

کاربرد روشهای عددی در تحلیل پی های گسترده و ارائه محدوده استفاده از روشهای کلاسیک

علیرضاهایی*

چکیده

انتخاب سیستم مناسب پی و طرح آن، از مراحل مهم طراحی انواع سازه‌هاست و بروز هر نوع اشکال در این مراحل نه تنها هزینه اجرای ساختمانها و ابنيه مختلف را افزایش می دهد بلکه گاهی موجب بروز خطر و خسارتهای عمده مالی و جانی می شود. در این مقاله، مدلهای مطالعاتی از نوع پی گسترده انتخاب شده‌اند و در بیش از صد حالت تحت شرایط مختلف هندسی و حالت‌های بارگذاری به روش پی صلب، تفاضلهای محدود، اجزاء محدود و صفحه انعطاف پذیر، با استفاده از برنامه‌های کامپیوتری تدوین شده مطالعه شده‌اند. مبنای مقایسه، آنالیز حاصل از روش اجزاء محدود است که با انتخاب یک سیستم المان بندی مناسب سعی بر حصول نتایج دقیق و سرعت عمل در محاسبه شده است. با تحلیل هفتاد و شش مورد آباکهای تهیه شده، محدوده کاربرد و دامنه نسبی تقریبهای حاصل از روش پی صلب که در محاسبات مهندسی بسیار رایج است ارائه گردیده است.

مقدمه

مقایسه بین فشار موجود در اعضای قائم یک سازه (ستون یا دیوار) که متناسب با خصوصیات مصالح مصرفی، در حدود ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تن بر متر مربع است و شرایط زمین (خاک) به عنوان

* دانشیار دانشکده مهندسی عمران - دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تکیه گاه نهائی سازه‌های مختلف (ساختمان، پل و...) که معمولاً تنش فشاری مجاز آن بین ۱۰ تا ۳۰ تن بر مترمربع است توجیهی برای طرح پی به عنوان یک المان واسط است که نقش آن کاهش فشار اعضای قائم سازه تا حد قابل قبول برای خاک است.

انتخاب سیستم پی به نوع و میزان بارهای وارده از طرف اجزاء سازه و مشخصات خاک بستگی دارد. معمولاً در طراحی ساختمانها بعد از تهیه طرح معماری و انتخاب سیستم اسکلت، آنالیز بارگذاری انجام می‌گیرد و بعد از تعیین سهم بار اجزاء مقاوم به تحلیل آنها اقدام می‌گردد. به موازات این کار با تهیه یک برنامه اولیه، مطالعات ژئوتکنیک انجام می‌شود. در این ارتباط با استفاده از گمانه‌زنی و تهیه نمونه از اعماق مختلف و انجام آزمایشهای متنوع بر روی آنها و یا انجام آزمایشهای صحرائی (نظیر آزمایش فشارسنجی، بارگذاری صفحه‌ای، برش نگار و...) مشخصات مکانیکی، تراکم پذیری و پارامترهای وزنی و حجمی لایه‌های مختلف خاک تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از دو مجموعه اطلاعات فوق الذکر نوع پی به صورت سطحی، نیمه عمیق و یا عمیق و از مصالح مختلف (چوب، مصالح بتائی، بتن مسلح و یا فلزی) انتخاب و طراحی می‌شود و در نهایت با توجه به حساسیت سازه، نشست پی نیز کنترل می‌گردد.

در مورد سازه‌های معمولی در شرایطی که با ظرفیت باربری خاک ضعیف باشد و یا احتمال بروز نشستهای متفاوت وجود داشته باشد که حاصل هر دوی آنها تخریب اجزای پوشش است می‌توان از پی‌های گسترده (رادیه ژنرال) بهره برد. این پی‌ها به صورت صفحه‌ای در زیر تمام ستونهای ساختمان یا بخشی از آن قرار می‌گیرند. بر حسب میزان بارهای وارده و تنش مجاز خاک این صفحه با ضخامت ثابت و یا به شکل صفحه باشبکه تیرهای تقویتی طرح می‌گردد. طرح صفحات بر حسب مشخصات هندسی و ویژگیهای خاک با فرض صلیبیت یا انعطاف پذیری انجام می‌شود. استفاده از روش پی صلب جهت طرح انواع پی‌ها به سال ۱۹۳۰ بر می‌گردد. از آن زمان تا کنون این روش بدلیل سادگی در سطح وسیعی استفاده شده است. با عنایت به ضخامت محدود پی‌های گسترده (نسبت به ابعاد دریلان)، فرضیه تغییر شکل یکنواخت یا خطی برای این صفحات (فرض صلیبیت) با تقریب قابل ملاحظه‌ای همراه است و گاهی حجم مصالح مصرفی رابه شدت افزایش می‌دهد. در این ارتباط محققان مطالعات وسیعی برای ارائه روشهای دقیقتر که انطباق بیشتری نیز با رفتار مصالح داشته باشد انجام دادند که در سال ۱۹۶۶ منجر به ارائه روش تقریبی پی انعطاف پذیر شد. همچنین در سال ۱۹۵۹ روش تفاضلهای محدود بر اساس مبانی تئوری صفحات (تیموشنکو) تدوین و عرضه گردید. با عنایت به محدودیتها و تقریبهای

موجود در روشهای فوق الذکر، مطالعات ادامه یافت و در نهایت از سال ۱۹۶۵ به تدریج روش اجزاء محدود معرفی شد و جای خود را در محاسبات مهندسی باز نمود. کنفرانس اجزاء محدود در دانشگاه مک گیل کانادا در سال ۱۹۷۲ افقهای تازه‌ای را در مورد این روش گشود و بعد از آن مقاله‌های متعددی در مجله‌های بین‌المللی روشهای عددی در مهندسی و مجله مهندسی مکانیک و جامدات درباره کاربرد روش اجزاء محدود در علوم مهندسی انتشار یافت ([۱] و [۲]). در عمل، طراحی دستی پی‌های گسترده عمدتاً با فرض صلبیت انجام می‌گیرد که این موضوع نه تنها باعث افزایش حجم مصالح مصرفی می‌شود بلکه بعضاً نتایج اشتباهی نیز به همراه دارد. در مجموعه تحقیقات انجام گرفته که نتایج آن در این مقاله عرضه می‌گردد سعی شده است تا با آنالیز مدل‌های مختلف با فرض صلبیت و انعطاف پذیری، مقایسه نتایج و بررسی میزان تقریبهای حاصله دیدگاه روشی از محدوده استفاده از روش پی صلب برای مهندسان و دانش پژوهان ترسیم گردد.

مدل مورد مطالعه

برای بررسی اثر پارامترهای مختلف، یک صفحه بتنی واقع بر خاک که بار ۱۲ ستونی را تحمل می‌کند به عنوان مدل در نظر گرفته (شکل ۱) و مشخصات هندسی و بارگذاری آن به شرح زیر تغییر داده می‌شود:

الف) فاصله ستونها

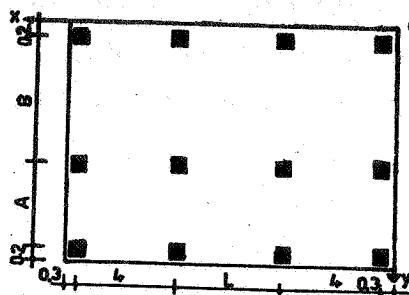
ب) مقادیر بارهای ستونها

ج) ضخامت صفحه

در شرایطی که اثر تغییر شکل صفحه منظور شود، مطالعات با فرض پیوستگی یا ناپیوستگی اجزای آن قابل انجام است. در حالت اول، محاسبه صفحه بر اساس رابطه لاگرانژ بصورت:

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{q - kv}{D} \quad (1)$$

است که غالباً با تعیین شرایط بارگذاری و مشخصات تکیه‌گاهی روابط نیروهای درونی قابل استخراج است. در شرایطی که با توجه به ضریب سختی صفحه و ضریب واکنش بستر سطح تأثیر بار (در رابطه با ایجاد تغییر شکل در صفحه) محدود فرض شود، می‌توان با محاسبه شعاع سختی مؤثر $\left(1 = \sqrt[4]{\frac{D}{ks}}\right)$ ، مقادیر نیروهای درونی را در هر نقطه از سطح



شکل ۱- مدل صفحه و ستونهای مورد مطالعه

تأثیر بر احتی محاسبه نمود [۲]:

$$w = \frac{PL^2}{4D} Z$$

در حالت دوم محاسبات بابه کارگیری روشهای عددی نظیر روش تفاضلهای محدود و اجزاء محدود انجام می پذیرد. در روش تفاضلهای محدود بر اساس معادله دیفرانسیل درجه چهارم فوق الذکر یک معادله ساده به شرح زیر استخراج می گردد تا تغییر شکل هر نقطه رانسبت به تغییر شکل دوازده نقطه اطراف آن بیان کند:

$$20W_0 - 8(W_T + W_B + W_L + W_R) + 2(W_{TL} + W_{TR} + W_{BL} + W_{BR}) \quad (2)$$

$$+ (W_{TT} + W_{BB} + W_{LL} + W_{RR}) = \frac{qh^4}{D} + \frac{Ph^2}{D}$$

براین اساس صفحه پی به یک شبکه با بعد h تبدیل و معادله فوق الذکر برای نقاط مختلف نوشته می شود. از حل سیستم معادله های حاصله، مقدار تغییر شکل نقاط مختلف تعیین می شود [۱]. در روش اجزاء محدود ابتدا صفحه پی به یک شبکه المانهای مثلثی یا مستطیلی تبدیل و مشخصات هندسی المانها و موقعیت گرهها نسبت به یک مبدأ مشخص می گردد. سپس مجموعه بارهای بیرونی روی گرهها (P) تعریف می شوند. اگر نیروی درونی عضوهای شبکه با F ، تغییر مکان گرهها

و تغییر شکل عضوها به ترتیب با x و e نشان داده شوند روابط پایه‌ای روش اجزای محدود به شرح زیر هستند:

$$\begin{aligned} P &= AF & e &= A^T x \\ F &= Se = SA^T x & & \\ P &= ASA^T x & x &= (ASA^T)^{-1} P \end{aligned} \quad (۳)$$

در تحلیل پی، خاک بستریه صورت فنرهای مجزای می‌شود و با تعیین درجه آزادی گره‌ها رابطه نیرو تغییر مکان برای مجموعه المان‌ها نوشته می‌شود و سپس با محاسبه مقدار تغییر مکان گره‌های مختلف، مقادیر نیروهای درونی در نقاط مختلف صفحه تعیین می‌شود [۱].

در صورت صلبیت صفحه، با محاسبه مقدار و موقعیت برابند نیروها، مقدار فشار خاک در نقاط مختلف صفحه پی بدست می‌آید. سپس صفحه پی به یک سری نوارهای طولی و عرضی تبدیل می‌شود و هر نوار با توجه به نیروهای فوقانی و تحتانی وارده تحلیل می‌گردد. در نهایت با تعیین نیروهای درونی در بخشهای مختلف، کنترل پایداری خارجی و داخلی انجام پذیر است.

بدین ترتیب ضمن ثابت نگهداشتن ضریب واکنش بستروتنش مجاز خاک، می‌توان اثر تغییرات عوامل فوق‌الذکر را که در محاسبات مهندسی بسیار مهم‌اند مطالعه نمود. با توجه به پارامترهای متغیر، مدل‌های مطالعاتی در بیش از ۱۰۰ حالت به روشهای اجزای محدود، پی صلب، تفاضل‌های محدود و صفحه یکپارچه انعطاف پذیر با دست و برنامه‌های کامپیوتری مورد تحلیل قرار گرفته‌اند. نتایج حاصل از روش اجزای محدود مبنای مقایسه در کلیه حالتهاست. فاصله طولی ستون‌ها در مدل اول برابر است و سپس این فاصله به تدریج و تا دو برابر تغییر داده شده است (جدول ۱). همچنین در اولین مدل بارگذاری، مقادیر بار ستون‌های یکسان است و سپس اختلاف بار ستون‌ها تا دو برابر می‌رسد (جدول ۲). در همین ارتباط در یکی از مدل‌ها ضخامت صفحه به میزان حداقل مورد نیاز (۵۰ سانتیمتر) در نظر گرفته شده و سپس این ضخامت به تدریج تا چهار برابر مقدار اولیه افزایش داده شده است. لازم به تذکر است که در انتخاب ابعاد و بارهای ستون‌ها همواره سعی در انتخاب مقادیری در حدود متعارف و بارعایت حدود اجرایی بوده است. نظریه اینکه کاربرد عمده پی‌های گسترده برای خاکهای ضعیف و تراکم پذیر است لذا مقدار ضریب واکنش بستر برای یک خاک رسی نرم ($q_u \leq 200 \text{ kPa}$) یا ماسه‌ای نرم و نیمه تراکم برابر 1500 t/m^3 انتخاب گردیده است. بدیهی است

مقادیر نیروهای درونی برای زمینهای مختلف، نتایج متفاوتی خواهند داشت.

جدول ۱- فواصل طولی ستونها در شالوده‌های انتخابی

تیپ شالوده	۱	۲	۳	۴	۵
L (m)	۴	۵	۶	۷	۸

جدول ۲- حالات بارگذاری ستونها

حالت بارگذاری	ستون گوشه	ستون کناری	ستون میانی
۱	۱۰۰۴	۱۰۰۴	۱۰۰۴
۲	۹۵	۱۰۰	۱۰۵
۳	۸۰	۹۵	۱۰۵
۴	۷۰	۸۸	۱۰۵
۵	۵۵	۸۰	۱۰۵

تجزیه و تحلیل نتایج حاصله

چون نتایج حاصل از روش اجزای محدود مبنای مقایسه برای همه حالتهاست، لذا بررسی کلیه مدلها با استفاده از برنامه کامپیوتری مبتنی بر این روش انجام شده و نتایج حاصله استخراج گردیده است. با توجه به محدودیت امکانات برنامه، از شرایط تقارن و تحلیل یک چهارم یا یک دوم سطح برای به کارگیری تعداد گره‌ها و المانهای بیشتر استفاده شده است. در تجزیه پی سعی بر این شد که در مقاطع بحرانی (زیر ستونها و وسط دهانه‌ها) گره‌هایی پیش بینی و نیروهای درونی مستقیماً محاسبه شوند. با توجه به فاصله متعارف ستونها نیازی به تغییرات قابل ملاحظه در ابعاد المانها احساس نشده است، لذا شبکه‌ای یکنواخت با حدود ۱۲۰ گره و المانهای دویعدی $۰/۵ \times ۰/۵$ متر انتخاب گردید. البته بعد از تحلیل نمونه‌های اولیه و مشاهده عدم وجود تغییرات قابل ملاحظه در گره‌های مجاور، ابعاد المانها افزایش یافت. بدین ترتیب با انتخاب ابعاد $۰/۵ \times ۱$ متر برای المانها ضمن سرعت بخشیدن به محاسبات، مقادیر نیروهای درونی در سایر مدلها نیز با دقت قابل ملاحظه‌ای محاسبه شد (در این

حالت برای یک چهارم شالوده شبکه‌ای متشکل از ۷۰ گره و ۶۰ المان تشکیل و مطالعه گردید). برای تحلیل مدل‌ها به روش پی صلب، ابتدا با مطالعه شرایط بارگذاری، مقدار و موقعیت برایندها و سپس مقدار فشار ایجاد شده در خاک محاسبه شده است. همچنین هر صفحه در امتداد طولی به سه نوار و در امتداد عرضی به چهار نوار تقسیم شده به طوری که عرض هر نوار معادل فاصله محوری دهانه‌های مجاور است. در مرحله بعد در هر جهت یک نوار میانی و یک نوار کناری مورد مطالعه قرار گرفته و تغییرات لنگر خمشی در مقاطع مختلف آن محاسبه شده است. لازم به تذکر است که در روش پی صلب توزیع لنگر در جهت عرضی هر نوار یکنواخت است، در حالی که در روش اجزای محدود برای نقاط مختلف عرضی مقادیر متفاوتی حاصل گردیده است که برای مقایسه با نتایج حاصل از روش اول مقدار متوسط آنها در نظر گرفته می‌شود. برای تحلیل صفحه به روش تفاضلهای محدود که مبنای آن مقایسه تغییر شکل هر نقطه نسبت به نقاط اطراف آن است نیز یک برنامه کامپیوتری خاص تهیه و استفاده شده است. بالاخره برای مطالعه صفحه بر روی تکیه‌گاه الاستیک (باروش پیوستگی)، اثر بار متمرکز در ایجاد تغییر شکل بر روی صفحه محدود فرض شده و سپس مقادیر نیروهای درونی حاصل از هر بار متمرکز در محدوده خاصی از آن تعیین شده است. فرض فوق با توجه به اینکه اثر هر بار متمرکز، با دور شدن از نقطه اثر آن به سرعت تقلیل می‌یابد تقریب زیادی ایجاد ننموده و در نهایت لازم است با استفاده از اصل جمع آثار قوا مقادیر نیروهای درونی حاصل از جمع بارها در نقاط مختلف صفحه تعیین نمود.

با تحلیل ۷۶ مورد آباکهای تهیه شده از نتایج آنالیز مدل‌ها که نمونه آنها در صفحات بعد ارائه می‌گردد موارد زیر را به عنوان یک چارچوب کلی برای استفاده از روشهای مختلف آنالیز و طراحی پی‌ها و آگاهی از تقریبهایی که در شرایط مختلف حاصل می‌شود میتوان نتیجه‌گیری کرد.

مقایسه بین نتایج حاصل از روشهای اجزای محدود پی صلب

الف) لنگر خمشی در جهت عرضی

شکل‌های ۲ و ۳ اختلاف نتایج حاصل از دو روش اجزاء محدود و پی صلب را به صورت تابعی از اختلاف طول دهانه برای نوارهای میانی و کناری تحت بارگذاریهای ۱ و ۵ نشان می‌دهد. شکل ۴ نیز اختلاف نتایج دو روش را به صورت تابعی از اختلاف بار ستونها نشان می‌دهد. با توجه به این شکلهای نتایج زیر به دست می‌آید:

شکلها نتایج زیر به دست می آید:

- در هر حالت از بارگذاری مورد مطالعه، اختلاف لنگر (حاصل از دوروش) در نوارهای میانی کمتر از نوارهای کناری است. همچنین اختلاف موجود در مقاطع کناری در مقایسه با مقطع بالنگر ماکزیمم بیشتر است (شکلهای ۲ و ۳).

- با تشدید اختلاف طول دهانه های مجاور مقدار اختلاف لنگر ماکزیمم حاصل از دوروش نیز فزونی می یابد (شکلهای ۲ و ۳). با تغییر سیستم بارها این اختلاف برای مقاطع لنگر ماکزیمم از ۵ تا ۲۰ درصد، مقاطع کناری دهانه از ۸ تا ۳۰ درصد و در زیرستونهای میانی از ۱۰ تا ۶۵ درصد خواهد بود.
- با افزایش اختلاف بارستونهای مجاور، درصد اختلاف بین لنگرهای حاصل از دوروش به ترتیب زیر فزونی می یابد (شکل ۴). برای لنگر ماکزیمم دهانه از ۵ تا ۲۵ درصد، در مقاطع کناری دهانه از ۵ تا ۳۰ درصد و برای لنگر در زیرستون میانی از ۱۰ تا ۷۰ درصد (در نوار کناری) و از ۱۵ تا ۴۰ درصد (در نوار میانی). این مقادیر مربوط به حداکثر دامنه تغییرات در شالوده های مختلف است.

ب) لنگر خمشی در جهت طولی

شکلهای ۴ و ۵ اختلاف نتایج حاصل از دو روش را به صورت تابعی از اختلاف طول دهانه ها برای نوارهای میانی و کناری تحت بارگذاریهای ۱ و ۵ نشان می دهد. شکل ۶ نیز اختلاف نتایج دو روش را به صورت تابعی از اختلاف بارستونها نمایش می دهد. با توجه به این شکلها نتایج زیر حاصل می شود:

- در حالت های مختلف بارگذاری، اختلاف لنگر خمشی حاصل از دوروش بیش از ۴۰ درصد و در نوارهای میانی تا ۲۰۰ درصد (و حتی بیشتر) نیز می رسد.

- با تشدید اختلاف طول دهانه های مجاور، بر میزان اختلاف لنگرها افزوده و تقریباً روش صلب بیشتر می شود (شکلهای ۵ و ۶). به علاوه، شدت تغییرات در دهانه های میانی نسبت به دهانه کناری مشهودتر است.

- در دهانه میانی، منحنیهای مربوط به لنگر ماکزیمم و لنگر در مقاطع کناری در نوار میانی به هم نزدیک می شوند، اما در نوارهای کناری فاصله بیشتری پیدا می کنند (شکل ۵). همچنین با افزایش فاصله ستونها میزان اختلاف بین این دو منحنی نیز فزونی می یابد (شکل ۷).

- در مورد لنگر زیر ستون میانی برای حالتی که اختلاف دهانه ها افزایش داده شود، منحنیهای اختلاف لنگر حاصل از دوروش به سمت یک مجانب میل می کنند (شکلهای ۵ و ۶).

ج) اثرافزایش ضخامت

به منظور روشن شدن علت وجود اختلافهای قابل ملاحظه در مقادیر نیروهای درونی حاصل از دوروش اجزای محدود و پی صلب، یک نمونه از شالوده ها انتخاب و تحت دو حالت بارگذاری مختلف سعی شد تا با افزایش ضخامت آن نسبت به ضخامت محاسباتی اولیه مقادیر لنگرهای خمشی با هم مقایسه شوند. شکل‌های ۸ و ۹ نتایج این مقایسه را برای لنگرهای جهت‌های عرضی و طولی تحت بارگذاری ۵ نشان می‌دهند. در منحنی نمونه شماره ۹ با افزایش ضخامت شالوده، از شدت اختلاف لنگرهای خمشی طولی (M_y) به سرعت کاسته می‌شود و در ضخامت چهار برابر، این اختلافات به کمتر از ۱۵ درصد (و گاهی کمتر از ۱۰ درصد) می‌رسد. شدت کاهش اختلاف لنگر‌ها در دهانه میانی و زیرستون میانی کمتر از دهانه کناری است. بدین ترتیب به نظر می‌رسد در صورت افزایش ضخامت شالوده و در نتیجه نزدیک شدن فرضیات دوروش (تأمین صلبیت)، اختلاف نیروهای حاصله به شدت کاهش یابد و لذا نتایج روش پی صلب جهت منطقی و قابل قبولی بیابد.

مقایسه نتایج حاصل از روشهای اجزاء محدود و پی انعطاف پذیر:

در این حالت نیز پنج مدل شالوده تحت پنج حالت بارگذاری مختلف مطالعه شده‌اند، لازم به تأکید است که برخلاف شرایط قبلی در این حالت مبنای هر دوروش بر اساس تغییر شکل پذیری شالوده (و نه صلبیت آن) است. به طور کلی با توجه به فرض پیوستگی، مقادیر نیروهای حاصل از روش پی انعطاف پذیر کمتر از روش اجزای محدود است (شکل‌های ۱۰ و ۱۱). از طرف دیگر برای هر حالت بارگذاری، با افزایش اختلاف طول دهانه‌های مجاور، اختلاف لنگرهای مقطع وسط صفحه نیز فزونی می‌یابد، اما برای مقطع وسط دهانه کناری کاهش می‌یابد. مقدار متوسط اختلاف لنگر‌ها در جهت عرضی (M_x) بیش از ۴۵ درصد است. در مورد لنگر جهت طولی (M_y) با افزایش اختلاف طول دهانه‌ها بر میزان اختلاف لنگر در وسط دهانه کناری افزوده می‌شود. در مورد مقطع وسط صفحه نیز در صورتی که اختلاف بارستون‌ها بیش از ۱۵ درصد باشد شرایط مشابهی وجود دارد.

مقایسه نتایج حاصل از روشهای اجزاء محدود و تفاضلهای محدود:

در این مورد نیز شالوده‌ها با توجه به برنامه کامپیوتری تدوین شده به روشهای اجزای محدود و تفاضلهای محدود آنالیز شده که هر دو بر اساس تغییر شکل پذیری صفحه‌اند و موارد زیر را با مقایسه

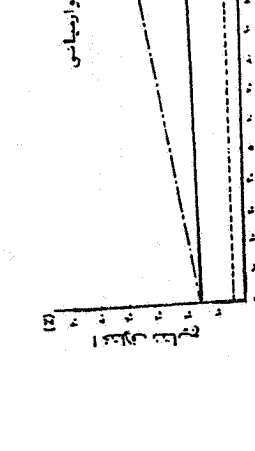
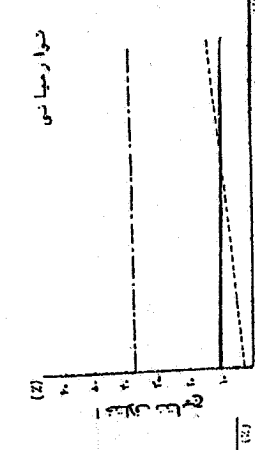
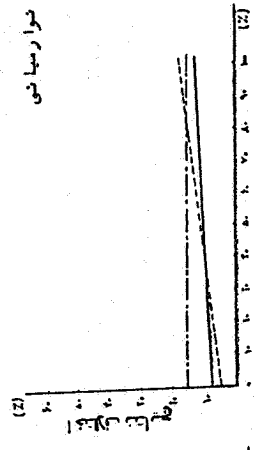
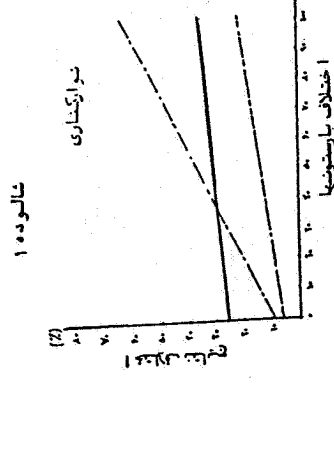
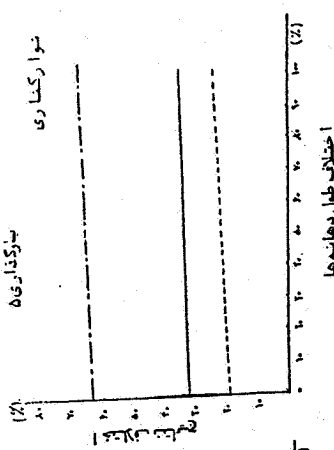
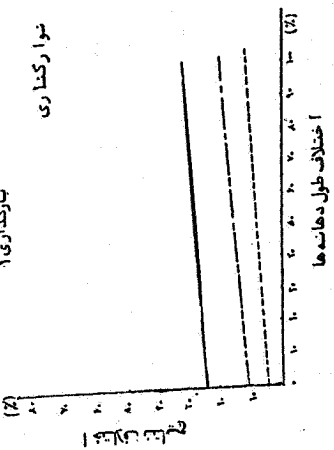
نتایج حاصله می‌توان مورد تأکید قرارداد (شکل ۱۲).

- با افزایش اختلاف بار ستونها اختلاف لنگرهای خمشی طولی (M_p) فزونی می‌یابد، این اختلاف در مقطع زیرستون بیش از وسط دودهانه کناری و میانی است.
 - با افزایش اختلاف بار ستونها، مقادیر لنگرهای خمشی طولی (M_p) در مقطع میانی صفحه ثابت است، اما در مقاطع زیرستون میانی و وسط دهانه کناری اختلاف کمتری خواهد داشت.

نتیجه‌گیری

در حالت کلی با توجه به حجم قابل ملاحظه مطالعات انجام گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که روش پی صلب تنها در شرایط خاص صفحات با ضخامت مهم قابل قبول بوده و استفاده غیر معقول از آن در طراحی پی سازه‌ها غالباً "غیر اقتصادی و گاهی خطرناک نیز هست. برعکس در صورت انتخاب مبانی و فرضیات مناسب، استفاده از روشهای عددی نتایج رضایت بخش و مساعدی را نتیجه می‌دهد.

خطای کمترین مربعات
 خطی
 خطی
 خطی

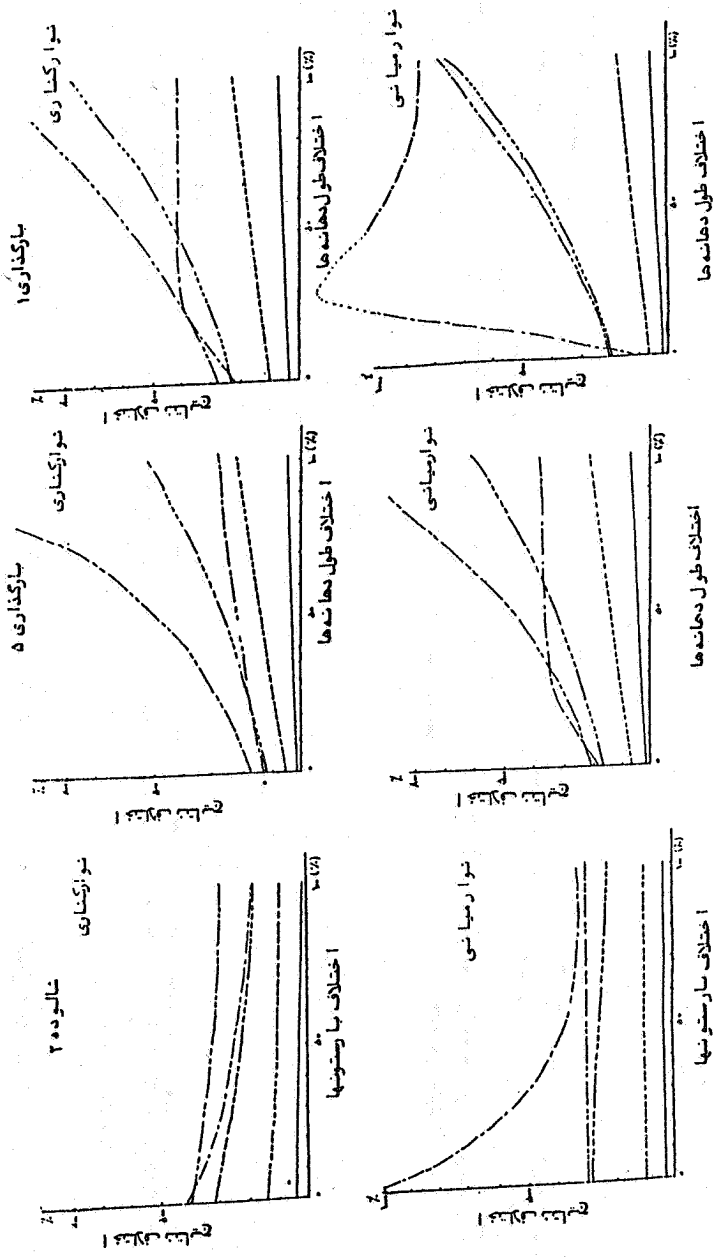


شکل ۲- مقایسه M_x حاصل از روش اجزای محدود و پی صلب

شکل ۳- مقایسه M_x حاصل از روش اجزای محدود و پی صلب

شکل ۴- مقایسه M_x حاصل از روش اجزای محدود و پی صلب

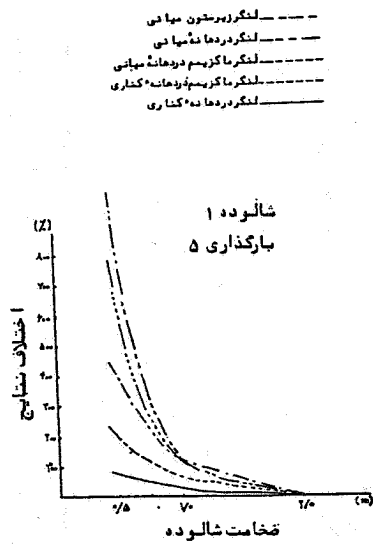
- - - - - لنگر برهمنیون میانی
 - - - - - لنگر بردها نشانه‌های
 - - - - - لنگر ماگنسیوم درهنگام میانی
 - - - - - لنگر ماگنسیوم درهنگام کتاری
 - - - - - لنگر بردها نشانه کتاری



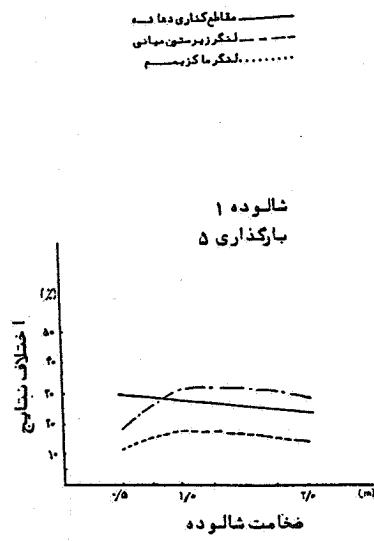
شکل ۵. مقایسه M_1 حاصل از روش اجزای محدود و پی صلب

شکل ۶. مقایسه M_1 حاصل از روش اجزای محدود و پی صلب

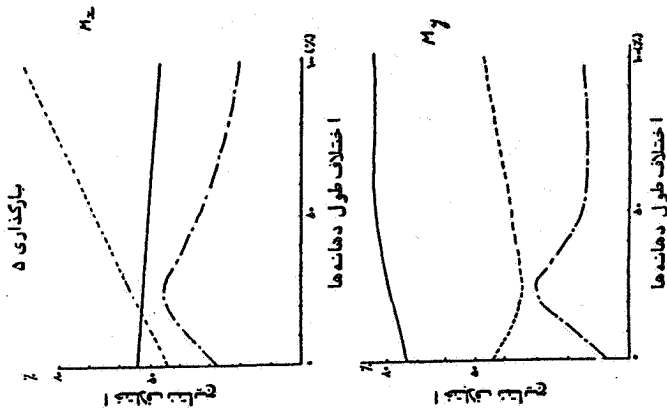
شکل ۷. مقایسه M_1 حاصل از روش اجزای محدود و پی صلب



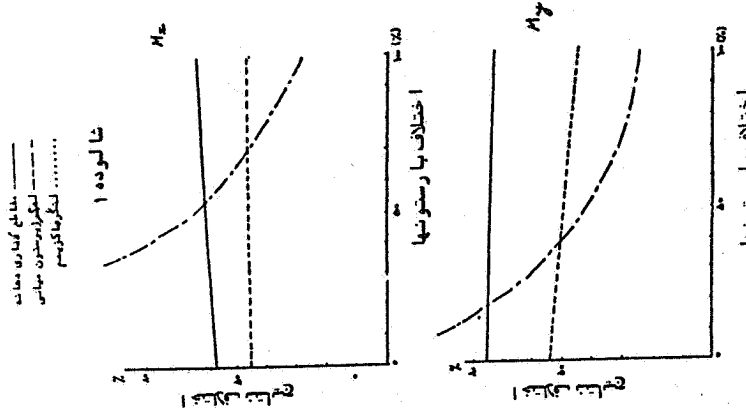
شکل ۹- اثر افزایش ضخامت شالوده بر M_y



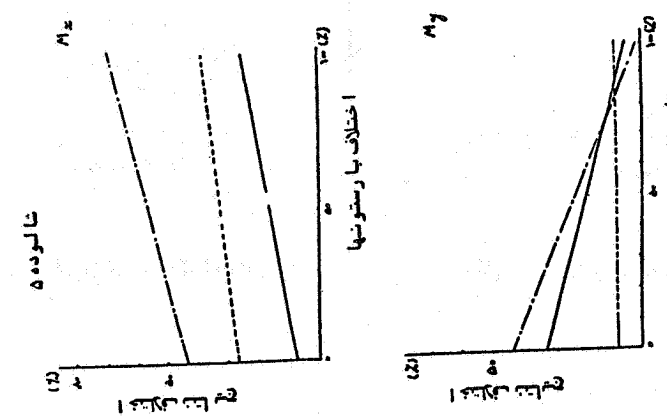
شکل ۸- اثر افزایش ضخامت شالوده بر M_x



شکل ۱۰- مقایسه نتایج حاصل از روش اجزای محدود و پی انعطاف پذیر



شکل ۱۱- مقایسه نتایج حاصل از روش اجزای محدود و پی انعطاف پذیر



شکل ۱۲- مقایسه نتایج حاصل از روش اجزای محدود و تفاوت های محدود

مراجع

1. Bowles, J.E., *Foundation Analysis and Design*, McGraw Hill, 1977. 1983.
2. Bowles, J. E., *Computer Methods in Foundation Engineering*, McGraw Hill, 1974.
3. Zienkiewicz, O.C.G. Cheung, *The finite Element Method in Engineering Science*, McGraw Hill, 1971.
4. Cheung, Y.K., *Plate and Beams on Elastic Foundation, Linear and Nonlinear Behavior*, 1960.