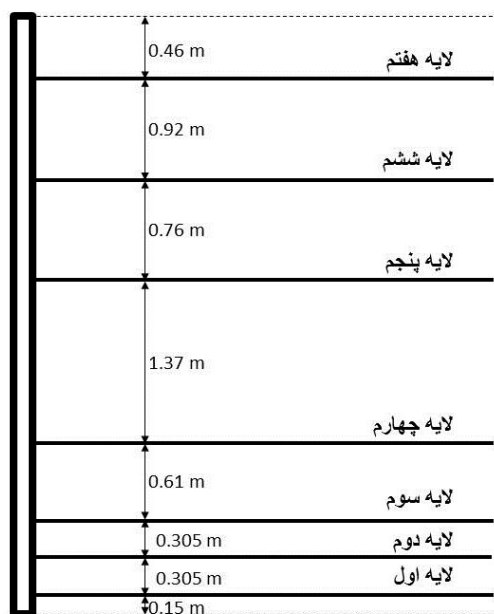
شکل ۱۶. نمودار جابه‌جایی افقی رأس دیوار بر حسب طول لایه‌های ژئوگرید برای چیدمان‌های متشکل از پنج و هفت لایه ژئوگرید

به عنوان مثال، برای رسیدن به جابه‌جایی افقی ۰/۸ سانتی‌متر، می‌توان به جای استفاده از ۷ لایه ژئوگرید با

طبق نمودار شکل ۱۶، برای رسیدن به هر جابه‌جایی مشخص، می‌توان به جای استفاده از ۷ لایه ژئوگرید، از ۵ لایه ژئوگرید با طول بیشتر استفاده کرد.

رأس دیوار بر حسب حذف هر یک از لایه‌های چیدمان هفت‌تایی ارائه شده است.

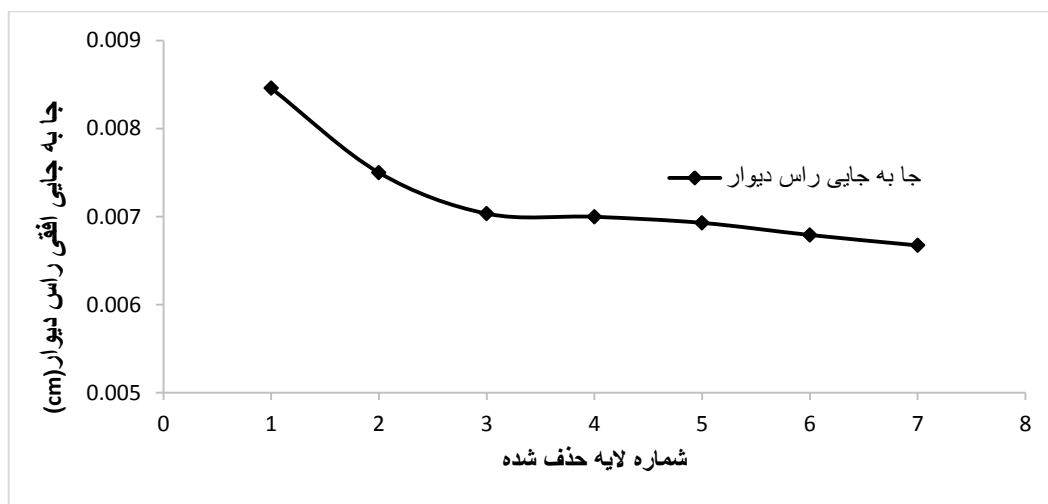
طول ۳/۹ متر، از ۵ لایه ژئوگرید با طول ۳/۴ متر استفاده کرد و به طراحی اقتصادی‌تری دست یافت.



شکل ۱۷. شماره لایه‌های چیدمان هفت‌تایی

۴-۴. تأثیر محل قرارگیری لایه‌های ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل خاک مسلح

به منظور بررسی میزان وابستگی جابه‌جایی رأس دیوار به محل قرارگیری لایه‌های ژئوگرید، با حذف لایه‌های مختلف، تأثیر هر یک بررسی شد. از آنجا که هفت لایه ژئوگرید به عنوان چیدمان بهینه در قسمت قبل انتخاب شد، در این قسمت با در نظر گرفتن چیدمان هفت‌لایه‌ای، در هر مرحله یکی از لایه‌ها حذف شده و تأثیر آن بر میزان جابه‌جایی افقی رأس دیوار ثبت شده است. شکل ۱۷ شماره لایه‌ها را نشان می‌دهد و در شکل ۱۸ نمودار میزان جابه‌جایی افقی



شکل ۱۸. نمودار میزان جابه‌جایی افقی رأس دیوار بر حسب حذف هر یک از لایه‌های چیدمان هفت‌تایی

نسبتاً زیادی در جابه‌جایی افقی رأس دیوار دارد و تعداد لایه‌ها در این قسمت نیز باید بیشتر از قسمت میانی اتخاذ گردد.

شکل ۱۸ نشان می‌دهد که حذف لایه‌های پایین دیوار بیشترین تأثیر را بر جابه‌جایی افقی رأس دیوار دارد. بنابراین، در طراحی چیدمان لایه‌ها باید به این نکته توجه شود که تراکم بیشتری برای لایه‌های پایینی در نظر گرفته شود. همچنین، شکل ۱۸ نشان می‌دهد که حذف لایه‌های ژئوگرید در قسمت بالای دیوار نیز تأثیر

۵. نتیجه‌گیری

نتایج تغییرات طول لایه‌ها نشان داد که می‌توان با کاهش طول لایه‌های ژئوگرید، برای رسیدن به جابه‌جایی یکسان، از تعداد لایه‌های کمتری استفاده کرد. مطابق نتایج به‌دست آمده، می‌توان با استفاده از روش اجزای محدود، به طراحی اقتصادی‌تری نسبت به نتایج حاصل از روش تعادل حدی دست یافت. همچنین، با حذف لایه‌های مختلف چیدمان هفت لایه‌ای، میزان وابستگی جابه‌جایی افقی رأس دیوار به محل قرارگیری لایه‌های ژئوگرید بررسی شد و این نتیجه به‌دست آمد که لایه‌های زیرین ژئوگرید، نسبت به سایر لایه‌ها، بیشترین تأثیر را در جابه‌جایی افقی رأس دیوار دارند. از این رو، باید طراحان در طراحی چیدمان لایه‌ها از تعداد لایه‌های بیشتری در قسمت پایین دیوارهای حائل استفاده کنند.

مقایسه کرنش‌های به‌دست آمده در طول لایه‌های مسلح‌کننده با مقادیر واقعی نشان داد که این مقادیر، مخصوصاً در لایه‌های بالایی، مطابقت خوبی با هم دارند. بر اساس این مقایسه، روش اجزای محدود روش مناسبی برای مدل‌سازی دیوارهای حائل خاک مسلح است و از آن می‌توان تا حد خوبی برای پیش‌بینی رفتار این سازه‌ها استفاده کرد. همچنین، تغییر در چیدمان لایه‌های ژئوگرید نشان داد که برای این دیوار خاص، با افزایش تعداد لایه‌های ژئوگرید از هفت تا، کاهش محسوسی در جابه‌جایی دیوار و نیروهای ایجاد شده در لایه‌های ژئوگرید ایجاد نشده است. این در حالی است که روش تعادل حدی، تعداد لایه‌های ژئوگریدی مورد نیاز را ده لایه برآورد کرده است. از طرف دیگر،

۶. مراجع

- Berg, R. R., Bonaparte, R., Anderson, R. P. and Chouery, V. E. 1986. "Design, Construction and Performance of Two Geogrid Reinforced Soil Retaining Walls". Proceedings of the Third International Conference on Geotextiles, PP. 401-406.
- Bolton, M. D. 1986. "The strength and dilatancy of sands". *Géotechnique*, 36(1): 65-78.
- Damians, I. P., Bathurst, R. J., Josa, A. and Lloret, A. 2014. "Numerical analysis of an instrumented steel-reinforced soil wall". *Int. J. Geomech.*, 15(1): 04014037.
- Das, B. M. 2015. "Principles of Foundation Engineering". Cengage Learning, Stamford, CT, USA.
- El-Hoseiny, K.E. 1999. "Analysis of field Tensar retained wall with DSC model and FEM". PhD Dissertation, Dept. of Civil Eng. and Eng. Mech., University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.
- Fannin, R. J. and Hermann, S. 1990. "Performance data for a sloped reinforced soil wall". *Can. Geotech. J.*, 27(5): 676-686.
- Federal Highway Administration (FHWA). 1989. "Tensar geogrid-reinforced soil wall". Experimental Project No. 1, Ground Modification Systems, FHWA-EP-90-001-005, Washington, D. C.
- Fishman, K. L. and Desai, C. S. 1991. "Response of a geogrid earth reinforced retaining wall with full height precast concrete facing". Proceedings of Geosynthetics Conference, Atlanta, Georgia, USA. 2: 691-700.
- Gray, D. H. and Ohashi, H. 1983. "Mechanics of fiber reinforcement in sand". *J. Geotech. Eng.*, 109(3): 335-353.
- Hussein, M. G. and Meguid, M. A. 2013. "Three-dimensional finite element analysis of soil-geogrid interaction under pull-out loading condition". Proceedings of GeoMontreal, 66th Canadian Geotechnical Conference, Canadian Geotechnical Society, Montreal, Quebec, Canada, PP. 452-458.
- Kokutse, N., Fourcaud, T., Kokou, K., Neglo, K. and Lac, P. 2006. "3D numerical modelling and analysis of the influence of forest structure on hill slopes stability". *In: Marui Hea (Ed.), Interpraevent 2006: Disaster Mitigation of Debris Flows, Slope Failures and Landslides, Niigata, Japan*, PP. 561-567.
- Liu, H. L., Ng, C. W. and Fei, K. 2007. "Performance of a geogrid-reinforced and pile-supported highway embankment over soft clay: Case study". *J. Geotech. Geoenviron. Eng.*, 133(12): 1483-1493.
- Ouria, A., Toufigh, V., Desai, C., Toufigh, V. and Saadatmanesh, H. 2016. "Finite element analysis of a CFRP reinforced retaining wall". *Geomech. Eng.*, 10(6): 757-774.
- Pepper, D. W. and Heinrich, J. C. 2005. "The Finite Element Method: Basic Concepts and Applications". CRC Press.

- Rowe, R. K. and Ho, S. K. 1992. "A review of the behavior of reinforced soil walls". International Symposium on Soil Reinforcement, Kyushu, November, PP. 47-76.
- Toufigh, V. 2012. "Experimental and analytical studies of geo-composite applications in soil reinforcement". PhD Dissertation, Dept. of Civil Eng. and Eng. Mechanics, University of Arizona, Tucson, Arizona, USA.
- Vermeer, P. A. and De Borst, R. 1984. "Non-associated plasticity for soils, concrete and rock". HERON, 29(3): 163-195.
- Vidal, H. 1960. "The development and future of reinforced earth". Keynote address, Symposium 36 on Earth Reinforcement, ASCE Annual Convention, Pittsburgh, PA.
- Wu, J. T. 1992. "Predicting performance of the Denver walls: General report". Proceedings of the International Symposium on Soft Geosynthetic-Reinforced Soil Retaining Walls, Balkema AA.
- Yoo, C. and Jung, H. Y. 2006. "Case history of geosynthetic reinforced segmental retaining wall failure". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 132(12): 1538-1548.
- Yu, Y., Bathurst, R. J. and Allen, T. M. 2016. "Numerical modeling of the SR-18 geogrid reinforced modular block retaining walls". J. Geotech. Geoenviron. Eng., 142(5): 04016003.
- Zienkiewicz, O. C., Humpheson, C. and Lewis, R. W. 1977. "Discussion: Associated and non-associated visco-plasticity and plasticity in soil mechanics". Géotechnique, 27(1): 101-102.

اثر طول و فاصله لایه‌های ژئوگرید بر عملکرد دیوار حائل خاک مسلح با استفاده از روش اجزای محدود