

بررسی نظری و عددی اضافه تنش افقی ناشی از سربار بر روی دیوار حائل

محمود قضاوی^۱، جواد نظری افشار^{۲*} و فرزین کلانتری^۳

^۱دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

^۲آهیات علمی گروه مهندسی عمران - دانشگاه آزاد اسلامی - واحد شهرقدس

^۳استادیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(تاریخ دریافت ۱۳۸۸/۱۰/۲۸، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده ۱۳۸۹/۱۱/۲۰، تاریخ تصویب ۱۳۹۰/۰۲/۱۸)

چکیده

استفاده از نظریه الاستیسیته یا روش‌های عددی برای محاسبه تنش افقی افزوده ناشی از سربار از ابزارهای سودمندی می‌باشند که امروزه از آنها استفاده می‌شود. با توجه به اینکه در عمل مقدار تنش‌های افقی افزوده ناشی از سربار اندازه گیری شده دو برابر تنش‌های افقی محاسبه شده با رابطه بوسینسک (مبتنی بر نظریه الاستیسیته) نتیجه شده است. لذا در این تحقیق با استفاده از نرم افزار عددی مبتنی بر روش عددی المان محدود به بررسی و مقایسه نتایج تنش‌های افقی ناشی از سربار خطی و نواری در خاک محاسبه شده با استفاده از رابطه بوسینسک و روش عددی المان محدود پرداخته شده است. نتایج حاصل از تحلیل‌های انجام شده با روش المان محدود نشان دهنده آن است که مقدار متوسط تنش‌های افقی افزوده ناشی از سربار محاسبه شده توسط روش المان محدود ۱/۵ برابر تنش‌های افقی محاسبه شده با رابطه بوسینسک می‌باشد.

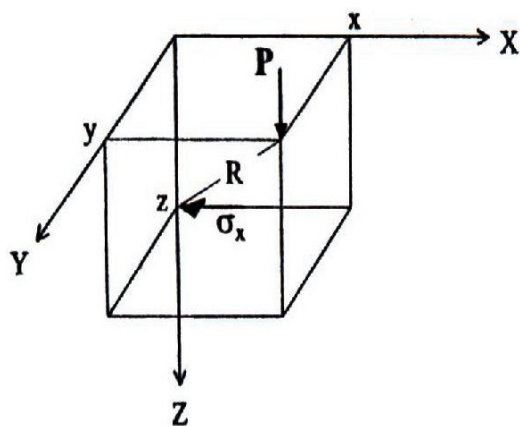
واژه‌های کلیدی: تئوری الاستیسیته - رابطه بوسینسک - نیروی جانبی خاک - سربار خطی - سربار نواری

فشار جانبی ناشی از سربار خطی و نواری با استفاده از رابطه بوسینسک

رابطه ارائه شده توسط بوسینسک (۱۸۸۵) برای محاسبه فشار جانبی افزوده ناشی از سربار نقطه‌ای در نقطه مورد نظر در داخل توده خاک (شکل ۱) به صورت زیر می‌باشد [۱، ۲]:

$$\sigma_x = \frac{P}{2\pi} \left[\frac{3ZX^2}{R^3} - (1-2\nu) \left(\frac{Z}{R^3} - \frac{1}{R(R+Z)} + \frac{(2R+Z)X^2}{R^3(R+Z)^2} \right) \right] \quad (1)$$

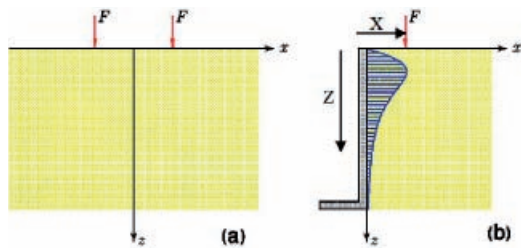
که در آن P سربار نقطه‌ای اعمالی بر سطح خاک و U نسبت پواسون خاک و $R^2 = X^2 + Y^2 + Z^2$ است که X و Y فاصله افقی و Z عمق نقطه مورد نظر نسبت به محل



شکل ۱- سربار نقطه‌ای اعمالی در سطح زمین

مقدمه

تعیین مقدار دقیق فشار جانبی ناشی از وزن خاک و سربار یکی از مسائل مهم مهندسی ژئوتکنیک می‌باشد. طراحی دیوارهای حائل و سپر کوبی، تحلیل پایداری گودهای مهاربندی شده و نشده، مستلزم تخمین کمی فشار جانبی بر روی عضو سازهمورد نظر می‌باشد. اگر سرباری بصورت غیریکنواخت و یا در سطح محدودی اعمال شود در اینصورت مقدار تنش قائم و افقی افزوده ناشی از سربار با عمق تغییر می‌کند و لازم است که در اعماق مختلف مقدار تنش افزوده ناشی از سربار محاسبه شود. بوسینسک (۱۸۸۵) با در نظر گرفتن اینکه خاک بدون وزن و همگن و الاستیک و نیمه بینهایت باشد رابطه‌ای برای محاسبه تنش افقی افزوده ناشی از سربار نقطه‌ای در خاک ارائه کرد [۱]. برای محاسبه تنش افقی افزوده ناشی از سربارهای بار خطی یا بار نواری یا بار در سطح محدود میتوان انواع بارگذاری‌ها را به مجموعه‌ای از بارهای متمرکز تبدیل نموده با استفاده از انتگرال گیری، محاسبات را در حالت‌های مختلف بارگذاری انجام داد. با توجه به اینکه در برخی از تحقیقات صورت گرفته اختلاف‌هایی میان مقدار تنش افقی افزوده اندازه گیری شده ناشی از سربار و مقدار محاسبه شده با روش بوسینسک مشاهده شده است لذا در این تحقیق به بررسی و مقایسه مقدار فشار جانبی ناشی از سربار خطی و نواری با استفاده از روش بوسینسک و روش عددی اجزای محدود پرداخته شده است.

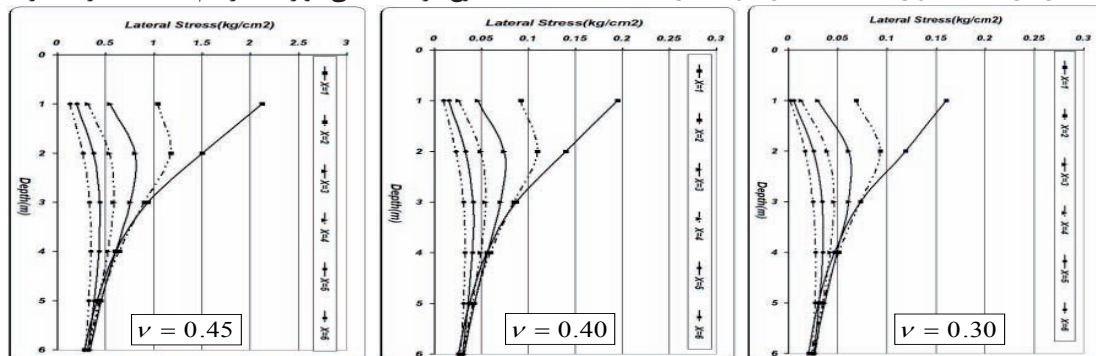


شکل ۲- اثر بار آینه ای

نمی‌دانند [۹]. برای درک اثر بار آینه‌ای مطابق شکل ۲-الف دو بار خطی (F) که بطور متقارن نسبت به محور Z قرار دارند در نظر گرفته می‌شود. برای نقطه‌ای در امتداد محور Z به علت تقارن نسبت به محور و مقدار یکسان بارهای خطی در نقطه مورد نظر جابه جایی افقی ($U_x = 0$) و مجموع تنش برشی ($\sigma_{zx} = 0$) اعمالی برابر با صفر ولی مقدار تنش افقی برابر با جمع تنش افقی ناشی از سربارهای خطی می‌باشد. حال اگر فرض شود در امتداد محور Z دیوار حائل صلبی (شکل ۲-ب) قرار داشته باشد در اثر اعمال سربار خطی در امتداد محور Z ذرات خاک کنار دیوار حائل جابه جایی افقی نخواهند داشت. لذا اثر دیوار حائل صلب به مانند سربار قرینه خطی می‌باشد که قبلاً توضیح داده شد [۱۰]. به این دلیل میندلین اظهار داشته است که به علت اثر پدیده بار آینه‌ای مقدار تنش افقی محاسبه شده با رابطه بوسینسک ۵۰ درصد مقدار اندازه گیری شده است. برای محاسبه تنش افقی ناشی از سربار خطی با کمک تئوری الاستیسیته (رابطه بوسینسک)، بار خطی (۱۰ نیوتن بر متر) را مانند یک مجموعه بارهای متمرکز نزدیک بهم در طول خطی مستقیم و بار نواری به عرض واحد (۱۰ نیوتن بر متر مربع) را مانند بارهای خطی معادل کنار هم در نظر گرفته شد و با استفاده از رابطه بوسینسک و کمک یک برنامه صفحه گستر مانند Excel تنش افقی ناشی از سربار خطی (مجموع بارهای متمرکز) و سربار نواری (مجموع بارهای خطی موازی کنار هم) محاسبه گردید. برای

اعمال بار نقطه ای (مطابق شکل ۱) می‌باشد. محققانی چون هول (Holl) [۳] و پولوس و دیویس (Poulos & Davis) [۴] روابطی برای محاسبه تنش افزوده ناشی از سربارهای نواری (بار نواری موازی و عمود بر دیوار حائل) و بار اعمالی بر مساحت محدود ارائه نمودند. نکته حائز اهمیت این است که کار محققان مذکور بر اساس اصول بکار گرفته شده توسط بوسینسک می‌باشد.

محققانی چون گبر (Geber) [۵] و اسپنگلر (Spangler) [۶] و ترزاقی (Terzaghi) [۷] برای مقایسه مقدار تنش افزوده افقی ناشی از سربار اندازه گیری شده و محاسبه شده توسط رابطه بوسینسک آزمایش‌هایی برای سربارهای نقطه‌ای و خطی و بارگذاری در مساحت محدود انجام دادند. نتایج حاکی از آن بود که تنشهای اندازه گیری شده در عمل در حدود ۲ برابر مقدار محاسبه شده می‌باشد. ولی سوال مطرح آن است که آزمایشهای انجام شده با چه دقتی انجام شده و نتایج تجربی چقدر به واقعیت نزدیک بوده است. برای مثال در کار اسپنگلر [۶] سعی شده بود که فشار جانبی روی دیوار حائلی به ارتفاع ۱/۸۳ متر و عرض ۴/۵۷ متر با ضخامت ثابت بدنه ۰/۱۵ متر که خاک دانه‌بدر پشت آن بدون هیچگونه تراکمی ریخته شده بود اندازه گیری شود. اسپنگلر برای شبیه سازی بار خطی، یک تراورس را موازی با دیوار قرار داده و چرخ‌های پشتی کامیونی را بر روی آن قرار داد. چون دیوار تنها ۴،۵۷ متر طول و تراورس در حدود ۳ متر بود به احتمال زیاد مدل بار نواری ایجاد نشده بود. بر اساس نتایج بدست آمده توسط اسپنگلر مشخص شد که فشار جانبی اندازه گیری شده در حدود ۲ برابر مقدار پیش بینی شده توسط رابطه (۱) با نسبت پواسون ۰/۵ می‌باشد میندلین (Mindlin) [۸] پیشنهاد کرد که ضریب ۲ را می‌توان با پدیده بار آینه‌ی ناشی از دیوار صلب که به صورت متقارن در مقابل دیوار قرار می‌گیرد توجیه نمود (شکل ۲). اما برخی از محققان از جمله بولز (Bowls) این توجیه را مناسب

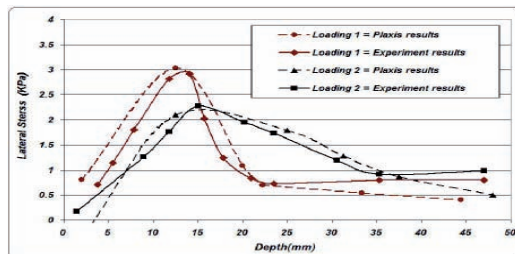


شکل ۳- نیمرخ تنش افقی ناشی از سربار نواری برای فواصل مختلف بار و اعماق مختلف با استفاده از نظریه الاستیسیته (رابطه بوسینسک) برای نسبت پواسون ۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۴۵

فاصله ۹ سانتیمتری (حالت ۱) و ۱۵ سانتیمتری (حالت ۲) از دیوار ارائه شده است. با توجه به نتایج شکل ۴ مشاهده می‌شود که مدل عددی ساخته شده به خوبی قادر به پیش بینی تنش‌های افقی وارده آزمایشگاهی مورد نظر می‌باشد. در تحلیل‌های اصلی در برنامه Plaxis بار خطی عمود بر سطح خاک در فواصل معین ۱، ۲، ۳، ۴، ۵، ۶ متر از لبه مدل اعمال گردید و نحوه تغییرات تنش جانبی ناشی از سربار با افزایش عمق خاک در نمودارهایی رسم گردید. مدل رفتاری مورد استفاده در برنامه مدل موهر کولمب می‌باشد که با توجه به بررسی‌های بعمل آمده بجز تغییر مقدار نسبت پواسون، پارامترهایی مانند مدول الاستیسیته خاک (E) ضریب زاویه اصطکاک داخلی خاک (ϕ) و چسبندگی (c) در نتیجه محاسبات بدون تاثیر بودند. لذا تمامی محاسبات برای خاکهایی با نسبت پواسون‌های (0.3، 0.4، 0.45) انجام شد که برای نمونه نتایج حاصل برای بار نواری در شکل ۵ ارائه شده است.

ترکیب نتایج تحلیل‌ها

پس از محاسبه تنش افقی ناشی از سربار خطی و نواری در خاک برای نسبت‌های پواسون 0.3، 0.4، 0.5 توسط رابطه بوسینسک و برنامه Plaxis؛ نسبت تنش محاسبه شده توسط برنامه Plaxis به رابطه بوسینسک رسم شد که در شکل ۶ و ۷ ارائه شده است. با توجه به این نمودارهای ارائه شده در شکل ۶ و ۷ مشاهده می‌شود که نسبت تنش محاسبه شده توسط برنامه Plaxis به رابطه بوسینسک برای فواصل مختلف بار در اعماق مختلف یک روند تقریباً متحد الشکلی داشته و نمودارها در یک بازه یکنواختی قرار می‌گیرند. به عبارتی اثر فاصله بار تقریباً تاثیر خاصی بر نسبت تنش محاسبه شده توسط برنامه Plaxis به رابطه بوسینسک ندارد. با میانگین گیری از هر بازه و حذف اثر فاصله بار از دیوار حائل و تنها با در نظر گرفتن عمق خاک برای هر نسبت پواسون خاک یک نمودار که نشان دهنده متوسط نسبت تنش محاسبه شده توسط برنامه Plaxis به رابطه بوسینسک باشد برای بار خطی و بار

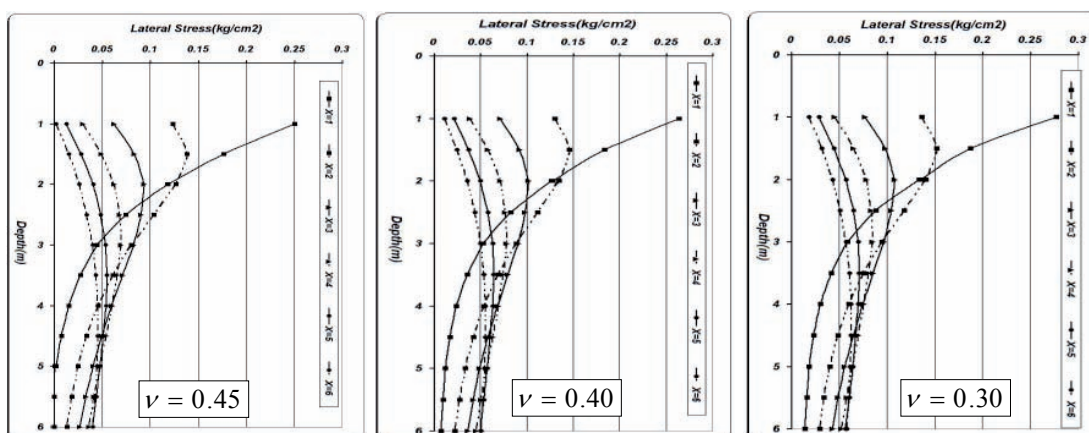


شکل ۴- کالیبراسیون مدل برنامه Plaxis برای بارگذاری خطی حالت ۱ و ۲

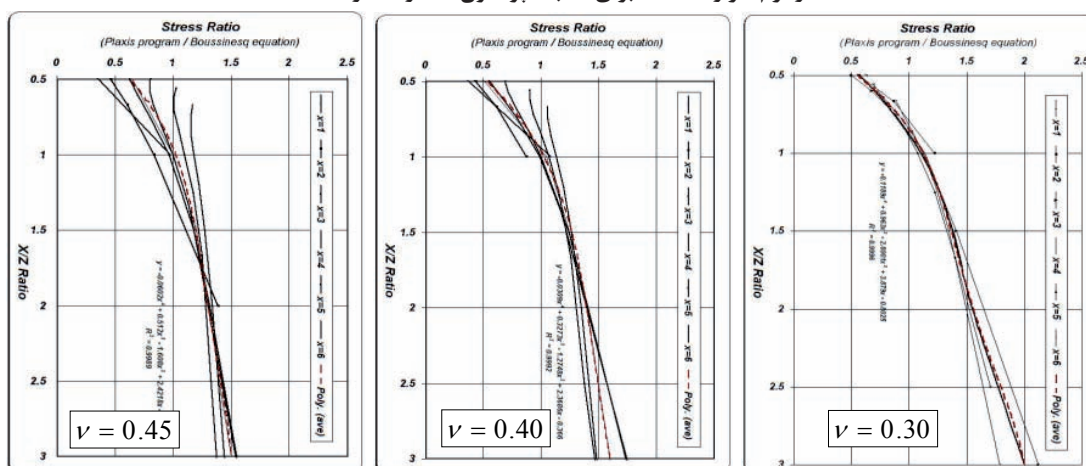
محاسبه تنش افزوده افقی ناشی از سربار خطی، فواصل بار از دیوار (X) مطابق شکل ۲ با گامهای افزایشی ۱ متر از ۱ تا ۶ متر و در عمق‌های خاک مختلف با گامهای افزایشی ۱ متر از ۱ الی ۶ متر متغیر در نظر گرفته شد. تمامی محاسبات برای خاکهایی با نسبت‌های پواسون 0.3، 0.4، 0.45 انجام شد که برای نمونه نتایج حاصل برای بار نواری در شکل ۳ ارائه شده است.

فشار جانبی ناشی از سربار خطی و نواری با استفاده از روش عددی المان محدود

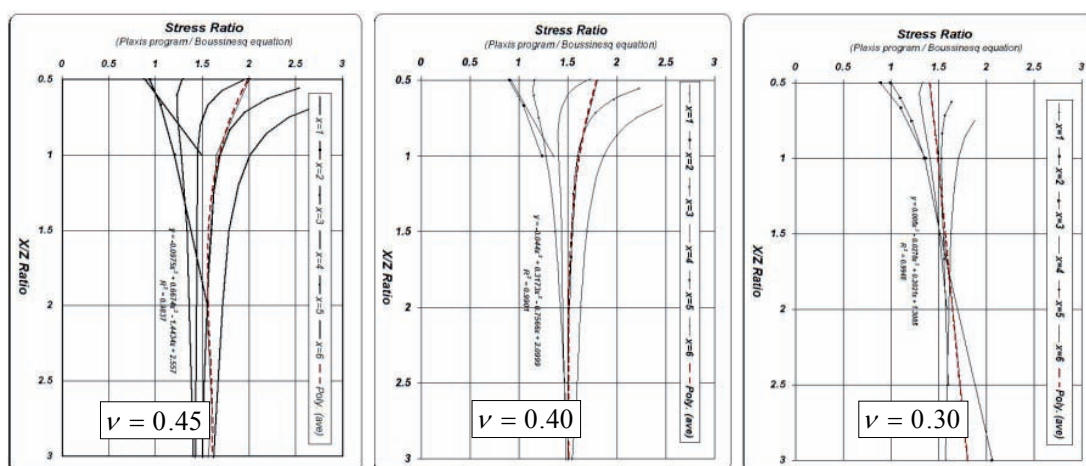
برای محاسبه نیروی جانبی ناشی از سربار خطی و نواری اعمالی از نرم افزار عددی اجزای محدود Plaxis استفاده شد. نرم افزار Plaxis قابلیت مدلسازی هندسه مورد نظر را بصورت دو بعدی و انجام تحلیل در حالت کرنش مسطح و تقارن محوری را دارد. با توجه فرض طولی بودن دیوار حائل و سربار خطی از حالت کرنش مسطح استفاده شد. در مدل عددی از المان‌های مثلثی ایزوپارامتریک ۶ گرهباستفاده شده است [۱۱]. ابعاد مدل عددی با انجام تحلیل‌های حساسیت سنجی طوری در نظر گرفته شد که اثر شرایط مرزی در نتیجه محاسبات تاثیری نداشته باشد. مرزهای لایه خاک در راستای قائم دارای حرکت بوده ولی در راستای افق مقید شده اند تا رفتار صفحه صلب در مرزها بوجود آید اما برای مرز انتهای لایه خاک، توسط قید در جهت افق قائم از حرکت آنها جلوگیری شد. با توجه به اینکه در این پژوهش تنها نیروی جانبی ناشی از سربار مورد نظر می‌باشند برای اجتناب از نیروی جانبی ناشی از وزن خاک هنگام تحلیل یکمک قابلیت برنامه، وزن خاک در محاسبات حذف گردید. برای کالیبره نمودن و کنترل صحت مدل ساخته شده در نرم افزار Plaxis، از نتایج آزمایش شریف (Sherif) [۱۲] که شباهت زیادی به نحوه مدل سازی داشت استفاده شد. این آزمایش شامل یک جعبه فلزی به ابعاد ۴۷۰ * ۱۲۰۰ * ۱۲۰۰ میلی‌متر بود که یک طرف از جعبه به عنوان دیوار حائل در نظر گرفته شده بود. ضخامت و ابعاد جداره فلزی مورد استفاده به عنوان دیوار حائل مطابق محاسبات به اندازه‌ای کافی بود که صلب به حساب آید. در این آزمایش برای مدل سازی بار خطی برابر با ۱/۳۷ کیلونیوتن بر متر در دو حالت فاصله ۹ سانتیمتری (حالت ۱) و ۱۵ سانتیمتری (حالت ۲) صفحه فلزی مورد استفاده بعنوان دیوار حائل از یک میله فلزی با مقطع مربع (۲۵ در ۲۵ میلی‌متر) بطول ۵۵۰ میلی‌متر استفاده شد. خاک داخل جعبه دارای چگالی ۲/۶۵ و جرم مخصوص ۱۷۱۵ کیلوگرم در متر مکعب و تراکم نسبی ۹۰ درصد داشت. در شکل ۴ نتیجه کالیبراسیون برنامه Plaxis با نتیجه آزمایش در دو حالت اعمال بار خطی در



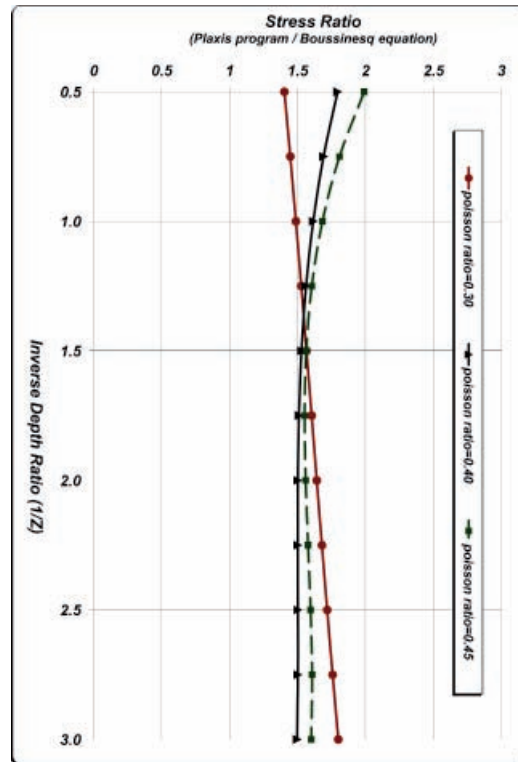
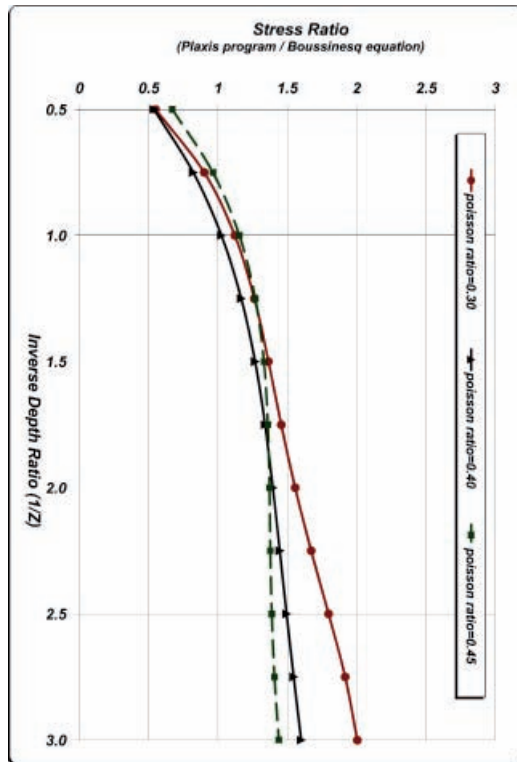
شکل ۵- نیمرخ تنش افقی ناشی از سربار نواری برای فواصل مختلف بار و اعماق مختلف با استفاده از نرم افزار Plaxis برای نسبت پواسون ۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۴۵



شکل ۶- نیمرخ تنش افقی ناشی از سربار خطی برای فواصل مختلف بار و اعماق مختلف با استفاده از نرم افزار Plaxis برای نسبت پواسون ۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۴۵



شکل ۷- نیمرخ تنش افقی ناشی از سربار نواری برای فواصل مختلف بار و اعماق مختلف با استفاده از نرم افزار Plaxis برای نسبت پواسون ۰/۳ و ۰/۴ و ۰/۴۵



شکل ۸- متوسط نسبت تنش محاسبه شده توسط برنامه Plaxis به تنش محاسبه شده از رابطه بوسینسک برای (الف) سربار خطی (ب) سربار نواری

عددی المان محدود Plaxis مورد تصدیق قرار گرفت.

نواری بدست می‌آید، که نتایج حاصله در شکل ۸ برای بار خطی و نواری ارائه شده است.

خلاصه و نتیجه گیری

با توجه به تحلیل‌های صورت گرفته در این پژوهش برای دو نوع سربار خطی و نواری مقدار تنش افقی افزوده ناشی از سربار محاسبه شده توسط برنامه المان محدود Plaxis نسبت به رابطه مبتنی بر تئوری الاستیسیته بوسینسک بطور متوسط برابر ۱/۵ بدست آمد. این واقعیت که رابطه بوسینسک مقدار تنش افقی افزوده ناشی از سربار را که کمتر از واقعیت محاسبه می‌نماید، همانند دستیافته‌های تجربی (البته گزارشهای تجربی کمی در این مورد وجود دارد) مورد تصدیق قرار گرفت. اما نتیجه درخور توجه دیگر آن است که در عمل این اختلاف یعنی نتیجه مابین واقعیت و حاصل از رابطه بوسینسک برابر ۲ گزارش شده است، در حالیکه در این تحقیق این اختلاف برابر ۱/۵ بدست آمده است. در این تحقیق تنها بررسی برای اثر سربار خطی و نواری صورت گرفت و برای حالات مختلف سربار مانند سربار نواری با طول محدود، سربار اعمالی بر سطح محدود، سربار مثلثی نیاز به تحقیق و بررسی دارد تا با در نظر گرفتن همه حالات سربار به یک جمع بندی جامعی رسید.

تشریح نتایج

با توجه به دو نمودار شکل ۸ مشاهده می‌شود که تقریباً همیشه رابطه بوسینسک تنش افزوده افقی ناشی از سربار را در دو حالت سربار خطی و نواری کمتر از مقدار برنامه Plaxis محاسبه می‌کند. در مورد سربار خطی هرچه به سطح زمین نزدیک می‌شویم این اختلاف بیشتر می‌شود و تغییر نسبت پواسون آنچنان تاثیر خاصی بر نتایج حاصل ندارد. اما در مورد سربار نواری تقریباً اختلاف مابین نتایج حاصل از روش بوسینسک و برنامه Plaxis تقریباً تاثیر از عمق ندارد و همچنین تغییر نسبت پواسون آنچنان تاثیر خاصی بر نتایج حاصله ندارد. با توجه به نتایج تجربی مبنی بر اینکه مقدار واقعی تنش افزوده افقی ناشی از سربار ۲ برابر مقدار محاسبه شده توسط رابطه بوسینسک می‌باشد در این تحقیق این مقدار بطور متوسط برابر ۱/۵ بدست آمد و این مطلب که رابطه بوسینسک مقدار تنش افقی ناشی از سربار را کمتر از واقعیت محاسبه می‌کند توسط برنامه

مراجع

1. Boussinesq, M.J. (1876). "Theoretical essay on the equilibrium of elasticity of pulverulent masses and on the pressure of earths without cohesion" *Memories couronnes, Acad. R. Sci. Belg*, 40 (4).
2. Kim, J.S. and Barker, R.M. (2002). "Effect of live load surcharge on retaining walls and abutments" *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, ASCE*, Vol.128, No.10, pp. 803-812.
3. Holl, D.L. (1940). "Stress transmission in earths" *Proc., Highway research board, Washington, D.C.*, 20, pp. 709-721
4. Poulos, H.G. and Davis, E.H. (1974). "Elastic solution for soil and rock mechanics" *wiley*, New York.
5. Geber, E. (1929). "Discussion of investigations of the distribution of pressure in locally loaded sand" *A.-G. Gebr. Leemann, Zurich*.
6. Spangler, M.G. (1936). "The distribution of normal pressure on a retaining wall due to a concentrated surface load" *Proc., Int. Conf. Soil mechanics and foundation Engineering*, graduate school of Engineering, Harvard University., Cambridge, Mass, pp. 200-207.
7. Terzaghi, K. (1954). "Anchored bulkhead" *Transactions, ASCE*, 119, pp. 1954.
8. Mindlin, R. D. (1936). "Discussion: Pressure distribution on retaining walls." *Proc., Int. Conf. Soil Mechanics and Foundation Engineering, Graduate School of Engineering, Harvard University., Cambridge, Mass.*, 155-156.
9. Bowles, J.E. (1996). "Foundation analysis and design" Fifth edition, John Wiley and Sons, USA.
10. Verruijt, A. (2004). "Soil mechanics" *Delft University of Technology*.
11. Plaxis, Version 7, Prat 2, Reference Manual.
12. Sherif, M.M. and Mackey, R.D. (1977). "Pressure on retaining wall with repeated loading" *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, Vol. 103, No. 11, pp. 1341-1343.