



مقایسه، صحت سنجی و پیش بینی عددی و آزمایشگاهی مدل‌های پارامتری شیروانی‌های خاکی مسلح شده توسط ژئوتکتایل با ابعاد واقعی (Full Scale)

بهروز حلیمی^۱، بهنام اسدی^۲

۱- دانشجوی دکتری ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی واحد اراک

۲- کارشناسی ارشد ژئوتکنیک، مدرس دانشگاه آزاد همدان

behnam.asadi.ce@gmail.com

خلاصه

از آنجایی که بررسی شرایط پایداری و زوال شیبه‌های شیروانی خاکی یکی از مسائل مرتبط با رشته تخصصی خاک و پی بشمار می‌آید و با نظر به اینکه همواره خروجی‌های حاصل از بررسی‌های نرم افزاری بر مبنای شبیه‌سازی‌های عددی مادامی که در قالب عملیات آزمایشگاهی صحت سنجی و مقایسه نگردند چندان منطبق بر شرایط درجا و واقعی نمی‌باشد، در این مقاله شیروانی‌های خاکی مسلح شده با ژئوتکتایل از روش‌های عددی و آزمایشگاهی ارائه و نتایج با ابعاد واقعی (Full Scale) مقایسه شده است.

در واقع در این تحقیق با استفاده از نرم افزار plaxis بصورت دو بعدی و سه بعدی و نرم افزار Flac بصورت دو بعدی و همچنین در شرایط آزمایشگاهی و در ابعاد مدلسازی کوچک و یا به عبارتی در سطح تنش‌های پایین و همچنین مطالعه در حالت ابعاد واقعی با استفاده از آنالیز ابعادی و بزرگنمایی ۱۰ برابر نسبت به شرایط تنش‌های پایین، پایداری شیروانی‌های خاکی با حضور مصالح مسلح کننده ژئوتکتایل بررسی و خروجی‌های بدست آمده جهت بکارگیری در موارد اجرایی و نظری در سازه‌های خاکی شیبدار از نقطه نظر تاثیرات بهینه مصالح تسلیح کننده حاضر در مرز لایه‌های شیروانی خاکی گزارش می‌شود. لازم به ذکر است شیروانی‌های بررسی شده بصورت مقید شده و غیر مقید شده از کف و دیواره‌های جانبی و در حالات و ارتفاع‌های مختلف قرارگیری ورق‌های مسلح کننده، در قالب مدل‌های پارامتری ۱۱ گانه با یکدیگر مقایسه و صحت سنجی شده‌اند.

با توجه به آنکه ژئوتکتایل در سطوح تنش‌های پایین (آزمایشگاهی) حداکثر ۳ درصد از ظرفیت کششی خود را بروز می‌دهد لازم است تا در مدل واقعی شرایط عملکردی آن ظرفیت سنجی گردد، زیرا در این مقاله تنها مدل‌های واقعی پیش بینی و با شرایط آزمایشگاهی و عددی مقایسه صورت گرفته است.

کلمات کلیدی: شیروانی خاکی، ژئوتکتایل، آنالیز ابعادی، نرم افزار plaxis

۱. مقدمه :

کارهای تحقیقاتی آزمایشگاهی و FULL SCALE بر مبنای اصول علمی، مستند و واقعی می‌باشند که به لحاظ رتبه بندی و درجه اهمیت در مرتبه بالایی قرار دارند، چرا که از پارامترهای کیفی و کمی طبیعت و خصوصیات مصالح واقعی در محل گرفته شده و برخلاف فضای عددی، مدلسازی در شرایط واقعی یا نزدیک به واقعیت انجام یافته است. از دیرباز نیز مقایسه شرایط واقعی Full Scale عملکرد سازه‌های خاکی در طبیعت با شرایط آزمایشگاهی مد نظر محققین این رشته بوده است. امروزه با وجود نرم افزارهای عددی و محاسباتی مخصوص به آنالیز سازه‌های خاکی می‌توان مدل واقعی را در نرم افزار مدلسازی کرده و پس از آنالیز از روی نتایج خروجی دورنمایی از کار Full Scale را پیش بینی نمود و در مدت زمان کمتری به اهداف مورد نظر در این رابطه رسید. در این مقاله به مقایسه روش‌های عددی دوبعدی، سه بعدی، آزمایشگاهی و در نهایت FULL SCALE پرداخته و به لحاظ کلیه پارامترهای کیفی مدل‌های ۱۱ گانه را مورد بررسی و ارزیابی قرار داده ایم. پس از بررسی و آنالیز می‌توان مدل‌های برتر پارامتریکی را انتخاب نموده و از روی نتایج به دست آمده نهایی بهترین و بدترین مدل پارامتریکی راگزینش نمود. حال پس از بررسی

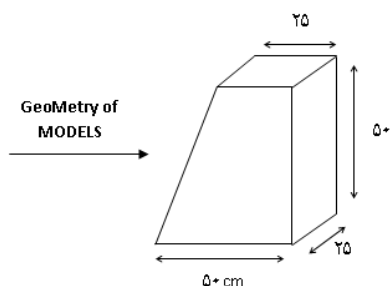


موارد فوق به بررسی درصد صحت سنجی نتایج آزمایشگاهی و عددی پرداخته و شرایط مقایسه ای با حالت های مدل های دیمانسیون کوچک آزمایشگاهی و عددی با FULL SCALE داشته بطوری که شیروانی های خاکی در حالت مقید شده و غیرمقید شده از کف با هم مقایسه می شوند. در نهایت مقایسه ی کلی بین تنوع قرارگیری ژئوتکستایل ها در لایه های مختلف از جهت میزان ظرفیت کششی موثر آن ها انجام می گیرد که از روی نتایج به دست آمده می توان درصد تاثیرات بهینه مصالح مسلح کننده را در شیروانی های خاکی مقید شده و غیرمقید شده ارزیابی کرد.

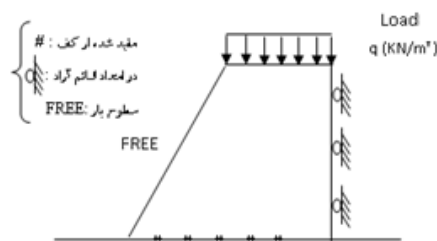
۲. مدلسازی و بارگذاری

در ابتدا بایستی شکل هندسی مدلها بررسی و طراحی می شد که با توجه به شکل هندسی اکثر شیروانیهای خاکی و با عنایت به شرایط مدلسازی در آزمایشگاه می بایست شکلی طراحی می شد که امکان مدلسازی در آزمایشگاه وجود داشته باشد و با این فرض شیروانی خاکی یکطرفه همانند شکل شماره ۱ با ابعاد مقطع تحتانی ۲۵×۵۰ سانتیمتر و مقطع فوقانی ۲۵×۲۵ سانتیمتر و با ارتفاع ۵۰ سانتیمتر به صورت دوزنقه شبیدار با شیب $۲:۱$ از جنس شیشه فشرده نشکن شفاف با ضخامت ۶ میلیمتر بطوری که بتوان سطوح لغزش و مقادیر تغییر مکانهای افقی و قائم را در آزمایشگاه مشاهده نمود ساخته شد، و چون در آزمایشگاه شرایط مصالح موجود در کف مدل همانند مدل طبیعی نبود ناگزیر از شرایط مرزی مقید شده از کف توسط همان شیشه فشرده نشکن استفاده شد [۱]. همچنین به دلیل اینکه اگر شیروانی دو طرفه استفاده می شد هم حجم مصالح مصرفی مدل در آزمایشگاه بالا می رفت و هم اینکه جهت مدلسازی بایستی حداقل چهار روز طوری که هیچگونه رطوبتی از مدل جهت دقت نتایج کاسته نشود و نیز بدلیل اینکه با مدل های سازه های خاکی مثل سد و روسازی راه اشتباه گرفته نشوند اقدام به ساخت هندسه ای اینچنینی شد. کار تحقیقاتی حاضر مدل جدیدی در عرصه آنالیز مدل های شیروانی خاکی می باشد [۲ و ۳].

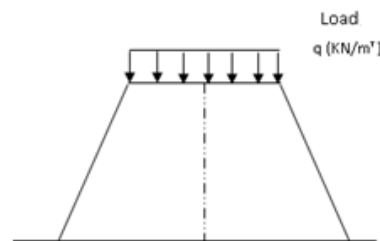
سیستم اعمال بار به صورت دستی با قرار دادن پلیتهای مربعی به ابعاد تقریبی ۲۵×۲۵ سانتیمتر که همان ابعاد متناظر بارگذاری فوقانی مدل می باشد، اجرا شده که با توزین آنها از قبل و با پیش بینی های لازم بارگذاری در مدت زمان حدودا ۱۵ دقیقه انجام گردید. ژئوتکستایل جهت تحکیم و مقاوم سازی مدل های آزمایشگاهی در لایه های مختلف برابر مدل های پارامتریک ۱۱ گانه قرار گرفته که بیشتر در کشش کار می کنند. نحوه کاربرد آنها بدین صورت است که الیاف مصنوعی فوق الذکر در ابعاد خواسته شده بریده و در محل مناسب از قبل تعیین شده نصب می گردند و پس از اعمال بار در انتهای بارگذاری تاثیرات حداکثری خود را بر روی کنترل پایداری و گسیختگی مدلها به وضوح پس از قرائت تغییر مکان ها نشان می دهند [۴ و ۷]. شرایط مرزی مدل ها با بار گسترده بکنواخت در اشکال شماره ۲ و ۳ نشان داده شده است:



شکل ۱- هندسه مدلها



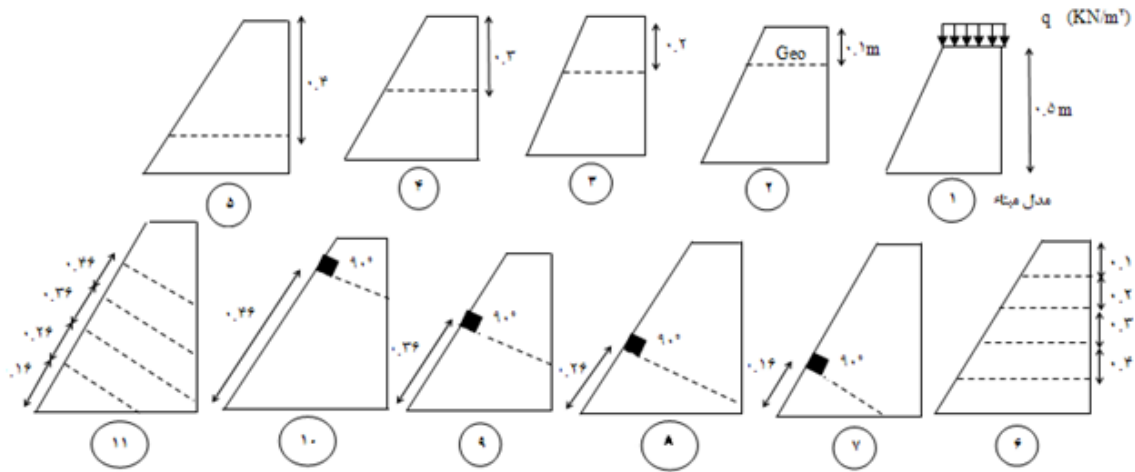
شکل ۳- شیروانی یکطرفه



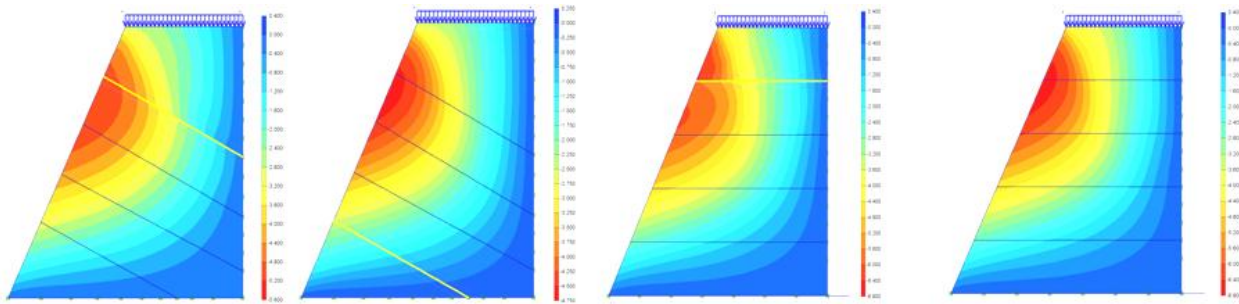
شکل ۲- شیروانی دو طرفه



در شکل ۴ هندسه و مشخصات مدل‌های پارامتریک استاتیکی ۱۱ گانه نشان داده شده است :

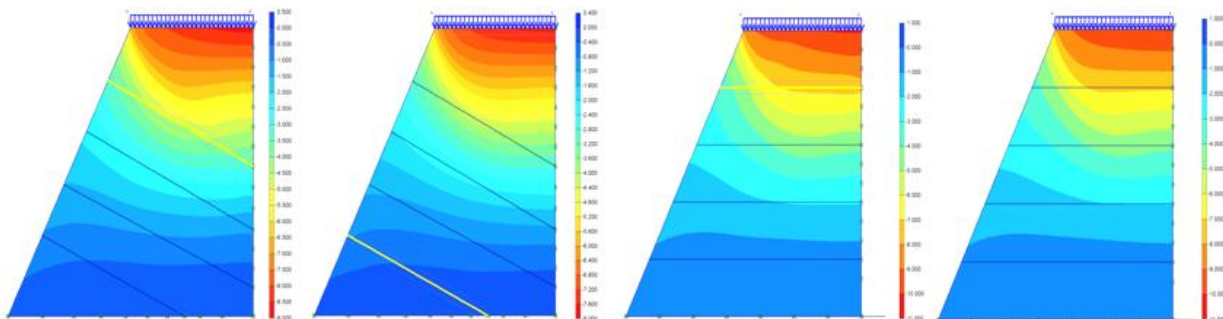


شکل ۴-مدلهای پارامتریک ۱۱ گانه



شکل ۵- حداکثر تغییر مکان افقی خروجی از مدلسازی استاتیکی نرم افزار PLAXIS-2D

الف- مدل (۱) ب- مدل (۲) ج- مدل (۷) د- مدل (۱۰)



شکل ۶- حداکثر تغییر مکان قائم خروجی از مدلسازی استاتیکی نرم افزار PLAXIS-2D

الف- مدل (۱) ب- مدل (۲) ج- مدل (۷) د- مدل (۱۰)



جدول ۱- نتایج آنالیز نهایی مدل‌های پارامتریک به لحاظ جمیع جهات

ردیف	نوع آنالیز	شماره بهینه ترین مدل	دلایل انتخاب
۱	PLAXIS-2D	۱۰	تحمل حداکثر بار و تنش عمودی - حداکثر تعداد نقاط پلاستیک
۲	PLAXIS-3D	۷	حداکثر تعداد نقاط پلاستیک و Cap+Hard
۳	PLAXIS-3D(10times scale)	۲	تحمل حداکثر بار و تنش عمودی
۴	FLAC-2D	۱۰	تحمل حداکثر بار و تنش عمودی
۵	LABORATORY(3D)	۱۰	تحمل حداکثر بار و تنش عمودی

۳. پیش بینی شرایط FULL SCALE در مدل های پارامتریک

- در مدل آزمایشگاهی ابعاد با مقیاس $S.C = \frac{1}{10}$ انتخاب شده اند که در واقع مدل واقعی FULL SCALE، ۱۰ برابر بزرگتر می باشد.

- فرمول ها و روابط آنالیز ابعادی :

$$L_r = \frac{L_m}{L_p} \quad (۱) \quad A_r = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^2 \quad (۲) \quad T_r = \sqrt{L_r} \quad (۳) \quad V_r = \sqrt{L_r} \quad (۴)$$

$$\alpha_r = 1 \quad (۵) \quad F_r = (L_r)^3 \quad (۶) \quad L_r = S.C \quad (۷) \quad m = \frac{C}{\gamma.H} \quad (۸)$$

- کلیه ابعاد اعم از طول، عرض و ارتفاع ۱۰ برابر می شوند.

- زمان بارگذاری Time interval ۳/۲ برابر یعنی ۱۶ ثانیه می شود.

- حداکثر ظرفیت باربری ۱۰۰۰ برابر می شود.

- در مقایسه انجام یافته واضح است که بایستی ابعاد مدل آزمایشگاهی و عددی مدلسازی شده ۱۰ برابر شوند و ابعاد مدل واقعی برابر با ارتفاع

5m و ابعاد کف 5×2.5 m و ابعاد سطح 2.5×2.5 m در نظر گرفته شوند.

در مقایسه اولیه این ذهنیت بنظر می رسد که چون مدل ۱۰ برابر بزرگتر می شود پس حداکثر ظرفیت باربری نیز باید ۱۰ برابر بزرگتر شود اما پس از

مدلسازی مشخص گردید که اینچنین نبوده و برعکس حداکثر ظرفیت باربری در مقیاس واقعی کمتر از نصف مدل آزمایشگاهی می شود که این

بدلیل افزایش ارتفاع شبروانی و کاهش عدد پایداری با توجه به رابطه شماره ۸ می باشد که بر اساس محاسبه عدد پایداری مدل آزمایشگاهی $m=1.1$

و عدد پایداری مدل واقعی $m=0.11$ بدست می آید .

پس از آنالیزهای انجام یافته طبق جدول شماره ۲ میزان تغییرات حداکثر ظرفیت باربری - تغییر مکان افقی و قائم مدل ها با یکدیگر مقایسه شده اند:

با توجه به این که کف مدل به صورت مقید شده در نظر گرفته شده، در ابعاد FULL SCALE تغییر مکان های افقی دارای مقادیر بیشتری نسبت

به تغییر مکان های قائم می باشند که این روند در مدل های شبروانی خاکی واقعی در طبیعت به دلیل شرایط مرزی کف غیر مقید شده بسیار متفاوت

خواهند بود. چرا که برابر شکل شماره ۷ گوه های گسیختگی در زیر شبروانی و با زوایای $\beta = 53^\circ > 63.43^\circ$ دواير گسیختگی همگی در پای

شبروانی ایجاد میشوند و مقادیر نتایج در ابعاد Full Scale از نظر تغییر مکان های افقی و قائم تغییر کرده و پیش بینی می شود که تغییر مکان های

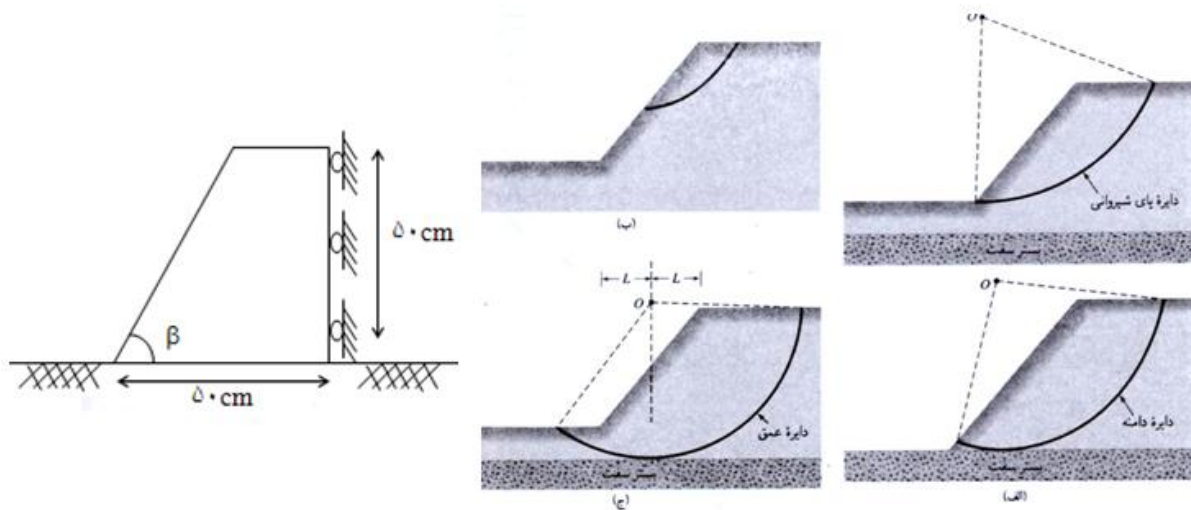
قائم در اینجا برعکس بیشتر از تغییر مکان های افقی در حالت عددی و خصوصا مدل مبنا به دلیل فقدان ژئوتکستایل و در مدل های پارامتریک با

وجود ژئوتکستایل کنترل زیادی شوند. [۹و۸]



جدول ۲- مقایسه پارامترهای کیفی مدل های آزمایشگاهی با مدل Full Scale

ردیف	شماره مدل	افزایش تغییر مکان افقی مدل به Full Scale	افزایش تغییر مکان قائم مدل به Full Scale	میزان کاهش حداکثر ظرفیت باربری مدل به Full Scale	کاهش عدد پایداری مدل به Full Scale
۱	۱	۹.۵۹ برابر	۹.۷۱ برابر	۲.۱۸ برابر	۱۰ برابر
۲	۲	۱۱.۶ برابر	۸.۴۲ برابر	۲.۲۲ برابر	"
۳	۳	۱۱.۶ برابر	"	"	"
۴	۴	"	"	"	"
۵	۵	"	"	"	"
۶	۶	"	"	۲.۲۲ برابر	"
۷	۷	۹.۴۶ برابر	۸.۵۲ برابر	۲.۶۹ برابر	"
۸	۸	"	"	"	"
۹	۹	"	"	"	"
۱۰	۱۰	"	"	"	"
۱۱	۱۱	"	"	۲.۵۸ برابر	"



شکل ۷- حالت های گسیختگی شیروانی محدود: الف) گسیختگی دامنه، ب) گسیختگی کم عمق دامنه، ج) گسیختگی عمیق

به دلیل کوچک بودن مدل آزمایشگاهی و وجود پدیده Local failure میزان نتایج تغییر مکان بسیار با مدل واقعی Full Scale به لحاظ سیستم گسیختگی متفاوت می باشد، چرا که در مدل های واقعی Full Scale و در حضور مسلح کننده ای چون ژئوتکستایل تغییر مکان ها کنترل شده و با توجه به این که در مدل آزمایشگاهی به دلیل پایین بودن سطح تنش ها ژئوتکستایل به حد کششی نهایی خود برای تحمل بار نمی رسد و عکس العمل واقعی خود را در مدل های بزرگ نشان خواهد داد که هدف از این تحقیق صرفاً مقایسه روش های عددی با آزمایشگاهی می باشد [۱۰ و ۴]. برای کنترل تاثیر محل قرارگیری ژئوتکستایل و نیز تنوع و پراکندگی آن ها در شیروانی های خاکی مدل هایی از ژئوتکستایل در لایه های مختلف و در زوایای متنوع در شیروانی غیر مقید شده از کف (مدل طبیعی) در نرم افزار PLAXIS-2D مدل سازی شده و اختلاف نتایج عملکرد آن ها مورد بررسی و آنالیز بهینه قرار گرفته که نتایج به قرار جدول شماره ۳ ارائه شده است :



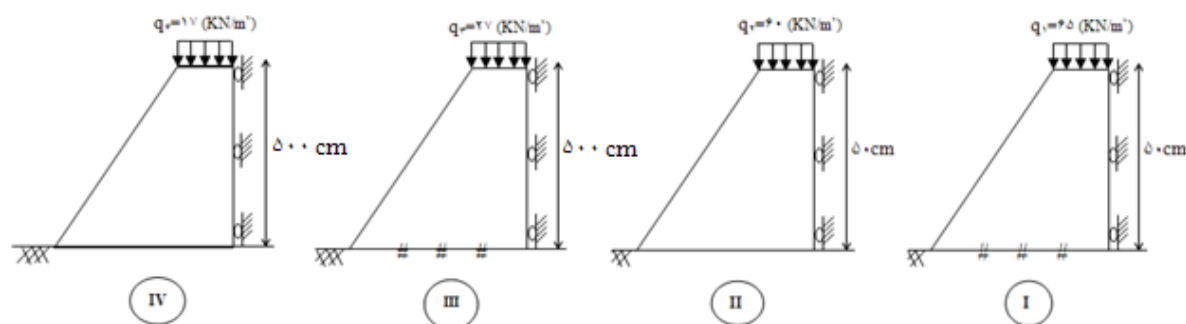
جدول ۳- نتایج خروجی نرم افزار PLAXIS-2D در مدل غیر مقید شده از کف

ردیف	شماره مدل	حداکثر تغییر مکان افقی (mm)	حداکثر تغییر مکان قائم (mm)	حداکثر تنش کارتزین در جهت (yy) (KN/m ²)	حداکثر تعداد نقاط پلاستیک	حداکثر تعداد نقاط Cap+Hard	حداکثر ظرفیت باربری قبل از Collapse (KN/m ²)	ضریب اطمینان	ظرفیت کششی ژئوتکستایل (KN/m)
۱	۱	۱۴.۶۱	۴۶.۴۷	۷۹.۲۷	۶۲۵۲	۱۲۴۵	۶۴	۰.۹۸۹	۰.۱۸۴
۲	۲	۱۱.۵۶	۳۷.۴	۷۰.۸	۵۹۶۹	۱۲۷۴	۶۲	۰.۹۹۱	۰.۱۱۲
۳	۳	۱۱.۱۲	۳۶.۲۲	۷۵.۸۹	۶۱۶۰	۱۱۰۸	۶۲	۰.۹۸۹	۰.۱۹۵
۴	۴	۱۳.۴۹	۴۱.۷۵	۱۴۸.۰۶	۵۶۳۵	۲۹۰۲	۶۱	۰.۹۶۸	۰.۱۱۵
۵	۵	۱۰.۶۴	۳۴.۹۷	۶۶.۱۳	۶۰۶۱	۱۸۷۶	۶۰	۱.۰۱	۰.۲۸۹
۶	۶	۲۲.۸۴	۵۶.۳۹	۱۰۹.۸۵	۴۱۶۹	۲۰۱۱	۶۲	۱.۰۰	۰.۱۶۴
۷	۷	۱۰.۹۲	۳۵.۷۳	۶۸.۱۱	۵۹۰۰	۱۲۱۶	۶۱	۰.۹۵۷	۰.۱۴۲
۸	۸	۱۶.۹۱	۵۱.۹۶	۱۰۱.۴	۴۸۰۶	۲۷۱۳	۶۲	۰.۹۸۰	۰.۰۱۳

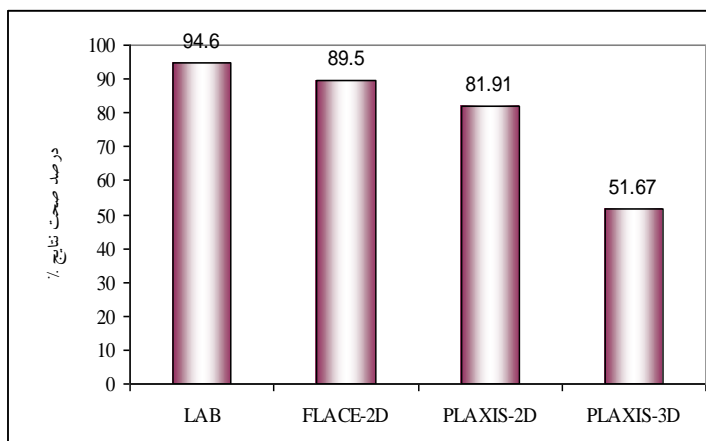
بر اساس آنالیزهای عددی و آزمایشگاهی مدل های پارامتریک که در حالت های مختلف دیمانسیون کوچیک، مقید شده از کف، غیر مقید شده از کف و FULL SCALE با ۱۰ برابر بزرگنمایی و با مبنای قرار دادن مدل شماره ۱ به عنوان مدل پایه ای و با توجه به اشکال شماره های ۸ و ۹ و ۱۰ و ۱۱ نتیجه می گیریم که در حالت Load Gravity و بدون حضور مصالح مسلح کننده ای چون Geotextile، دو فاکتور اساسی ارتفاع شیروانی و شرایط تکیه گاهی در حالات مقید شده و غیر مقید شده و نیز در مقیاس های بزرگتر نزدیک به FULL SCALE چقدر در

تعیین مقدار حداکثر ظرفیت باربری قبل از Collapse مدل ها تاثیر گذار می باشند. $[q_1 > q_2 > q_3 > q_4]$

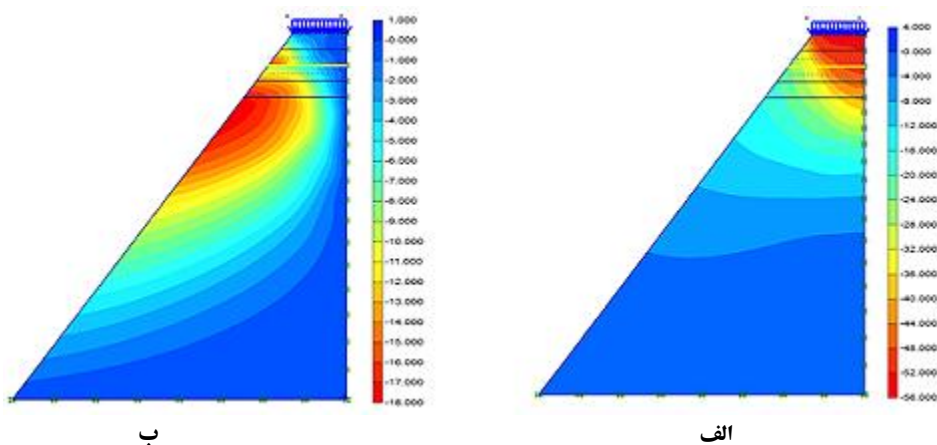
درصد افزایش باربری مدل I نسبت به II : 8 % ، درصد افزایش باربری مدل II نسبت به III : 222 % ، درصد افزایش باربری مدل III نسبت به IV : 158 %



شکل ۷- شرایط چهارگانه تکیه گاهی و ابعادی مدل



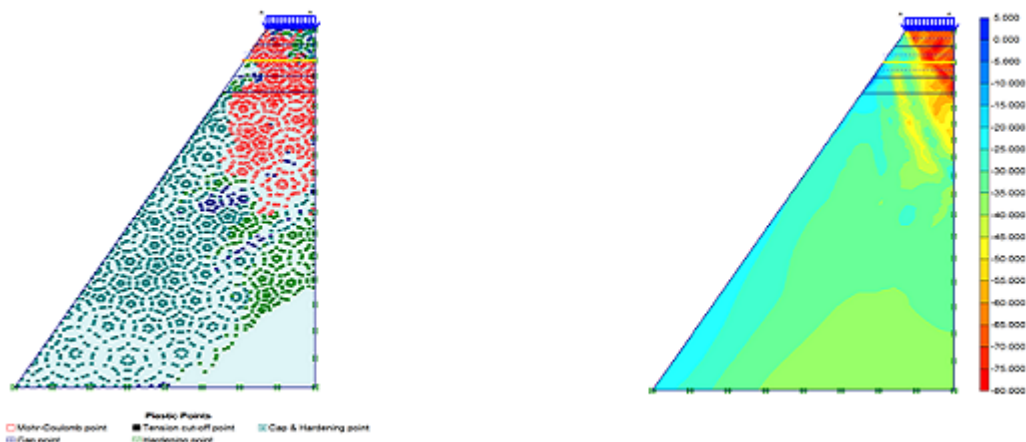
شکل ۸- درصد صحت سنجی نتایج روش های عددی و آزمایشگاهی



ب

الف

شکل ۹- تغییر مکان، الف) قائم، ب) افقی در مدل های پارامتریک متنوع FULL SCALE غیر مقید شده از کف (مدل شماره ۳)



شکل ۱۱- تعداد نقاط پلاستیک در مدل های پارامتریک متنوع FULL SCALE غیر مقید شده از کف (مدل شماره ۳)

شکل ۱۰- تنش کارتیزین در مدل های پارامتریک متنوع FULL SCALE غیر مقید شده از کف (مدل شماره ۳)



نتیجه گیری:

با توجه به آنالیزهای انجام یافته از روی کلیه پارامترهای کیفی خروجی های روش های عددی و آزمایشگاهی بر روی مدل های پارامتریک ۱۱ گانه و بررسی نقاط ضعف و قوت هر یک از مدل ها به لحاظ جمع فاکتورهای موثر در بارگذاری های صورت پذیرفته مدل شماره ۱۰ مناسب ترین و بهینه ترین مدل در شرایط شبروانی های خاکی که شرایط مرزی در کف مدل مقید شده و بدون تغییر مکان افقی و قائم باشد انتخاب گردیده است. همچنین مدل شماره ۶ نامناسب ترین مدل در شرایط تحقیقاتی مذکور به لحاظ جمع جهات به حساب می آید. با توجه به آنالیز و تحلیلهای عددی و آزمایشگاهی نتیجه می گیریم در موارد زیر استفاده از ژئوتکستایل اقتصادی است:

- در زمانی که حداکثر ظرفیت باربری شبروانی خاکی مدنظر طراح و دستگاه کارفرما باشد.
- در زمانی که فقط هدف اقتصادی مدنظر باشد و ما بخواهیم از ژئوتکستایل در مرزهای فوقانی (سطوح شبروانی) با طول مصالح مسلح کننده کمتر مانند مدل های پارامتریک بهینه، به شماره های ۱۰ و ۲ و ۷ استفاده نماییم.
- در زمانی که ارتفاع شبروانی زیاد باشد.
- در زمانی که بار دینامیکی فقط تاثیر تغییر مکان افقی در شبروانی ایجاد نماید.
- در زمانی که حجم عملیات اجرایی پروژه زیاد باشد.
- در زمانی که نوع خاک و مصالح قرضه از نوع چسبنده و دانه ای (مخلوط) انتخاب شده است.

همچنین از مقایسه مدل با شرایط FULL SCALE با شرایط دلیل پایین بودن سطح تنش ها در مدل آزمایشگاهی نتیجه می شود که چگونگی بروز تغییر شکلها و مکانیسم گسیختگی کاملا متفاوت می باشد و عملا به دلیل نزدیکی شرایط مدل FULL SCALE با ابعاد و ویژگی های شبروانی های طبیعی و واقعی تر بودن مقادیر تنشها، ژئوتکستایل به حد کششی نهایی خود برای تحمل بار رسیده و عکس العمل واقعی خود را در مدل های بزرگ نشان می دهند. همچنین در مدل با ابعاد واقعی به دلیل افزایش ارتفاع شبروانی و کاهش عدد پایداری ظرفیت باربری نسبت به مدل آزمایشگاهی کمتر از ۵۰ درصد می شود. در مقیاس های نزدیک به FULL SCALE در حالت Load Gravity و بدون حضور مصالح مسلح کننده در حالات مقید شده و غیرمقید شده دو فاکتور ارتفاع شبروانی و شرایط تکیه گاهی در تعیین مقدار حداکثر ظرفیت باربری قبل از Collapse بسیار تاثیر گذار می باشند.

منابع و مراجع:

۱. اخلاقی، رحیمی فر، ۲۰۱۰، مطالعه پارامتریک شبروانی های خاکی دو لایه به کمک روشهای تعادل حدی و روش تفاضلات محدود.
۲. بهنیا، ا، ۱۳۶۵، مکانیک خاک، جلد اول و دوم، تهران: جهاد دانشگاهی.
۳. خطیب زاده، ع، وفائیان، م، ۲۰۱۰، بررسی پارامتریک تاثیر بار سطحی بر شبروانی های خاکی مسلح.
۴. داس، اردشیر اطمینانی، ۱۳۸۷، اصول مهندسی ژئوتکنیک، تهران: نشر کتاب دانشگاهی.
۵. نورزاد، ر، ۱۳۷۹، مشخصات رفتاری ماسه با ژئوتکستایل، تهران: دانشگاه صنعتی شریف.
۶. وفائی پور، ر، ۱۳۸۴، بررسی پایداری استاتیکی - دینامیکی شبروانی های خاکی، تبریز: طرح پژوهشی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تبریز.
۷. اخذ اطلاعات لازم در خصوص تولیدات و مشخصات مسلح کننده ها (ژئوتکستایل)، شرکت ایران بنا آریان، تهران، ۱۳۹۰.

8. Apers of international conference on nonwovens the textile institute north India section.

9. Bolton, M.D., Choudhury, S.P., P.L.R. 1978. Modelling reinforced earth. Ground Engineering 11(6), 19-24

10. Chen, H.T., Hung, W.Y., Change C.C., Chen, Y.J., Lee, c.j 2007. Centrifuge modeling test of a geotextile-reinforced wall with a very wet clayey backfill. Geotextiles and Geomembranes 25(6), 346-359.