

بهینه سازی طراحی ریزشمع ها با بررسی رفتار اصطکاکی آنها در بارگذاری قائم

آریا نوروزی^{۱*}، امیر حسن رضایی فرعی^۲

۱ - کارشناس ارشد ژئوتکنیک، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد آذرشهر، گروه عمران، آذرشهر، ایران aria.norouzi@gmail.com
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه شهید مدنی آذربایجان rezaei.ah@azaruniv.ac.ir

چکیده

تحقیق حاضر به روش عددی اجزاء محدود با استفاده از نرم افزار آباکوس (ABAQUS) انجام گرفته است. در این پژوهش به منظور بررسی رفتار ریز شمع ها، یک نمونه از ریز شمع تحت اثر بارگذاری استاتیکی تحلیل می شود که در آن خاک به صورت محیط پیوسته و با مدل رفتاری الاستوپلاستیک موهر کولمب در نظر گرفته شده و ریز شمعها از جنس بتنی همراه با جداره فلزی و میلگرد با مدل رفتاری الاستیک فرض شده اند. در این بررسی، اثر تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی موثر در طراحی ریز شمع ها با بررسی میزان مقاومت اسمی خاک- دوغاب از قبیل مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب اصطکاک به صورت منفرد و گروهی تغییر یافته و نتایج حاصل بر روی مقدار نیروی ریز شمع و نشست آن مورد بررسی قرار گرفته اند. نتایج پژوهش اطلاعات ارزشمندی از تاثیر پارامترهای ژئوتکنیکی در میزان نیروی ریز شمع، نشست و مقاومت اسمی خاک - دوغاب ارائه می دهد که از مهمترین آنها تاثیر قابل ملاحظه مدول الاستیسیته در طراحی ریز شمع و نیز بهینه سازی بازه ارائه شده در انتخاب مقدار مقاومت اسمی خاک - دوغاب میباشد.

واژه‌های کلیدی: ریز شمع، مدلسازی عددی، مقاومت اسمی خاک- دوغاب، ضریب اصطکاک، Abaqus

۱- مقدمه

ریزشمع ها، شمع های با قطر کوچک (کمتر از ۳۰۰ میلیمتر) که غالباً با تسلیح فولادی سبک و تزریق دوغاب سیمان همراه می باشند. ریزشمع علاوه برآنکه به عنوان یک المان باربر و مقاوم در برابر نشست عمل میکند، بدلیل تزریق دوغاب سیمان، سبب بهبود مشخصات مکانیکی (مقاومتی و رفتاری) خاک اطراف نیز می گردد. اصطکاک جدار ریز شمع به دلیل قطر کم این نوع شمع ها مولفه غالب در ظرفیت باربری محوری آن می باشد و به همین دلیل در این پژوهش تمرکز بر رفتار ریزشمع ها در اصطکاک جدار خواهد بود. مقدار اصطکاک جدار در ریزشمع ها به طور عمده متناسب با تغییرات در تنشهای موثر قائم بر آنها می باشد که ناشی از تغییرات حجم خاک در مجاورت ریزشمع ایجاد می شوند. تعیین میزان اصطکاک جدار ریزشمع از تجمیع مقاومت برشی در قطعات مختلف در طول آن انجام می گیرد [۱].

کاربرد ریز شمع ها به دلایلی نظیر صرفه جویی در زمان، کاهش هزینه های اجرایی و عملکرد مناسب در محیط هایی با دسترسی محدود و درعین حال تامین ظرفیت باربری مناسب و کنترل نشست ها به عنوان یک آلترناتیو محسوب میشوند.

به طور کلی از موارد کاربرد ریز شمع میتوان به مواردی همچون بهبود مشخصات مکانیکی خاک از قبیل افزایش تراکم و چسبندگی، کاهش نفوذپذیری، کاهش مدول نشست پذیری و افزایش ظرفیت باربری، پایدارسازی گودها، شیروانیها، شیبها و لغزشها، ترمیم و تقویت فنداسیون های موجود و آسیب دیده یا نشست کرده، کنترل نشست در سازه های اجرا شده بر روی بسترهای سست و یا خاک دستی، مقاوم سازی لرزه ای سازه ها، رفع پتانسیل روانگرایی در خاکهای مستعد روانگرایی، تحمل بارهای Uplift و دینامیکی وارده بر سازه ها اشاره نمود [۲]. با توجه به روند رو به رشد کاربرد ریزشمع ها نیاز به بررسی پارامترهای دخیل در طراحی ریز شمع ها امری ضروری تلقی میگردد.

روش ساخت و اجرای ریز شمع ها متعدد است که از بین آنها میتوان به روشهای مطرح شده در آیین نامه متعلق به اداره فدرال راه های آمریکا (FHWA) اشاره نمود. روابط مورد استفاده در طراحی ریز شمع ها نیز با توجه به اینکه در تعیین برخی پارامترهای آن از تجارب متخصصین اجرایی استفاده شده دارای حاشیه اطمینان بالایی میباشد [۳]. در این پژوهش همراه با استفاده از نتایج تجربیات علمی و عملی بر روی ریز شمع و انجام مطالعات پارامتریک بر روی آن بهینه سازی طراحی ریز شمع با بررسی رفتار اصطکاکی مورد مطالعه قرار می گیرد.

۲- مدلسازی عددی ریز شمع

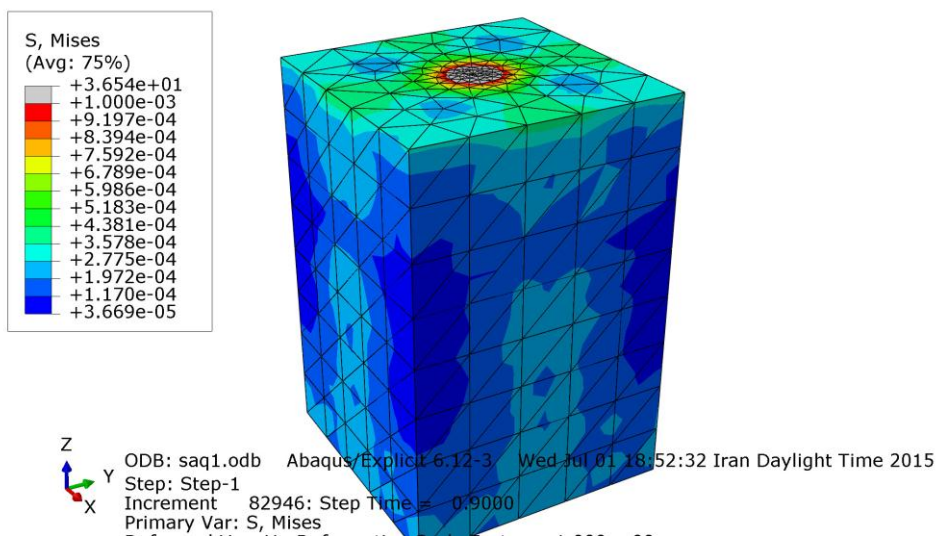
برای مدلسازی عددی از نرم افزار آباکوس (ABAQUS) استفاده شده است. ابعاد محیط خاکی اطراف ریز شمع ۲۰ متر در ۲۰ متر و ارتفاع ۳۰ متر می باشد که درون آن ریز شمعی به قطر ۲۰۰ میلی متر و طول ۱۰ متر همراه با یک جداره فلزی به ضخامت ۰.۸ میلی متر و یک میلگرد به قطر ۳۲ میلی متر مدل سازی شده است. نمونه مفروضه به صورت آنالیز استاتیکی تحلیل شده و مش بندی المان های محیط خاکی و قسمت بتنی ریز شمع به صورت هشت گره ای (شش سطحی)، قسمت کیسینک یا جداره فلزی به صورت صفحه ای و میلگرد به صورت خطی انجام گرفته اند. اندازه مش ها در اطراف ریز شمع کوچک بوده و به تدریج با افزایش فاصله، اندازه مش ها نیز بیشتر میشود که مقدار آن برای محیط خاک ۴۰۰ سانتی متر، قسمت بتنی ریز شمع ۷ سانتی متر، برای جداره فلزی یا کیسینک ۶ سانتی متر و برای میلگرد ۱۰۰ سانتی متر در نظر گرفته شده است.

مدل رفتاری خاک بر پایه موهر - کولمب به صورت الاستو پلاستیک که در برگزیده رفتار غیر خطی خاک و حدود پاسخ های غیر خطی با پذیرش کرنش های پلاستیک میباشد، در نظر گرفته شده است. ریز شمع نیز به صورت المان های سه بعدی الاستیک که دارای چسبندگی و پیوستگی کامل با خاک میباشد مدل گردید. مشخصات خاک و بتن ریز شمع در جدول شماره ۱ ارائه شده است.

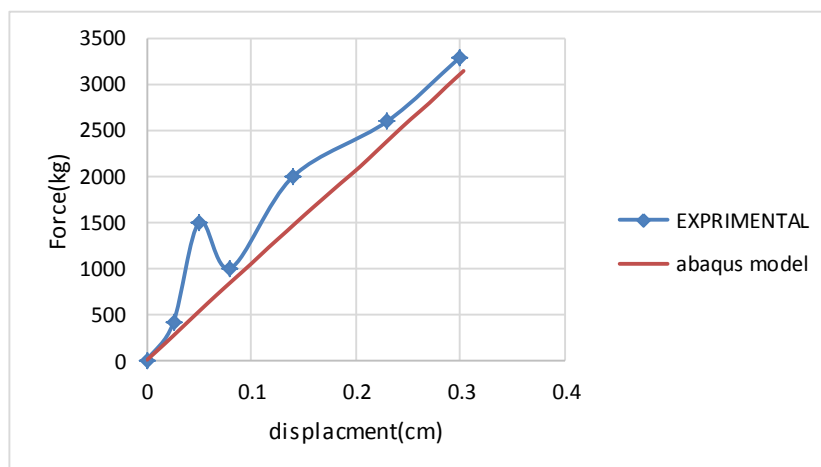
جدول ۱: مشخصات خاک و بتن ریز شمع

المانها	مدول الاستیسیته (kg/cm ²)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (Degree)	ضریب اصطکاک	دانسیته خاک (kg/cm ³)
خاک	۱۳۵	۰.۴	۲۲	۰.۴	۱.۹۰۶ e-۶
بتن ریز شمع	۲۲۰۰۰۰	۰.۳	-	-	۲.۴ e-۶

شکل ۱ توزیع تنش در خاک بستر ریز شمع بر اساس تنش فون میسزس را نشان می دهد و شکل ۲ نتیجه منحنی خیز و نیرو را در دو حالت آزمایشگاهی و مدل سازی شده عددی توسط نرم افزار را نشان می دهد. برای صحت سنجی تحقیق، نتایج حاصل از مدل سازی عددی با نتایج آزمایشگاهی انجام شده توسط شرکت مهندسی مشاور طرح و کنترل گیل مقایسه شده که انطباق خوبی در منحنی نیرو - جابجایی ریز شمع مشاهده می شود [۴ و ۵].



شکل ۱: توزیع تنش در خاک بستر ریز شمع



شکل ۲: مقایسه نمودار خیز ریز شمع مدل سازی شده نسبت به نتایج آزمایشگاهی

۳- تحلیل پارامتریک

با توجه به تاثیر پارامترهای ژئوتکنیکی در طراحی ریز شمع ها و همچنین مقدار مقاومت اسمی خاک-دوغاب (ضریب α) پارامترهای مدول الاستیسیته، ضریب پواسون، زاویه اصطکاک داخلی و ضریب اصطکاک به صورت منفرد و گروهی مطابق جدول شماره ۲ تغییر یافته و نتایج این تغییر بر مقدار نیروی ریز شمع و میزان نشست آن مورد بررسی و تحلیل قرار گرفته، همچنین تمامی نمونه ها نسبت به یک حالت اولیه مقایسه شده و نتایج بصورت نمودار ارائه میشود.

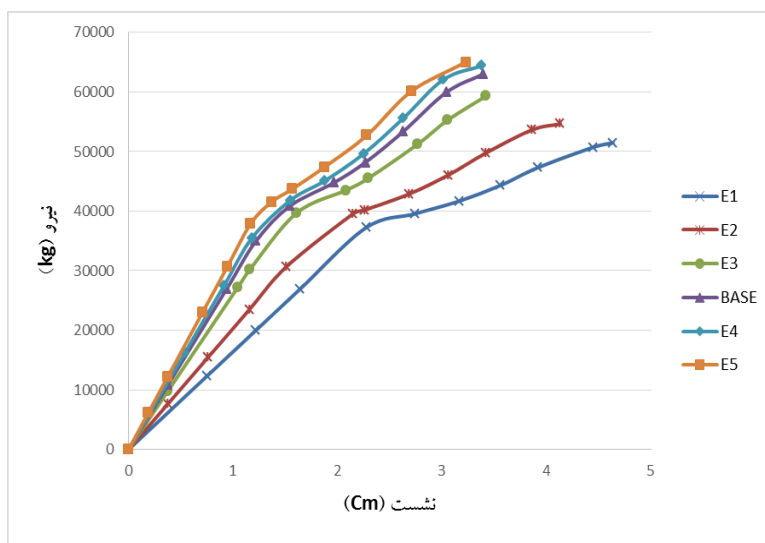
جدول ۲: مشخصات و نامگذاری نمونه ها

دسته بندی	پارامترهای ژئوتکنیکی				
	نام نمونه	مدول الاستیسیته (kg/cm ²)	ضریب پواسون	زاویه اصطکاک داخلی (Degree)	ضریب اصطکاک
	BASE	135	0.4	22	0.4
E مدول الاستیسیته	E1	50	0.4	22	0.4
	E2	70			
	E3	110			
	BASE	135			
	E4	150			
	E5	180			
P ضریب پواسون	P1	135	0.15	22	0.4
	P2		0.2		
	P3		0.25		
	BASE		0.4		
	P4		0.35		
	P5		0.4		
F.a زاویه اصطکاک داخلی	F.a1	135	0.4	15	0.4
	F.a2			17	
	F.a3			20	
	BASE			22	
	F.a4			24	
	F.a5			29	
F.f ضریب اصطکاک	F.f1	135	0.4	22	0.25
	F.f2				0.3
	F.f3				0.35
	BASE				0.4
	F.f4				0.45
	F.f5				0.5
Mixed Models نمونه های ترکیبی	M.X1	50	0.15	15	0.25
	M.X2	70	0.2	17	0.3
	M.X3	110	0.25	20	0.35
	M.X4	135	0.3	22	0.4
	M.X5	150	0.35	24	0.45
	M.X6	180	0.4	29	0.5

۴- بررسی نمونه ها

۴-۱- تاثیر مدول الاستیسیته

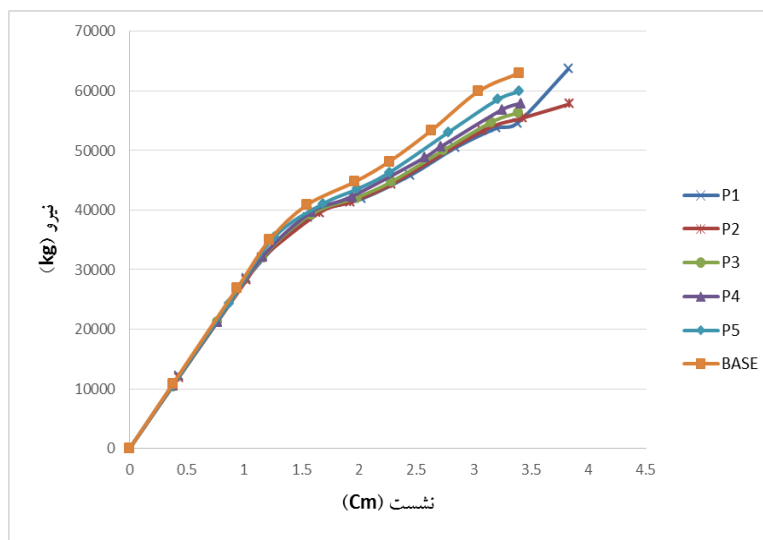
نمودار شماره ۳ تغییرات میزان نیروی ریز شمع و نشست آن را برای خاک ماسه ای نشان می دهد. با افزایش مدول الاستیسیته از مقدار ۵۰ الی ۱۸۰ کیلوگرم بر سانتی متر مربع به علت افزایش صلبیت خاک ، سختی نمونه ها به اندازه افزایش مدول الاستیسیته تغییر کرده و میزان تاثیر خود را بر روی نمونه ها نشان داده است.



شکل ۳: منحنی نیرو - جابجایی نمونه ها با تغییر در مقدار مدول الاستیسیته

۴-۲- تاثیر ضریب پواسون

نمودار شماره ۴ تغییرات میزان نیروی ریز شمع و نشست آن را برای خاک با تغییر ضریب پواسون از مقدار ۰.۱۵ الی ۰.۴ را نشان می دهد. با دقت در نتایج حاصل از تغییر ضریب پواسون، ملاحظه میشود که تاثیر آن بر روی سختی و میزان نشست ریز شمع ناچیز می باشد ولی در مرحله پلاستیک میتواند تا حدودی مقدار مقاومت در ریز شمع و نیروی آن را افزایش دهد.

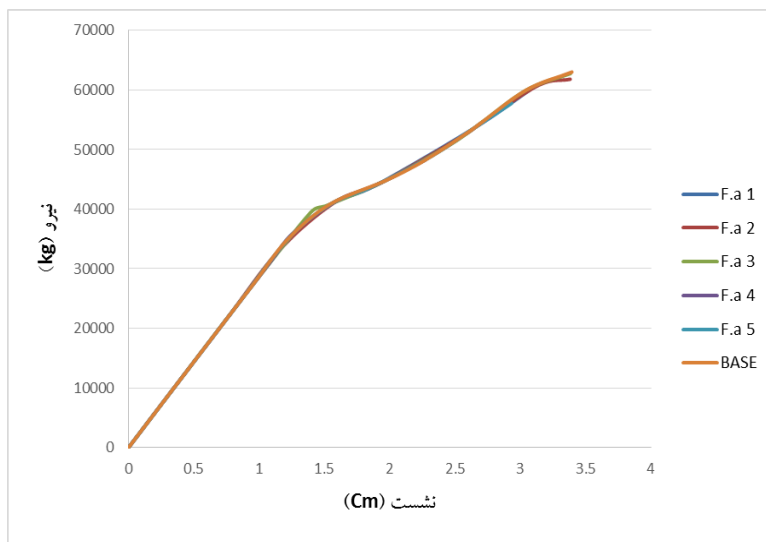


شکل ۴: منحنی نیرو - جابجایی نمونه ها با تغییر در مقدار ضریب پواسون

۴-۳- تاثیر زاویه اصطکاک داخلی

نمودار شماره ۵ تغییرات میزان نیروی ریز شمع و نشست آن را برای خاک ماسه ای نشان می دهد. مشاهده میشود که تغییر زاویه اصطکاک داخلی از مقدار ۱۵ الی ۲۹ درجه برای نمونه های مفروض تا مقدار مقدار ۲۲ درجه با افزایش ناچیز نیروی ریز شمع همراه است که با ادامه روند افزایش مقدار این پارامتر به بیش از ۲۲ درجه، در نمونه های مورد مطالعه کاهش مقدار

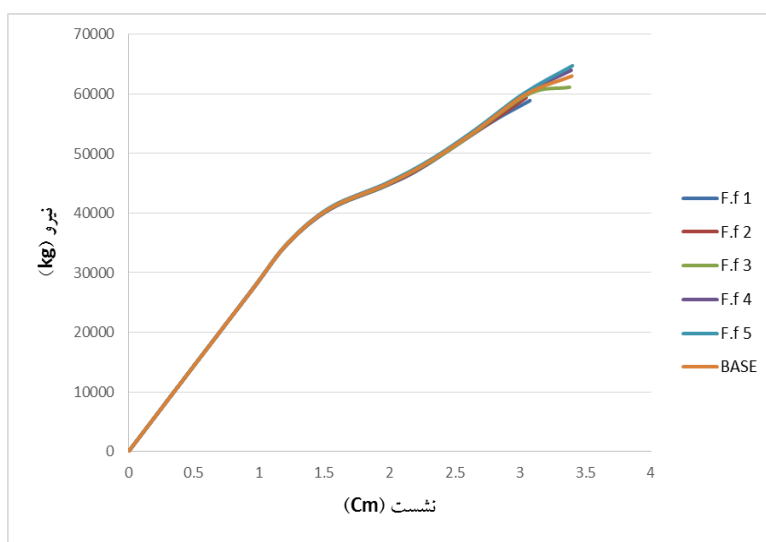
نیروی ریز شمع مشاهده گردید. همچنین با دقت در میزان نشست ریز شمع در نمونه های این گروه تقریباً با مقدار میانگین ۱.۹۲ سانتی متر تغییرات نشست تا زاویه اصطکاک ۲۲ درجه، با افزایش نیروی ریز شمع، مقدار نشست نیز افزایش میابد.



شکل ۵: منحنی نیرو - جابجایی نمونه ها با تغییر در مقدار زاویه اصطکاک داخلی

۴-۴- تاثیر ضریب اصطکاک

مطابق نمودار شماره ۶ با افزایش مقدار ضریب اصطکاک از مقدار ۰.۲۵ تا ۰.۵ ملاحظه میشود که نیروی ریز شمع بصورت تدریجی افزایش پیدا می کند. این پارامتر که به نوع و جنس خاک (زبری)، شکستگی مصالح و درصد نفوذ بتن حاصل از تزریق در اجرای میکروپایل بستگی دارد و میتوان افزایش فشار حاصل از تزریق را نیز در این پارامتر اعمال کرد، بدین معنی که با افزایش فشار تزریق، ضریب اصطکاک مابین خاک و ریز شمع افزایش یافته و با کاهش این ضریب، کاهش می یابد [۶].



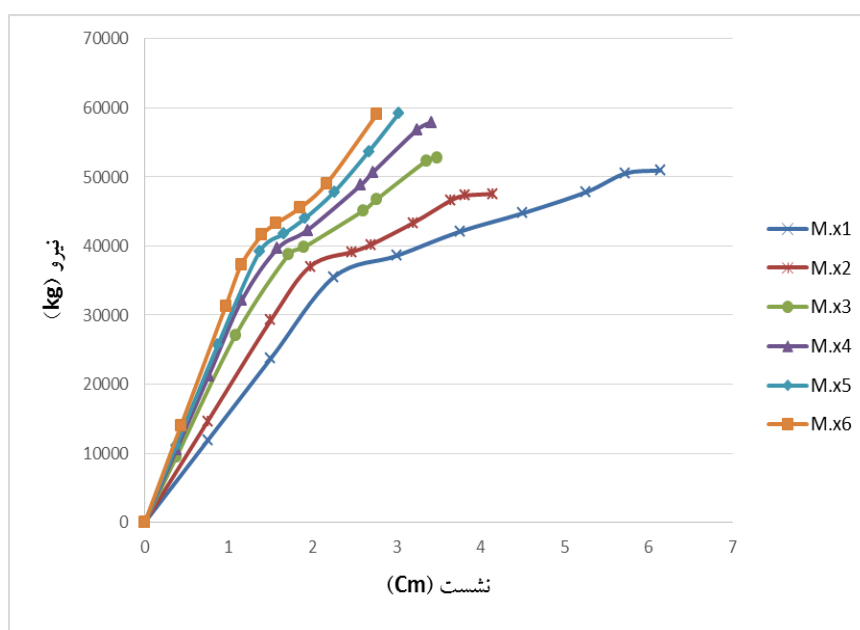
شکل ۶: منحنی نیرو - جابجایی نمونه ها با تغییر در مقدار ضریب اصطکاک

توجه به این نکته لازم است که با افزایش ضریب اصطکاک به بیش از مقدار ۰.۴۵ در نمونه های مورد بررسی تاثیر چندانی بر روی رفتار ریز شمع مشاهده نمی شود.

۴-۵- تاثیر تغییر ترکیبی پارامترها

با مطالعه و بررسی نمونه های قبلی و نتایج حاصل شده میتوان مشاهده کرد که افزایش پارامترهای ژئوتکنیکی به صورت منفرد باعث تغییر برخی از ویژگی های خاک، همچون افزایش سختی ، کاهش نشست و افزایش نیروی ریز شمع شده اند ولی بررسی نوع خاک در رفتار متقابل با ریز شمع بایستی به صورت جامع و بر روی تمامی پارامترهای خاک مورد بررسی واقع شود، بدین معنی که با افزایش هر پارامتر دیگر موارد وابسته به آن نیز تغییر یافته و مطالعه و بررسی خاک با اعمال تغییرات تجمیعی بر روی پارامترهای ژئوتکنیکی صورت گیرد تا نتایج حاصل صحت و دقت بیشتری داشته باشند.

بنابر این در بررسی نمونه های گروه ترکیبی با اعمال شرایط فوق مدلسازی و آنالیز صورت گرفته و نتایج بدست آمده مطابق نمودار شماره ۷ بیانگر این است که افزایش برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی به بیش از یک مقدار مشخص تاثیر چندانی بر روی ظرفیت باربری یا نشست ریز شمع ندارند.



شکل ۷: منحنی نیرو - جابجایی نمونه ها با تغییر ترکیبی پارامترهای ژئوتکنیکی

۵- بهینه سازی ضریب α

با توجه به تمرکز مطالعه این پژوهش بر روی تاثیر پارامترهای ژئوتکنیکی در طراحی ریز شمع و ارتباط آنها با مقاومت اسمی مجموعه خاک - دوغاب (ضریب α)، نتایج حاصل از بررسی نمونه ها و استخراج مقدار نیروی ریز شمع و میزان نشست آن، مطابق با تغییرات اعمال شده بر روی پارامترهای خاک در هر نمونه، به محاسبه مقدار ضریب α پرداخته و نتایج را جهت بهینه سازی این ضریب با مقادیر ارائه شده در جدول شماره ۳ مقایسه می کنیم.

جدول ۳: α_{bond} مقاومت اسمی مجموعه خاک - دوغاب برای طراحی ریز شمع (FHWA) [۳].

تشریح خاک / سنگ	دامنه تغییرات مقاومت اسمی پیوند دوغاب به زمین			
	نوع A	نوع B	نوع C	نوع D
سیلت و رس (نرم، پلاستیسیته متوسط)	۳۵-۷۰	۳۵-۹۵	۵۰-۱۲۰	۵۰-۱۴۵
سیلت و رس (سخت، متراکم تا خیلی متراکم)	۵۰-۱۲۰	۷۰-۱۹۰	۹۵-۱۹۰	۹۵-۱۹۰
ماسه (نرم، تراکم کم تا متوسط)	۷۰-۱۴۵	۷۰-۱۹۰	۹۵-۱۹۰	۹۵-۲۴۰
ماسه (تراکم زیاد)	۹۵-۲۱۵	۱۲۰-۳۶۰	۱۴۵-۳۶۰	۱۴۵-۳۸۵
شن (متوسط-بسیار متراکم)	۹۵-۲۶۵	۱۲۰-۳۶۰	۱۴۵-۳۶۰	۱۴۵-۳۸۵
مصالح یخچالی (متوسط-بسیار متراکم-سیمانته شده)	۹۵-۱۹۰	۹۵-۳۱۰	۱۲۰-۳۱۰	۱۲۰-۳۳۵
شیل‌های نرم (تازه-هوازدهگی کم یا بدون هوازدهگی)	۲۰۵-۵۵۰	-	-	-
شیل‌های سخت (تازه-هوازدهگی کم یا بدون هوازدهگی)	۵۱۵-۱۳۸۰	-	-	-
سنگ آهک (تازه-باترکهای متوسط-هوازدهگی کم یا بدون هوازدهگی)	۱۰۳۵-۲۰۷۰	-	-	-
ماسه سنگ (تازه-باترکهای متوسط-هوازدهگی کم یا بدون هوازدهگی)	۵۲۰-۱۷۲۵	-	-	-
گرانیت و بازالت (تازه-باترکهای متوسط-هوازدهگی کم یا بدون هوازدهگی)	۱۳۸۰-۴۲۰۰	-	-	-

در طراحی ژئوتکنیکی ریزشمع ها، برای تعیین مقاومت اسمی مجموعه خاک - دوغاب (α ضریب) مطابق رابطه زیر و جدول شماره ۳ که توسط آیین نامه FHWA ارائه شده استفاده می شود [۳].

$$F_{G-allowble} = \frac{\alpha_{bond} * \pi * D_b * bondlength}{F.S.} \quad (1)$$

در این رابطه $bondlength$ طول ریز شمع، D_b قطر معادل ریز شمع، α_{bond} مقاومت اسمی مجموعه خاک - دوغاب و $F.S.$ ضریب اطمینان می باشد که برابر ۲.۵ در نظر گرفته می شود.

در جدول شماره ۴ برای نمونه های مورد نظر پس از استخراج مقدار نیروی ریز شمع و نشست آن با تغییر پارامتر های ژئوتکنیکی و نتایج حاصل از تحلیل نمونه ها در این مرحله مقدار مقاومت اسمی مجموعه خاک - دوغاب (α ضریب) مطابق رابطه (۱) ارائه شده توسط آیین نامه FHWA در طراحی ژئوتکنیکی ریز شمع ها استخراج شده است، که در ادامه جهت بررسی و ارزیابی نتایج حاصل شده برای مقدار ضریب α و تاثیر پذیری آن نسبت به پارامتر های ژئوتکنیکی متغییر مفروض در این پژوهش، در هر گروه مقدار حداقل و حداکثر حاصل شده برای ضریب α برداشت شده است، تا با بررسی میزان تغییرات این ضریب و گستردگی بازه حاصل شده، در نهایت به انتخاب بهترین و کاربردی ترین مقدار برای این ضریب اقدام شود.

جدول ۴: مقاومت اسمی مجموعه خاک - دوغاب، نیرو و نشست محاسبه شده برای نمونه های مورد مطالعه

گروه بندی پارامترهای ژئوتکنیکی	نام نمونه ها	نشست ریز شمع Cm	نیروی ریز شمع kg	ضریب α	حداقل و حداکثر α	بازه تغییرات α
E مدول الاستیسیته	E1	2.74	39568.60	157.44	حداقل	31.24
	E2	2.26	40195.80	159.93		
	E3	2.08	43521.20	173.17	157.44	
	BASE	1.96	44769.80	178.13	حداکثر	
	E4	1.88	45080.80	179.37		
	E5	1.57	47420.60	188.68	188.68	
P ضریب پواسون	P1	2.02	41906.20	166.74	حداقل	8.69
	P2	1.92	41366.50	164.59		
	P3	1.98	42131.50	167.64	164.59	
	p4	1.94	42305.90	168.33	حداکثر	
	p5	1.92	43549.90	173.28		
	BASE	1.96	44769.80	178.13	173.28	
F.a زاویه اصطکاک داخلی	F.A1	1.90	44055.40	175.29	حداقل	3.35
	F.A2	1.94	44468.60	176.93		
	F.A3	1.96	44690.60	177.82	174.78	
	BASE	1.96	44769.80	178.13	حداکثر	
	F.A4	1.93	44459.80	176.90		
	F.A5	1.88	43928.20	174.78	178.13	
F.f ضریب اصطکاک	F.F1	1.96	44532.90	177.19	حداقل	1.57
	F.F2	1.96	44611.60	177.50		
	F.F3	1.96	44690.60	177.82	177.19	
	BASE	1.96	44769.80	178.13	حداکثر	
	F.F4	1.96	44908.80	178.69		
	F.F5	1.96	44928.20	178.76	178.76	
Mixed Models نمونه های ترکیبی	MX1	2.25	35503.10	141.26	حداقل	30.85
	MX2	1.97	37057.10	147.45		
	MX3	1.71	38729.50	154.10	141.26	
	MX4	1.58	39636.00	157.71	حداکثر	
	MX5	1.65	41757.00	166.15		
	MX6	1.56	43256.50	172.11	172.11	

۶- نتیجه گیری

با توجه به نتایج مطالعات انجام شده ملاحظه میگردد که برخی از پارامترهای ژئوتکنیکی تاثیر قابل توجهی در مقدار نیروی ریز شمع و نشست آن داشته و همچنین در انتخاب مقدار ضریب α موثر میباشند که مهمترین آنها به شرح زیر خواهد بود:

- ✓ مهمترین پارامتر تاثیر گذار در انتخاب ضریب α با توجه به مقدار نیروی ریز شمع و نشست ایجاد شده در اثر تغییر این پارامتر به ترتیب مدول الاستیسیته با ۳۱ واحد ، ضریب پواسون با ۸ واحد ، زاویه اصطکاک داخلی با ۳ واحد و ضریب اصطکاک با ۱.۵ واحد جابجایی در مقدار ضریب α اهمیت خود را نشان می دهند.
- ✓ مطابق جدول شماره ۳ مقادیر پیشنهادی آیین نامه FHWA برای ریز شمع از نوع D در حدود ۹۵ تا ۲۴۰ کیلو پاسکال ارائه شده است که با توجه به مطالعات انجام شده برای خاک ماسه ای و نتایج بدست آمده برای ضریب α این بازه را میتوان به مقدار ۱۸۰-۱۴۰ کیلو پاسکال بهینه سازی کرده و تقلیل داد.
- ✓ با دقت در مقادیر حاصل شده برای نمونه های گروه زاویه اصطکاک داخلی F.a مشاهده می شود که افزایش این پارامتر به بیش از ۲۲ درجه در خاک ماسه ای باعث کاهش نیروی ریز شمع و نشست آن می شود.
- ✓ مطابق نتایج به دست آمده از تغییر پارامتر ضریب اصطکاک در نمونه های گروه ضریب اصطکاک F.f ملاحظه میشود که مقدار این پارامتر تاثیری بر نشست ریز شمع نداشته و مقدار آن با میزان ۱.۹۶ سانتی متر ثابت است همچنین در حالتی که میزان ضریب اصطکاک به بیش از ۰.۴۵ تغییر میکند تاثیر چندانی در مقدار نیروی ریز شمع مشاهده نمی شود.
- ✓ با تغییر پارامترهای ژئوتکنیکی به صورت ترکیبی و با در نظر گرفتن سیر صعودی در آنها، حداقل مقدار به دست آمده برای ضریب α ۱۴۱ و حداکثر ۱۷۲ کیلو پاسکال میباشد که نشان می دهند افزایش برخی از پارامترها پس از یک مقدار مشخص تاثیر چندانی در مقدار ضریب α ندارند.

مراجع

[1] Shu Sh. Sand state and performance analysis of micropiles: A thesis Submitted in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree of Doctor of Philosophy in Civil Engineerin, 2005.

[2] Bruce D.A., Juran I. Drilled and Grouted Micropiles, State of Practice Review, FHWA-RD-96-017 .FHWA: U.S .Department of Transportation;1997.

[3] FHWA 2000. Micropile design and construction guidelines. US Department of Transportation, Federal Highway Administration, Priority Technologies Program, Implementational, manual, Publication No. FHWA - SA-97-070, June 2000.

[۴] شرکت مهندسی مشاور طرح و کنترل گیل، آزمایش مقیاس واقعی تک ریز شمع تحت بار استاتیکی جانبی، رشت، ۱۳۸۶.

[۵] الیاس قمری، علی قربانی. آزمایش مقیاس واقعی و مدلسازی عددی ریز شمع ها در خاک ماسه ای، چهارمین همایش بین المللی مهندسی ژئوتکنیک و مکانیک خاک ایران، تهران ۱۱ تا ۱۲ آبان ۱۳۸۹.

[6] Oden J.T. and Martins J.A.C. Models and computational methods for dynamic friction phenomena, Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, 52, 527-634, 1985.