



توسعه نرم‌افزاری برای تحلیل تنش‌های ناشی از پایه‌های معدنی با شکل هندسی دلخواه بر اساس روش نمودار تاثیر تنش نیومارک

نیما بابانوری^۱، علیرضا کارگر^۲

۱- استادیار گروه مهندسی معدن، دانشگاه صنعتی همدان

۲- استادیار دانشکده مهندسی معدن، پردیس دانشکده‌های فنی، دانشگاه تهران

(دریافت ۱۳۹۵/۱۱/۲۰، پذیرش ۱۳۹۶/۰۶/۱۳)

چکیده

بارگذاری پی در حوزه مهندسی معدن عمدتاً در پایه‌های معادن زیرزمینی اتفاق می‌افتد که در بسیاری موارد شکل هندسی نامنظمی دارند. مطالعات پیشین در مورد پایه‌های معدنی عمدتاً بر توزیع تنش‌ها در داخل خود پایه متمرکز بوده‌اند، نه تنش‌های القایی ناشی از آن در لایه‌های زیرین. به عبارت دیگر، به یک پایه معدنی بیشتر به عنوان یک ستون توجه شده است، تا به عنوان یک پی. محاسبه تنش‌های ناشی از پی در سنگ یا خاک یکی از تحلیل‌های مهم در طراحی ایمن انواع سازه‌ها است. از این‌رو، روش‌های متعددی برای تخمین این تنش‌های القایی در زمین ارایه شده است. یکی از این روش‌ها استفاده از نمودار تاثیر است، که علیرغم داشتن بنیان تئوری و قابلیت تحلیل پی‌ها با شکل هندسی دلخواه، به علت دشواری‌هایی که در ترسیم و محاسبه دارد کمتر به عنوان یک روش کارآمد در طراحی مورد توجه قرار می‌گیرد. در این مقاله به معرفی و ارزیابی نرم‌افزاری پرداخته می‌شود که بر مبنای نمودار تاثیر در ترکیب با تکنیک‌های پردازش تصویر، تعیین توزیع این تنش‌های القایی ناشی از پایه‌های معدنی را میسر می‌سازد. نرم‌افزار دارای رابط کاربری گرافیکی است و ایجاد یا ویرایش هندسه پایه در آن به آسانی انجام می‌شود. این برنامه قادر است مقدار فشار در هر نقطه دلخواه در عمق زمین و در هر مقطع دلخواه را بدست دهد. سرعت تحلیل تنش‌ها با استفاده از نرم‌افزار توسعه داده شده در مقایسه با کدهای عددی پیشرفته به مراتب بیشتر است، در حالی که نتایج اختلاف قابل ملاحظه‌ای ندارند. بنابراین استفاده از آن در مطالعات اولیه می‌تواند بسیار کارآمد باشد.

کلمات کلیدی

پایه‌های معدنی، تنش القایی، نمودار تاثیر، پردازش تصویر، روش المان محدود.

۱- مقدمه

داد [۱۳]. بومیستر^۶ (۱۹۴۵) [۱۴] و فاکس^۷ (۱۹۴۸) [۱۵] به مطالعه تنش قائم در یک سیستم دو لایه‌ای الاستیک که در جهت افقی به صورت نامحدود ادامه داشت، پرداختند. وانگ^۸ و همکاران (۲۰۰۶)، راه حلی برای محاسبه جابه‌جایی و تنش ناشی از بار دایره‌ای قائم یکنواخت در یک نیم فضای ناهمگن و ناهمسانگرد ارائه کردند [۱۶]. در تحقیق دیگری، با استفاده از قضیه گوس یک روش ساده برای ارزیابی تنش در نیم فضای الاستیک، همگن و همسانگرد ارائه شد و نمودارها و جدول‌هایی برای تسهیل محاسبات توسعه یافت [۱۷]. اگرچه لایه‌های خاک و سنگ زیر پی‌ها در اغلب موارد کاملاً الاستیک، همسانگرد و همگن نیستند اما در عمل تخمین تنش‌های القایی قائم بر اساس تئوری الاستیسیته منجر به نتایج قابل قبولی می‌شود [۱۹، ۱۸]. یغمایی و عسگری^۹ (۲۰۱۷) راه حلی تحلیلی - عددی برای مساله پی دایره‌ای در یک نیم‌فضای همسانگرد عرضی^{۱۰} تحت انواع بارگذاری‌ها ارائه کردند [۲۰]. در تحقیقات مشابهی، آی^{۱۱} و همکاران (۲۰۱۴) [۲۱] و چشمه‌خانی و اسکندری - قادی^{۱۲} (۲۰۱۶) [۲۲] به این موضوع پرداختند. ژانگ^{۱۳} و همکاران (۲۰۱۶) با یک روش تحلیلی، تغییرشکل‌های ناشی از پی را در یک محیط لایه‌ای محاسبه و نتایج را با مدلسازی عددی مقایسه کردند [۲۳]. ژان^{۱۴} و همکاران (۲۰۱۴) پاسخ یک محیط همسانگرد عرضی به یک پی نواری تحت بارگذاری دینامیک را تحلیل کردند [۲۴]. آنگیونام^{۱۵} (۲۰۱۴) تنش‌ها و تغییرشکل‌های ناشی از بار نقطه‌ای قائم در یک مقطع ناهمسانگرد از نیم فضا را محاسبه کرد [۲۵].

روش نمودار تاثیر علیرغم داشتن بنیان تئوری و قابلیت تحلیل پی‌ها با شکل هندسی دلخواه، به علت دشواری‌هایی که در ترسیم و محاسبه دارد کمتر به عنوان یک روش کارآمد در طراحی مورد توجه قرار می‌گیرد. این مقاله به تشریح و ارزیابی پیاده‌سازی کامپیوتری نمودار تاثیر برای تخمین تنش‌های القایی ناشی از پی‌ها می‌پردازد. نرم‌افزار ارائه شده دارای رابط کاربری گرافیکی است و ایجاد یا ویرایش هندسه پی در آن به آسانی انجام می‌شود. این برنامه قادر است مقدار فشار در هر نقطه دلخواه در عمق زمین و در هر مقطع دلخواه را بدست دهد. برای ارزیابی خروجی‌های برنامه، نتایج آن با نتایج به دست آمده از روش‌های تحلیلی و مدلسازی عددی برای مثال‌هایی مقایسه شدند. نتایج نشان داد که نرم‌افزار توسعه یافته می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد و سریع در تحلیل

بار ناشی از کلیه سازه‌های مهندسی که روی زمین احداث می‌شوند به وسیله پی به لایه‌های خاک و سنگ زیرین منتقل می‌شود. در دهه‌های اخیر سازه‌های متعددی به دلیل بارگذاری بیش از اندازه در لایه‌های زیرین زمین دچار گسیختگی شده‌اند [۲، ۱]. بارگذاری پی در حوزه مهندسی معدن عمدتاً در پایه‌ها و لنگه‌ها در معدنکاری زیرزمینی اتفاق می‌افتد. این پایه‌ها در بعضی موارد شکل هندسی منظمی دارند (به عنوان مثال در روش اتاق و پایه) و در بسیاری موارد شکل هندسه پی نامنظم است (مثلاً در روش کارگاه و پایه). مطالعات پیشین در خصوص پایه‌های معدنی عمدتاً بر چگونگی توزیع تنش‌ها در داخل خود پایه متمرکز بوده‌اند [۸-۳]. نه تنش‌های القایی ناشی از آن در لایه‌های زیرین پایه. به عبارت دیگر، به یک پایه معدنی بیشتر به عنوان یک ستون توجه شده است و نه به عنوان یک پی. حال آنکه در یک طراحی مناسب پایه، باید وزن روباره و خود پایه بدون ایجاد تنش بیش از حد به لایه‌های زیرین منتقل شود. در غیر این صورت، تنش‌های القایی در خاک یا سنگ منجر به نشست غیرمجاز و یا گسیختگی برشی می‌شوند. بنابراین، ارزیابی تنش‌های ناشی از پایه‌های معدنی، به مثابه پی، یکی از مسایل مهم در طراحی این سازه‌ها است. مقدار فشار اضافی ناشی از پی که در لایه‌های زیرین زمین اتفاق می‌افتد به بار وارد بر واحد سطح پی، عمق مورد نظر و عوامل دیگری وابسته است. این مطالعه به راه‌حلی تحلیلی برای تعیین تنش‌های القایی ناشی از پایه‌های معدنی با شکل دلخواه می‌پردازد.

در این زمینه، ابتدا بوسینسک^۱ (۱۸۸۳) راه حلی برای محاسبه تنش ایجاد شده در اثر یک بار متمرکز در هر نقطه از یک محیط الاستیک، همگن، همسانگرد و نیمه بینهایت ارائه کرد [۹]. وسترگارد^۲ (۱۹۳۸)، معادله تنش قائم تحت بار متمرکز در عمق را با در نظر گرفتن ضریب پواسون لایه‌های خاک بیان نمود [۱۰]. در اغلب مسایل مهندسی ژئوتکنیک، حل بوسینسک بر حل وسترگارد ترجیح داده می‌شود. نیومارک^۳ (۱۹۴۲) بر مبنای راه حل بوسینسک نمودار تاثیر را برای تعیین فشار قائم ناشی از ناحیه چندضلعی تحت بارگذاری یکنواخت ارائه کرد [۱۱]. فادوم^۴ (۱۹۴۸)، با انتگرال‌گیری از راه حل بوسینسک رابطه‌ای برای تعیین فشار قائم تحت بار خطی ارائه داد [۱۲]. آلون^۵ (۱۹۶۲)، رابطه محاسبه تنش عمودی در هر نقطه زیر سطح دایره‌ای با بار یکنواخت را توسعه

تعیین عمق z زیر ناحیه بارگذاری که در آن مقدار افزایش فشار مد نظر است.

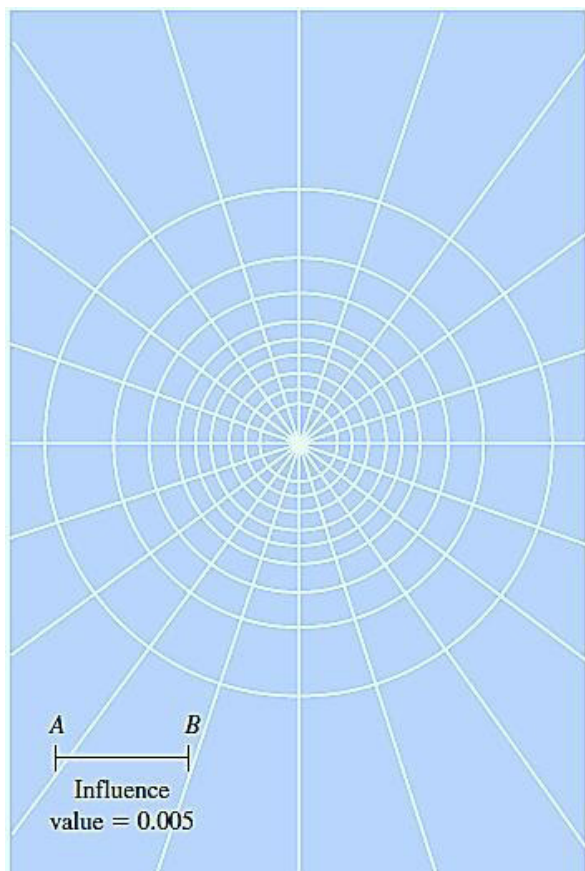
ترسیم هندسه چندضلعی ناحیه بارگذاری با مقیاس z برابر واحد طول نمودار (AB)

قرار دادن نقشه پی (ترسیم شده در مرحله ۲) روی نمودار تاثیر به نحوی که نقطه مورد نظر برای محاسبه تنش در مرکز نمودار قرار گیرد.

شمارش تعداد قطاع‌ها (M) که در محدوده ناحیه بارگذاری قرار می‌گیرند. افزایش فشار در نقطه مورد نظر برابر خواهد بود با:

$$\Delta\sigma_z = (IV)qM \quad (3)$$

که IV فاکتور تاثیر و q فشار وارد بر واحد سطح ناحیه بارگذاری است.



شکل ۱: نمودار تاثیر برای تعیین فشار قائم بر اساس تئوری بوسینسک [۱۱]

تنش‌های القایی ناشی از پی در مطالعات اولیه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین از آنجا که پی‌ها با هندسه‌های پیچیده در این برنامه بر مبنای حل بوسینسک مدلسازی می‌شوند، می‌تواند برای مطالعات تحلیلی نیز قابل توجه باشد.

۲- نمودار تاثیر

بوسینسک (۱۸۸۳) راه حل محاسبه تنش‌های القایی در هر نقطه در یک محیط الاستیک همگن و همسانگرد ناشی از بار نقطه‌ای در سطح یک نیم‌فضا را ارائه داد [۹]. با استفاده از حل بوسینسک، می‌توان تنش‌های قائم ($\Delta\sigma_z$) زیر مرکز یک ناحیه دایره‌ای انعطاف‌پذیر با بارگذاری یکنواخت (q) را از رابطه یک به دست آورد:

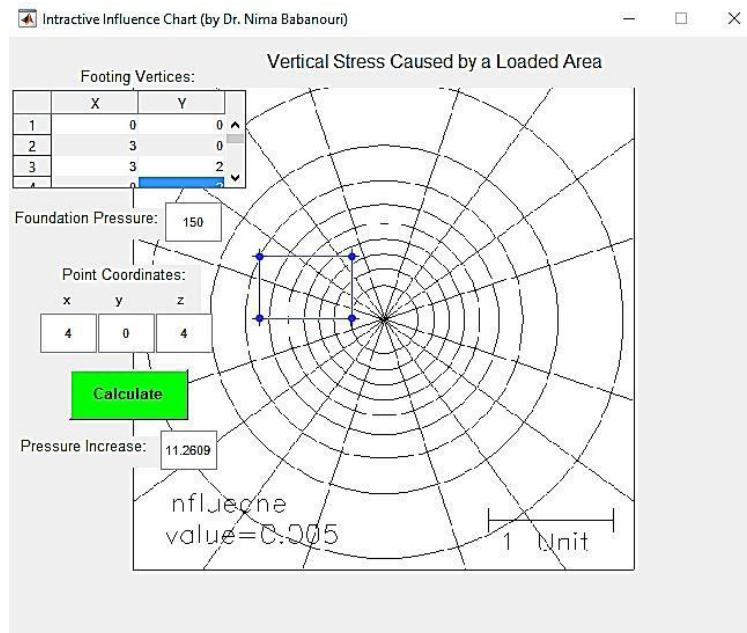
$$\Delta\sigma_z = q \left\{ 1 - \frac{1}{\left[\left(\frac{R}{z} \right)^2 + 1 \right]^{3/2}} \right\} \quad (1)$$

که R و z به ترتیب شعاع ناحیه بارگذاری سطحی و عمق نقطه مورد نظر هستند. رابطه ۱ را می‌توان به شکل رابطه ۲ بازنویسی کرد:

$$\frac{R}{z} = \sqrt{\left(1 - \frac{\Delta\sigma_z}{q} \right)^{-2/3} - 1} \quad (2)$$

که در آن R/z و $\sigma\Delta_z/q$ کمیت‌هایی بدون بعد هستند. با استفاده از نسبت‌های R/z به دست آمده از معادله ۲ برای نسبت‌های مختلف فشار، نیومارک (۱۹۴۲) روش نمودار تاثیر را ارائه کرد که با استفاده از آن می‌توان فشار قائم در هر نقطه زیر یک ناحیه بارگذاری انعطاف‌پذیر با شکل دلخواه را تعیین کرد [۱۱]. شکل ۱، یک نمودار تاثیر را که با رسم دایره‌های هم‌مرکز تشکیل می‌شود نشان می‌دهد. برای رسم دایره‌ها، از نسبت‌های ۱، ۰٫۲، ۰٫۱، ۰، $\sigma\Delta_z/q$ استفاده شده است. باید توجه داشت که برای $\sigma\Delta_z/q = 0$ ؛ $R/z = 0$ و برای $1 = \sigma\Delta_z/q$ ؛ $R/z = \infty$ بنا بر این، نُه دایره ترسیم می‌شود. واحد طول برای ترسیم دایره برابر طول پاره خط AB است. هر دایره با چندین خط شعاعی به قطعات مساوی تقسیم می‌شود. فاکتور تاثیر نمودار برابر I/N است، که N معادل مجموع تعداد قطاع‌ها در نمودار تاثیر است. در شکل ۱، تعداد ۲۰۰ قطاع وجود دارد و در نتیجه فاکتور تاثیر نمودار ۰٫۰۰۵ است [۱۱].

روند به دست آوردن فشار در نقطه دلخواه زیر ناحیه بارگذاری به شرح زیر است:



شکل ۲: محیط برنامه به همراه نتیجه آن برای یک پی مستطیلی

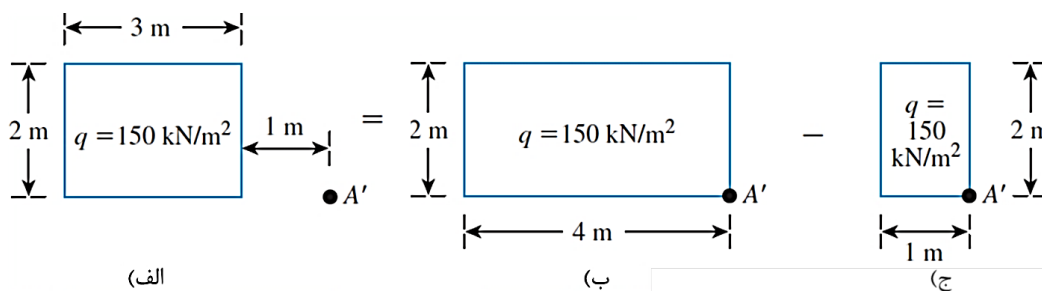
۳، افزایش فشار در نقطه مورد نظر محاسبه می‌شود. شکل ۲ رابط گرافیکی این برنامه را به همراه خروجی آن برای یک مثال نشان می‌دهد. ورودی‌هایی که نرم‌افزار از کاربر می‌گیرد عبارت است از مختصات رئوس پی، نیروی وارد بر واحد سطح پی و مختصات نقطه مورد نظر در عمق و خروجی نرم‌افزار فشار القایی ناشی از پی در نقطه وارد شده است. علاوه بر امکان وارد کردن مختصات رئوس پی از طریق جدول، امکان ویرایش هندسه ماسک به وسیله ماوس نیز وجود دارد. کلیه مراحل پیاده‌سازی نرم‌افزاری نمودار تاثیر در محیط MATLAB R2016a انجام گرفته است.

شکل ۳- الف، مشخصات ناحیه بارگذاری مستطیلی مورد تحلیل در شکل ۲ و مختصات نقطه مورد بررسی که خارج از ناحیه بارگذاری و در عمق ۴ متری واقع شده است را نشان می‌دهد. با تبدیل مساله به دو بارگذاری مستطیلی و محاسبه تنش در زیر یکی از رئوس آن‌ها (شکل‌های ۳- ب و ج) مقدار افزایش تنش در نقطه A' با استفاده از روابط تحلیلی موجود برابر $11,28 \text{ kN/m}^2$ محاسبه می‌شود [۲۶] که در توافق نزدیک با مقدار به دست آمده از برنامه نمودار تاثیر (یعنی $11,26 \text{ kN/m}^2$) است. این امر پیاده‌سازی کامپیوتری صحیح نمودار تاثیر را تایید می‌کند.

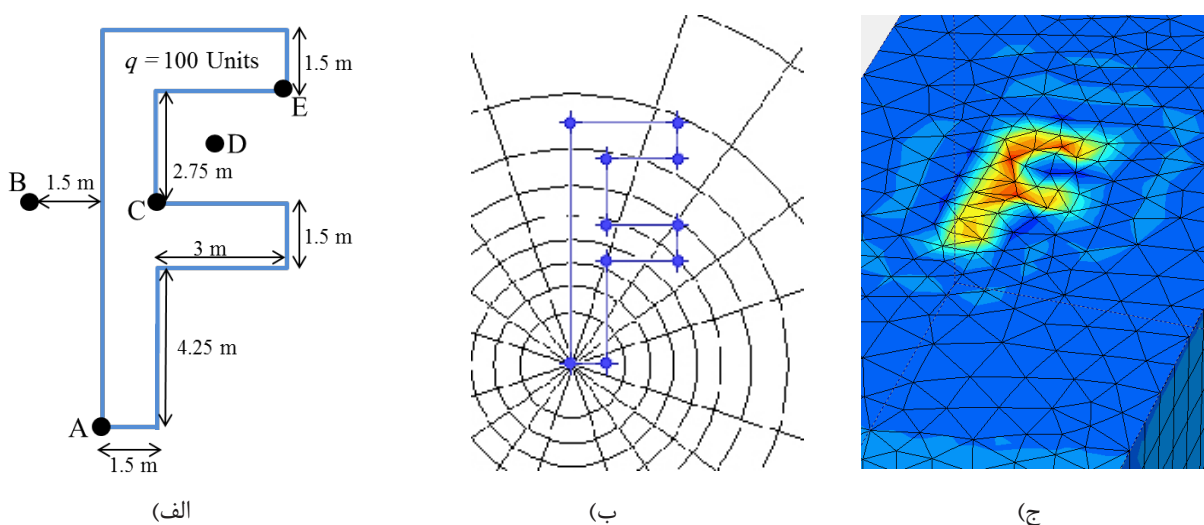
۳- پیاده‌سازی کامپیوتری نمودار تاثیر

در این نرم‌افزار، برای پیاده‌سازی نمودار تاثیر و استفاده از آن از تکنیک‌های پردازش تصویر استفاده شد. ابتدا تصویر یک نمودار تاثیر خاکستری^{۱۶} بصورت یک آرایه از پیکسل‌ها^{۱۷} در نظر گرفته شد. برای هر یک از پیکسل‌های این تصویر، وزنی با توجه به شعاع آن از مرکز اختصاص داده شد به نحوی که مجموع وزن پیکسل‌هایی که در یک قطاع واقع می‌شوند برابر ۱ باشد. با توجه به این که قطاع‌های دور از مرکز تعداد پیکسل‌های بیشتری را در خود دارند، هر چه فاصله یک پیکسل از مرکز نمودار بیشتر شود، وزنی که به آن اختصاص می‌یابد کمتر است.

نرم‌افزار مختصات رئوس پی (X و Y) و مختصات نقطه مورد نظر زیر آن (x ، y و z) را می‌گیرد و یک ماسک چندضلعی روی تصویر نمودار تاثیر می‌اندازد که مشخص‌کننده هندسه پی با توجه به مقیاس $AB = z$ است (شکل ۲). این ماسک در موقعیتی از نمودار تاثیر قرار می‌گیرد که موقعیت تصویر نقطه مورد بررسی روی سطح زمین منطبق بر مرکز نمودار باشد. مجموع وزن کل پیکسل‌هایی که در داخل ماسک می‌افتند، معادل تعداد قطاع‌هایی است که در داخل ناحیه بارگذاری سطحی واقع می‌شوند. در نهایت با توجه به رابطه



شکل ۳: مشخصات ناحیه بارگذاری مستطیلی مورد تحلیل در شکل ۲ [۲۶]



شکل ۴: تحلیل پی F شکل: الف) مشخصات پی و نقاط مورد بررسی؛ ب) مدلسازی در برنامه نمودار تأثیر؛ ج) مدلسازی در Plaxis

مدلسازی‌های عددی انجام شده در این مطالعه، مدل رفتاری الاستیک خطی برای مواد در نظر گرفته شد تا با فرضیات نمودار تأثیر در توافق باشد. تنش‌های القایی محاسبه شده از نرم‌افزار نمودار تأثیر و تحلیل عددی در نقطه A' و در عمق‌های مختلف در جدول ۱ ارایه شده است.

جدول ۱: تنش‌های القایی محاسبه شده از نرم‌افزار نمودار تأثیر و

تحلیل عددی در نقطه A' و در عمق‌های مختلف

عمق (m)	۴	۸	۱۲	۱۶	۲۰
نرم‌افزار نمودار تأثیر	۱۱,۲۶	۵,۱۸	۲,۹۲	۱,۷۱	۱,۱۸
Plaxis	۱۲,۹۳	۵,۹۷	۳,۳۴	۱,۹۷	۱,۳۹

۴- مقایسه با تحلیل عددی

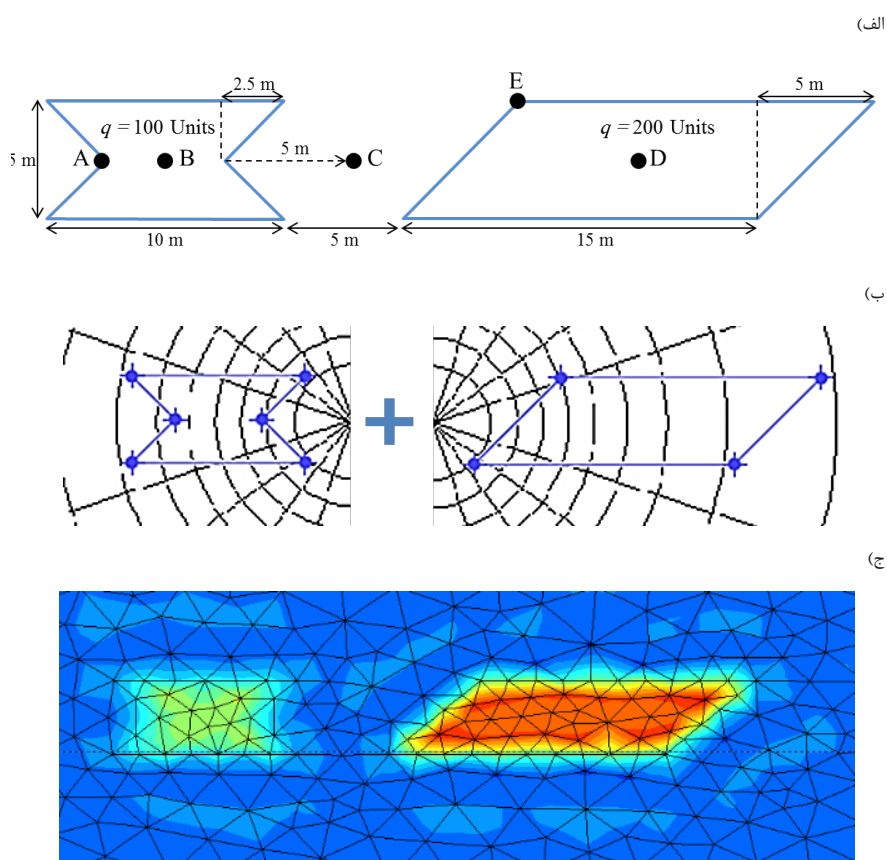
به منظور بررسی کارایی نرم‌افزار توسعه داده شده، در این بخش به مقایسه نتایج آن با نتیجه تحلیل عددی پرداخته می‌شود. از آنجا که تحلیل تنش‌های القایی در خاک و سنگ ناشی از بارگذاری پی در اغلب موارد یک مساله سه‌بعدی است، باید از یک کد عددی سه‌بعدی برای این منظور استفاده کرد. در این مطالعه، نرم‌افزار المان محدود Plaxis 3D Foundation برای انجام تحلیل عددی مورد استفاده قرار گرفته است. این نرم‌افزار به طور گسترده برای شبیه‌سازی پی و تعیین تنش ناشی از آن مورد استفاده قرار می‌گیرد [۲۷].

در اولین مقایسه، مساله بارگذاری سطحی مستطیلی که در شکل‌های ۲ و ۳ مشخص شده است در Plaxis مدلسازی شد. شکل ۴ شبیه‌سازی عددی این مساله را نشان می‌دهد. در کلیه

جدول ۲: تنش‌های القایی محاسبه شده از نرم‌افزار نمودار تاثیر و تحلیل عددی در نقاط واقع در موقعیت‌ها و عمق‌های متفاوت زیر ناحیه بارگذاری F شکل*

عمق (m)	A	B	C	D	E
۴	۱۲,۲۳	۱۶,۳۷	۳۳,۲۸	۲۵,۵۳	۱۷,۱۸
	(۱۴,۰۶)	(۱۸,۸۲)	(۳۸,۱۰)	(۲۸,۸۸)	(۱۹,۸۱)
۸	۷,۳۱	۱۰,۴۵	۱۳,۸۱	۱۳,۰۲	۹,۷۲
	(۸,۵۶)	(۱۲,۰۳)	(۱۵,۶۱)	(۱۵,۲۲)	(۱۱,۴۲)
۱۲	۴,۷۴	۶,۱۱	۷,۲۷	۶,۸۵	۵,۹۸
	(۵,۵۸)	(۷,۰۵)	(۸,۴۷)	(۷,۸۶)	(۶,۷۹)

* مقادیری که در داخل پرانتز آمده‌اند نتایج به دست آمده از تحلیل عددی را نشان می‌دهند.



شکل ۵: تحلیل یک پی مرکب: الف) مشخصات پی و نقاط مورد بررسی؛ ب) برهم‌نهی نتایج نمودار تاثیر؛ ج) مدلسازی در Plaxis

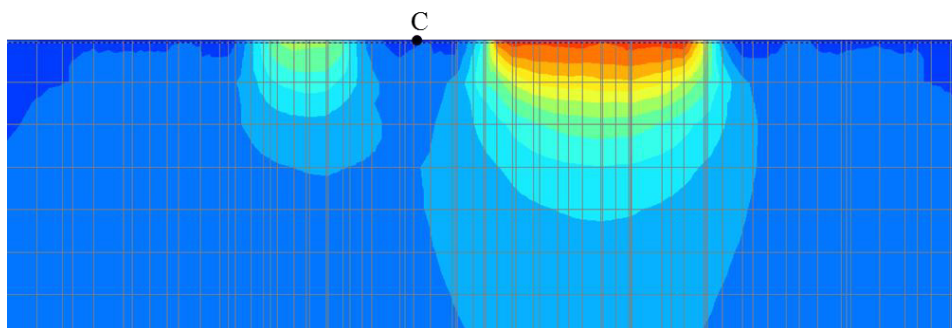
در نهایت، یک پی مرکب با مشخصات نشان داده شده در شکل ۵- الف مورد تحلیل قرار گرفت. شکل‌های ۵- ب و ج به ترتیب مدلسازی این پی در نرم‌افزار نمودار تاثیر و Plaxis را نشان می‌دهند. جدول ۳ تنش‌های القایی محاسبه شده از نرم‌افزار نمودار تاثیر و تحلیل عددی در نقاط A, B, C, D, و E در عمق‌های مختلف را نشان می‌دهد.

در مرحله بعد یک ناحیه بارگذاری به شکل حرف F در نرم‌افزار نمودار تاثیر و Plaxis مورد تحلیل قرار گرفت (شکل ۴). جدول ۲ فشار القایی محاسبه شده از هر دو تحلیل در نقاط A, B, C, D, و E واقع در موقعیت‌های متفاوت در داخل، گوشه و خارج ناحیه بارگذاری (مشخص شده در شکل ۴- الف) و در عمق‌های مختلف را مقایسه می‌کند.

جدول ۳: تنش‌های القایی محاسبه شده از نرم‌افزار نمودار تاثیر و تحلیل عددی در نقاط واقع در موقعیت‌ها و عمق‌های متفاوت زیر ناحیه بارگذاری مرکب*

عمق (m)	A	B	C	D	E
۴	۴۳٫۹۴	۵۵٫۵۳	۵٫۷۲	۱۳۰٫۷۱	۶۶٫۸۱
	(۵۰٫۱۰)	(۶۲٫۷۷)	(۶٫۶۲)	(۱۴۹٫۸۲)	(۷۵٫۵۲)
۸	۲۰٫۴۳	۲۴٫۱۵	۱۲٫۶۸	۶۷٫۲۱	۴۳٫۷۸
	(۲۴٫۰۳)	(۲۸٫۴۳)	(۱۴٫۶۴)	(۷۶٫۳۳)	(۵۰٫۶۵)
۱۲	۱۲٫۶۱	۱۴٫۹۶	۱۳٫۴۹	۳۸٫۹۱	۲۹٫۴۸
	(۱۴٫۵۲)	(۱۷٫۴۰)	(۱۵٫۵۴)	(۴۵٫۵۲)	(۳۳٫۷۸)

* مقادیری که در داخل پرانتز آمده‌اند، نتایج به دست آمده از تحلیل عددی را نشان می‌دهند.



شکل ۶: افزایش فشار زیر نقطه C با افزایش عمق به دلیل ورود به محدوده تاثیر پی‌ها

تحقیق نشان داده شده قابل توجه نیست.

۵- نتیجه‌گیری

در این مقاله، نرم‌افزاری بر مبنای نمودار تاثیر برای تخمین تنش‌های القایی ناشی از پایه‌های معدنی ارائه شده است. در این نرم‌افزار، برای پیاده‌سازی نمودار تاثیر و استفاده از آن از تکنیک‌های پردازش تصویر استفاده شد. برای هر یک از پیکسل‌های تصویر نمودار تاثیر، وزنی با توجه به شعاع آن از مرکز اختصاص داده شد به نحوی که مجموع وزن پیکسل‌هایی که در یک قطاع واقع می‌شوند برابر ۱ باشد. مختصات رئوس پی به صورت یک ماسک چندضلعی روی تصویر نمودار تاثیر قرار می‌گیرد و با شمارش مجموع وزن کل پیکسل‌هایی که در داخل ماسک می‌افتند، افزایش فشار در نقطه مورد نظر محاسبه می‌شود. نرم‌افزار ارائه شده دارای رابط کاربری گرافیکی است و ایجاد یا ویرایش هندسه پی در آن به آسانی انجام می‌شود. نتیجه به دست آمده از نمودار تاثیر برای فشار زیر یکی از رئوس پی مستطیلی با نتایج به دست آمده از روابط تحلیلی

مقایسه نتایج ارائه شده در جداول ۱ تا ۳ نشان می‌دهد که در همه نقاط، مقدار فشار به دست آمده از نمودار تاثیر حدود ۱۳ درصد کوچکتر از مقدار محاسبه شده از تحلیل عددی است. در هر دو تحلیل، فشار زیر نقطه C با افزایش عمق افزایش یافته است (جدول ۳). دلیل این امر این است که نقطه C میان دو ناحیه بارگذاری قرار گرفته است به نحوی که در اعماق پایین تحت تاثیر هیچ یک از این نواحی نیست و با افزایش عمق نقاط زیر آن وارد محدوده افزایش فشار پی‌ها می‌شوند (شکل ۶). تمایز اصلی روش‌های عددی با روش‌های تئوری مانند آنچه در این تحقیق پیاده‌سازی شده است، توانایی در تحلیل کرنش‌ها و تغییرشکل‌ها است. روش‌های عددی تاثیر تغییرشکل‌ها در بازتوزیع تنش‌ها زیر پی را شبیه‌سازی می‌کنند، اما روش نمودار تاثیر از اثر تغییرشکل‌ها صرف نظر می‌کند. علت اصلی تفاوت در نتایج هم به همین مساله برمی‌گردد، بنابراین در مواردی که تغییرشکل‌ها اندک باشد (مطابق با آنچه آیین‌نامه‌ها برای مقدار مجاز تغییرشکل پی بیان کرده‌اند) تفاوت این دو روش مانند آنچه در نتایج این

پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۵، شماره ۹، ص ۴۷-۵۸.

[۸] جلالی، م. ا.؛ نجفی، م.؛ ۱۳۹۱؛ "طراحی ابعاد بهینه پایه در معدن کرومیت فاریاب با توجه به ترتیب مراحل استخراج". نشریه علمی-پژوهشی مهندسی معدن، دوره ۷، شماره ۱۵، ص ۴۷-۳۵.

[9] Boussinesq, J. (1883). "Application des potentiels à l'étude de l'équilibre et du mouvement des solides élastiques". Paris: Gauthier-Villars.

[10] Westergaard, H. M. (1938). "A problem of elasticity suggested by a problem in soil mechanics: soft material reinforced by numerous strong horizontal sheets". Contributions to the Mechanics of Solids, Stephen Timoshenko, 60th Anniversary Volume MacMillan, New York, 260-277.

[11] Newmark, N. M. (1942). "Influence charts for computation of stresses in elastic foundations". University of Illinois. Engineering Experiment Station Bulletin, 48(338): 25.

[12] Fadum, R. E. (1948). "Influence values for estimating stresses in elastic foundations". Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, 77-84.

[13] Ahlvin, R. G., and Ulery, H. H. (1962). "Tabulated values for determining the complete pattern of stresses, strains, and deflections beneath a uniform circular load on a homogeneous half space". Highway Research Board Bulletin, 342: 261.

[14] Burmister, D. M. (1945). "The general theory of stresses and displacements in layered systems. I". Journal of Applied Physics, 16: 89-94.

[15] Fox, L. (1948). "Computation of traffic stresses in a simple road structure". HM Stationery Office, pp. 28.

[16] Wang, C. D., Pan, E., Tzeng, C. S., Han, F., and Liao, J. J. (2006). "Displacements and stresses due to a uniform vertical circular load in an inhomogeneous cross-anisotropic half-space". International Journal of Geomechanics, 6: 1-10.

[17] D'Urso, M. G., and Marmo, F. (2009). "Vertical stresses due to linearly distributed pressures over polygonal domains". Proceedings of ComGeo I, First International Symposium on Computational Geomechanics, 283-290.

[18] Morgan, J. R., and Scala, A. J. (1968). "Flexible pavement behaviour and application of elastic theory-a review". 4th Australian Road Research Board (ARRB) Conference, Melbourne, 4(2).

[19] Bozozuk, M. (1978). "Bridge abutments move". Research Record 678, Transportation Research Board.

[20] Yaghmaie, R., and Asgari, H. (2017). "The Elastodynamic

در توافق بودند که مؤید صحت پیاده‌سازی کامپیوتری نمودار است. به منظور بررسی کارایی نرم‌افزار توسعه داده شده، نتایج آن با خروجی‌های نرم‌افزار المان محدود Plaxis 3D Foundation مقایسه شد. پی‌هایی با هندسه مستطیلی، F شکل و مرکب با هر دو روش مورد تحلیل قرار گرفتند و فشارها در نقاط واقع در موقعیت‌های متفاوت در داخل، گوشه و خارج ناحیه بارگذاری و در عمق‌های مختلف مقایسه شدند. نتایج نشان داد که در همه نقاط، مقدار فشار به دست آمده از نمودار تاثیر حدود ۱۳ درصد کوچکتر از مقدار محاسبه شده از تحلیل عددی است.

نرم‌افزار توسعه یافته می‌تواند به عنوان یک ابزار کارآمد و سریع در تحلیل تنش‌های القایی ناشی از پایه‌های معدنی در مطالعات اولیه مورد استفاده قرار گیرد. همچنین، از آنجا که پی‌ها با هندسه‌های پیچیده در این برنامه بر مبنای حل بوسینسک مدل‌سازی می‌شوند، می‌تواند برای مطالعات تحلیلی نیز قابل توجه باشد.

۶- مراجع

[1] Wikipedia contributors. (2016). "List of structural failures and collapses". Wikipedia, Free Encycl n.d. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=List_of_structural_failures_and_collapses&oldid=744211974.

[2] Srivastava, A., Goyal, C. R., and Jain A. (2012). "Review of Causes of foundation failures and their possible preventive and remedial measures". 4th KKU International Engineering Conference, Thailand.

[3] Choi, D. S., and McCain, D. L. (1980). "Design of longwall systems". Transactions of the Metallurgical Society of AIME, 268: 1761-1764.

[4] Hsiung, S. M., and Peng, S. S. (1985). "Chain pillar design for US longwall panels". Mining Science and Technology, 2: 279-305.

[5] Hustrulid, W. A., and Bullock, R. C. (2001). "Underground mining methods: Engineering fundamentals and international case studies". Society for Mining, Metallurgy & Exploration (SME), pp. 728.

[6] Badr, S. (2004). "Numerical analysis of coal yield pillars at deep longwall mines". Doctoral dissertation, Colorado School of Mines, USA, pp. 176.

[۷] نجفی، م.؛ جلالی، م. ا.؛ سرشکی، ف.؛ یاراحمدی بافقی، ع.؛ ۱۳۸۹؛ "برآورد چگونگی توزیع بار در پایه‌های زنجیری کارگاه‌های استخراج جبهه کار بلند مکانیزه در معدن زغالسنگ طبس با استفاده از روش عددی". نشریه علمی-

[27] Brinkgreve, R. B. J. (2004). "PLAXIS: 3D Foundation".
Version 1. Balkema.

Interaction of a Rigid Circular Foundation Embedded in a Functionally Graded Transversely Isotropic Half-Space". Geo-China Conference, 57–64.

^۱ Boussinesq

^۲ Westergaard

^۳ Newmark

^۴ Fadum

^۵ Ahlvin

^۶ Burmister

^۷ Fox

^۸ Wang

^۹ Yaghmaie and Asgari

^{۱۰} Transversely isotropic

^{۱۱} Ai

^{۱۲} Cheshmehkani and Eskandari-Ghadi

^{۱۳} Zhang

^{۱۴} Zhan

^{۱۵} Anyaegbunam

^{۱۶} Gray scale

^{۱۷} Pixels

[21] Ai, Z. Y., Li, Z. X., and Cang, N. R. (2014). "Analytical layer-element solution to axisymmetric dynamic response of transversely isotropic multilayered half-space". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 60: 22–30.

[22] Cheshmehkani, S., and Eskandari-Ghadi, M. (2016). "Dynamic response of axisymmetric transversely isotropic viscoelastic continuously nonhomogeneous half-space". Soil Dynamics and Earthquake Engineering, 83: 110–123.

[23] Zhang, P., Lin, G., Liu, J., and Wang, W. (2016). "Response of multilayered transversely isotropic medium due to axisymmetric loads". International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics, 40: 827–864.

[24] Zhan, Y., Yao, H., Lu, Z., and Yu, D. (2014). "Dynamic analysis of slab track on multi-layered transversely isotropic saturated soils subjected to train loads". Earthquake Engineering and Engineering Vibration, 13: 731–740.

[25] Anyaegbunam, A. (2014). "Complete Stresses and Displacements in a Cross-Anisotropic Half-Space Caused by a Surface Vertical Point Load". International Journal of Geomechanics, 14: 171–181.

[26] Das, B. M., and Sobhan, K. (2013). "Principles of geotechnical engineering". Cengage Learning, pp. 704.