نشریه تحقیقاتی فنی ـ مهندسی استقلال، دانشگاه‌صنعتی‌اصفهان شماره ۱۲ اسفندماه ۱۳۷۱

کاربردروشهای عددی درتحلیل پی‌های گسترده وارائهٔ محدودهٔ استفاده از روشهای کلاسیک

علیرضارهایی*

چکیده

انتخاب سیستم مناسب پی وطرح آن، ازمراحل مهم طراحی انواع سازه‌هاست وبروز هر نوع اشکال در این مراحل نه تنها هزینه اجرای ساختمانها وابنیهٔ مختلف را افزایش می‌دهد بلکه گاهی موجب بروز خطر و خسارتهای عمده مالی و جانی می‌شود.

دراین مقاله، مدلهای مطالعاتی ازنوع پی گسترده انتخاب شده‌اند و در بیش از صد حالت تحت شرایط مختلف هندسی وحالتهای بارگذاری به روش پی صلب، تفاضلهای محدود، اجزاء محدود و صفحهٔ انعطاف پذیر، بااستفاده از برنامه‌های کامپیوتری تدوین شده مطالعه شده‌اند. مبنای مقایسه، آنالیزحاصل از روش اجزاء محدوداست که باانتخاب یک سیستم المان بندی مناسب سعی برحصول نتایج دقیق و سرعت عمل در محاسبه شده است. با تحلیل هفتاد و شش مورد آباکهای تهیه شده، محدودهٔ کاربردودامنه نسبی تقریبهای حاصل از روش پی صلب که در محاسبات مهندسی بسیار رایج است ارائه گردیده‌است.

مقدمه

مقایسهٔ بین فشار موجود در اعضای قائم یک سازه (ستون یادیوار) که متناسب باخصوصیات مصالح مصرفی، در حدود ۵۰۰ تا ۱۰۰۰۰ تن برمترمربّع است و شرایط زمین (خاک) به عنوان

---

* دانشیار دانشکده مهندسی عمران ـ دانشگاه صنعتی امیرکبیر

تکیه گاه نهائی سازه‌های مختلف (ساختمان ،پل و...) که معمولاً تنش فشاری مجاز آن بین ۱۰ تا ۴۰ تن برمترمربع است توجیهی برای طرح پی به عنوان یک المان واسط است که نقش آن‌کاهش فشاراعضای قائم سازه تاحدقابل قبول برای خاک است.

انتخاب سیستم پی به نوع ومیزان بارهای وارده ازطرف اجزاء سازه ومشخصات خاک بستگی دارد. معمولاً درطراحی ساختمانهابعدازتهیهٔ طرح معماری وانتخاب سیستم اسکلت، آنالیزبارگذاری انجام می‌گیرد وبعدازتعیین سهم بار اجزاء مقاوم به تحلیل آنهااقدام می‌گردد. به موازات این کارباتهیه یک برنامه اولیه، مطالعات ژئوتکنیک انجام می‌شود. دراین ارتباط با استفاده ازگمانه‌زنی وتهیه نمونه ازاعماق مختلف وانجام آزمایشهای متنوع برروی آنهاویاانجام آزمایشهای صحرائی (نظیرآزمایش فشارسنجی، بارگذاری صفحه‌ای، برش نگارو...) مشخصات مکانیکی، تراکم پذیری وپارامترهای وزنی وحجمی لایه‌های مختلف خاک تعیین می‌گردد. سپس بااستفاده‌ازدومجموعه اطلاعات فوق الذکرنوع پی به صورت سطحی، نیمه عمیق ویاعمیق وازمصالح مختلف (چوب، مصالح بنائی، بتن مسلح ویافلزی) انتخاب وطراحی می‌شودودرنهایت باتوجه به حساسیت سازه، نشست پی نیزکنترل می‌گردد.

درموردسازه‌های معمولی درشرایطی که یاظرفیت باربری خاک ضعیف باشدویااحتمال بروز نشستهای متفاوت وجودداشته باشدکه حاصل هردوی آنهاتخریب اجزای پوشش است می‌توان ازپی‌های گسترده (رادیه ژنرال) بهره برد. این پی‌ها به صورت صفحه‌ای در زیر تمام ستونهای ساختمان یا بخشی از آن قرارمی‌گیرند. برحسب میزان بارهای وارده وتنش مجازخاک این صفحه باضخامت ثابت ویابه شکل صفحه باشبکه تیرهای تقویتی طرح می‌گردد. طرح صفحات برحسب مشخصات هندسی وویژگیهای خاک بافرض صلبیت یاانعطاف پذیری انجام می‌شود. استفاده ازروش پی صلب جهت طرح انواع پی‌ها به سال ۱۹۳۰ برمی‌گردد. ازآن زمان تاکنون این روش بدلیل سادگی درسطح وسیعی استفاده شده است. باعنایت به ضخامت محدود پی‌های گسترده (نسبت به ابعاددرپلان)، فرضیه تغییرشکل یکنواخت یاخطی برای این صفحات (فرض صلبیت) باتقریب قابل ملاحظه‌ای همراه است وگاهی حجم مصالح مصرفی رابه شدت افزایش می‌دهد. دراین ارتباط محققان مطالعات وسیعی برای ارائه روشهای دقیقتر که انطباق بیشتری نیزبارفتارمصالح داشته باشدانجام دادندکه درسال ۱۹۶۶ منجربه ارائهٔ روش تقریبی پی انعطاف پذیرشد. همچنین درسال ۱۹۵۹ روش تفاضلهای محدودبراساس مبانی تئوری صفحات (تیموشنکو) تدوین وعرضه گردید. باعنایت به محدودیتهاوتقریبهای

موجوددرروشهای فوق الذکر، مطالعات ادامه یافت ودرنهایت ازسال ۱۹۶۵ به تدریج روش اجزاء محدودمعرفی شدوجای خودرادرمحاسبات مهندسی بازنمود. کنفرانس اجزاء محدود دردانشگاه مک گیل کانادا در سال ۱۹۷۲ افقهای تازه‌ای رادرموردایـن روش گشـودوبعدازآن مقاله‌های متعددی درمجله‌های بین‌المللی روشهای عددی درمهندسی ومجله مهندسی مکانیک وجامدات درباره کاربردروش اجزاء محدوددرعلوم مهندسی انتشاریافت ([۱] و [۲]). درعمل، طراحی دستی پی‌های گسترده عمدتاً بافرض صلبیت انجام می‌گیرد که این موضوع نه تنهاباعث افزایش حجم مصالح مصرفی می‌شود بلکه بعضاً نتایج اشتباهی نیزبه‌همراه دارد. در مجموعهٔ تحقیقات انجام گرفته که نتایج آن دراین مقاله عرضه می‌گردد سعی شده‌است تاباآنالیزمدلهای مختلف بافرض صلبیت وانعطاف پذیری، مقایسه نتایج وبررسی میزان تقریبهای حاصله دیدگاه روشنی ازمحدوده استفاده ازروش پی صلب برای مهندسان ودانش پژوهان ترسیم گردد.

مدل مورد مطالعه

برای بررسی اثر پارامترهای مختلف، یک صفحه بتنی واقع بر خاک که بـار ۱۲ سـتونی را تحمل می‌کند به عنوان مدل درنظر گرفته (شکل ۱) و مشخصات هندسی و بارگذاری آن به شرح زیر تغییر داده‌می‌شود:

الف) فاصله ستونها

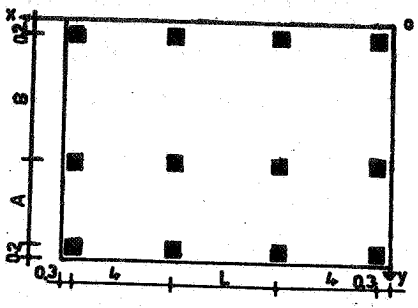
ب) مقادیر بارهای ستونها

ج) ضخامت صفحه

درشرایطی که اثرتغییرشکل صفحه منظورشود، مطالعات بافرض پیوستگی یـاناپیوستگی اجزای آن قابل انجام است. درحالت اول، محاسبه صفحه براساس رابطهٔ لاگرانژ بصورت :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{\partial^4 w}{\partial y^4} + 2\frac{\partial^4 w}{\partial x^2 \partial y^2} = \frac{q - kv}{D} \qquad (۱)$$

است که غالباً باتعیین شرایط بارگذاری ومشخصات تکیه‌گاهی روابط نیروهای درونـی قـابل استخراج است. درشرایطی که باتوجه به ضریب سختی صفحه و ضریب واکنش بستر سـطح تأثیربـار (دررابـطه بـاایجـادتغییرشکل درصـفحه) مـحدودفرض شـود، مـی‌توان بامحاسبه شعاع سختی مؤثر $\left(1 = \sqrt[4]{\frac{D}{ks}}\right)$ ، مقادیرنیروهای درونی رادرهرنقطه ازسطح



شکل ۱ـ مدل صفحه و ستونهای مورد مطالعه

تأثیربراحتی محاسبه نمود[۲]:

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

درحالت دوم محاسبات بابه‌کارگیری روشهای عددی نظیرروش تفاضلهای محدود و اجزاء محدود انجام می‌پذیرد. درروش تفاضلهای محدودبراساس معادله دیفرانسیل درجه چهارم فوق‌الذکر یک معادله ساده به شرح زیراستخراج می‌گردد تاتغییرشکل هرنقطه رانسبت به تغییرشکل دوازده نقطه اطراف آن بیان کند:

$$20W_0 - 8(W_T + W_B + W_L + W_R) + 2(W_{TL} + W_{TR} + W_{BL} + W_{BR}) \quad (۲)$$

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

براین اساس صفحهٔ پی به یک شبکه بابعد h تبدیل ومعادله فوق‌الذکربرای نقاط مختلف نوشته می‌شود. ازحل سیستم معادله‌های حاصله، مقدارتغییرشکل نقاط مختلف تعیین می‌شود[۱]. درروش اجزاء محدود ابتدا صفحه پی به یک شبکه المانهای مثلثی یامستطیلی تبدیل ومشخصات هندسی المانهاوموقعیت گره‌ها نسبت به یک مبدأ مشخص می‌گردد. سپس مجموعه بارهای بیرونی روی گره‌ها(P) تعریف می‌شوند. اگرنیروی درونی عضوهای شبکه باF، تغییرمکان گره‌ها

وتغییرشکل عضوهابه‌ترتیب با x و e نشان داده شوندروابط پایه‌ای روش اجزای محدودبه شرح زیرهستند:

$$P = AF \qquad e = A^T x$$
$$F = Se = SA^T x \qquad (۳)$$
$$P = ASA^T x \qquad x = (AŞA^T)^{-1} P$$

درتحلیل پی، خاک بستربه صورت فنرهای مجزاروی گره‌هامدل می‌شودوباتعیین درجه آزادی گره‌ها رابطه نیروتغییرمکان برای مجموعهٔ المانهانوشته می‌شودوسپس بامحاسبهٔ مقدارتغییرمکان گره‌های مختلف، مقادیرنیروهای درونی درنقاط مختلف صفحه تعیین می‌شود [۱].

در صورت صلبیت صفحه، بامحاسبهٔ مقداروموقعیت برایندنیروها، مقدارفشارخاک درنقاط مختلف صفحهٔ پی بدست می‌آید. سپس صفحهٔ پی به یک سری نوارهای طولی وعرضی تبدیل می‌شود وهرنواریاتوجه به نیروهای فوقانی وتحتانی وارده تحلیل می‌گردد. درنهایت باتعیین نیروهای درونی دربخشهای مختلف، کنترل پایداری خارجی وداخلی انجام پذیراست.

بدین ترتیب ضمن ثابت نگهداشتن ضریب واکنش بستروتنش مجازخاک، می‌توان اثر تغییرات عوامل فوق‌الذکرراکه درمحاسبات مهندسی بسیارمهم‌اندمطالعه نمود. باتوجه به پارامترهای متغیر، مدلهای مطالعاتی دربیش از ۱۰۰ حالت به روشهای اجزای محدود، پی صلب، تفاضلهای محدودوصفحه یکپارچه انعطاف پذیر بادست وبرنامه‌های کامپیوتری موردتحلیل قرارگرفته‌اند. نتایج حاصل ازروش اجزای محدودمبنای مقایسه درکلیهٔ حالتهاست. فاصله طولی ستونهادرمدل اول برابراست وسپس این فاصله به‌تدریج و تا دوبرابرتغییرداده شده است (جدول۱). همچنین دراولین مدل بارگذاری، مقادیربارستونهایکسان است وسپس اختلاف بارستونهاتا دو برابرمی‌رسد(جدول۲). درهمین ارتباط دریکی ازمدلهاضخامت صفحه به میزان حداقل موردنیاز(۵۰ سانتیمتر) درنظرگرفته شده وسپس این ضخامت به‌تدریج تا چهاربرابرمقدار اولیه افزایش داده شده است. لازم به تذکراست که درانتخاب ابعادوبارهای ستونها همواره سعی درانتخاب مقادیری درحدودمتعارف وبارعایت حدوداجرایی بوده‌است. نظربه اینکه کاربردعمدهٔ پی‌های گسترده برای خاکهای ضعیف وتراکم پذیراست لذامقدارضریب واکنش بستربرای یک خاک رسی نرم ($q_a \leq 200kPa$) یاماسه‌ای نرم ونیمه متراکم برابر $1500t/m^3$ انتخاب گردیده است. بدیهی است

مقادیرنیروهای درونی برای زمینهای مختلف، نتایج متفاوتی خواهندداشت.

جدول ۱ـ فواصل طولی ستونها در شالوده‌های انتخابی

تیپ شالوده	۱	۲	۳	۴	۵
L (m)	۴	۵	۶	۷	۸

جدول ۲ـ حالات بارگذاری ستونها

حالت بارگذاری	ستون گوشه	ستون کناری	ستون میانی
۱	۱۰۰٤	۱۰۰٤	۱۰۰٤
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 محدودمبنای مقایسه برای همهٔ حالتهاست، لذابررسی کلیهٔ مدلهاباستفاده ازبرنامه کامپیوتری مبتنی براین روش انجام شده ونتایج حاصله استخراج گردیده است. باتوجه به محدودیت امکانات برنامه، ازشرایط تقارن وتحلیل یک چهارم یایک دوم سطح برای به‌کارگیری تعدادگره‌هاوالمانهای بیشتراستفاده شده است. درتجزیه پی سعی براین شدکه درمقاطع بحرانی (زیرستونهاووسط دهانه‌ها) گره‌هایی پیش بینی ونیروهای درونی مستقیماً محاسبه شوند. باتوجه به فاصلهٔ متعارف ستونها نیازی به تغییرات قابل ملاحظه درابعادالمانهااحساس نشده است، لذاشبکه‌ای یکنواخت باحدود ۱۲۰ گره والمانهای دوبعدی ۰/۵×۰/۵ مترانتخاب گردید. البته بعدازتحلیل نمونه‌های اولیه ومشاهده عدم وجودتغییرات قابل ملاحظه درگره‌های مجاور، ابعادالمانهاافزایش یافت. بدین ترتیب باانتخاب ابعاد ۱×۰/۵ متربرای المانهاضمن سرعت بخشیدن به محاسبات، مقادیر نیروهای درونی در سایر مدلها نیز با دقت قابل ملاحظه‌ای محاسبه شد (دراین

حالت برای یک چهارم شالوده شبکه‌ای متشکل از ۷۰ گره و ۶۰ المان تشکیل ومطالعه گردید). برای تحلیل مدلهابه‌روش پی صلب، ابتدابامطالعه شرایط بارگذاری، مقدارومو‌قعیت براین‌دبارهاو سپس مقدارفشارایجادشده درخاک محاسبه شده است. همچنین هرصفحه درامتدادطولی به سه نوارو درامتدادعرضی به چهارنوارتقسیم شده به‌طوری که عرض هرنوارمعادل فاصله محوری دهانه‌های مجاوراست. درمرحله بعددرهرجهت یک نوارمیانی ویک نوارکناری موردمطالعه قرارگرفته وتغییرات لنگرخمشی درمقاطع مختلف آن محاسبه شده است. لازم به تذکراست که درروش پی صلب توزیع لنگردرجهت عرضی هرنواریکنواخت است، درحالی که درروش اجزای محدودبرای نقاط مختلف عرضی مقادیرمتفاوتی حاصل گردیده است که برای مقایسه بانتایج حاصل ازروش اول مقدارمتوسط آنهادرنظرگرفته می‌شود. برای تحلیل صفحه به روش تفاضلهای محدودکه مبنای آن مقایسه تغییرشکل هرنقطه نسبت به نقاط اطراف آن است نیز یک برنامه کامپیوتری خاص تهیه واستفاده شده است. بالاخره برای مطالعهٔ صفحه برروی تکیه‌گاه الاستیک (باروش پیوستگی)، اثربارمتمرکزدرایجادتغییرشکل برروی صفحه محدودفرض شده وسپس مقادیرنیروهای درونی حاصل ازهربارمتمرکزدرمحدودهٔ خاصی ازآن تعیین شده‌است. فرض فوق باتوجه به اینکه اثرهربارمتمرکز، بادورشدن ازنقطه اثرآن به سرعت تقلیل می‌یابد تقریب زیادی ایجادننموده ودرنهایت لازم است بااستفاده ازاصل جمع آثارقوامقادیرنیروهای درونی حاصل ازجمیع بارهارادرنقاط مختلف صفحه تعیین نمود.

باتحلیل ۷۶ موردآباکهای تهیه شده ازنتایج آنالیزمدلهاکه نمونهٔ آنها در صفحات بعد ارائه می‌گردد موارد زیر رابه‌عنوان یک چارچوب کلی برای استفاده ازروشهای مختلف آنالیزوطراحی پی‌هاوآگاهی ازتقریبهایی که درشرایط مختلف حاصل می‌شودمیتوان نتیجه گیری کرد.

مقایسه بین نتایج حاصل ازروشهای اجزای محدودوپی صلب

الف) لنگرخمشی درجهت عرضی

شکلهای ۲ و۳ اختلاف نتایج حاصل از دو روش اجزاء محدود و پی صلب رابه 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. باتوجه به این شکلها نتایج زیر به دست می‌آید:

شکلها نتایج زیر به دست می‌آید:

ـ درهرحالت ازبارگذاری موردمطالعه، اختلاف لنگر (حاصل ازدوروش) درنوارهای میانی کمترازنوارهای کناری است. همچنین اختلاف موجوددرمقاطع کناری در مقایسه با مقطع بالنگر ماکزیمم بیشتراست (شکلهای ۲ و ۳).

ـ باتشدید اختلاف طول دهانه‌های مجاورمقداراختلاف لنگرماکزیمم حاصل ازدوروش نیزفزونی می‌یابد(شکلهای ۲ و ۳). باتغییرسیستم بارهااین اختلاف برای مقاطع لنگرماکزیمم از۵ تا ۲۰ درصد، مقاطع کناری دهانه از۸ تا ۳۰ درصدودرزیرستونهای میانی از ۱۰ تا۶۵ درصدخواهد بود.

ـ باافزایش اختلاف بارستونهای مجاور، درصداختلاف بین لنگرهای حاصل ازدوروش به ترتیب زیرفزونی می‌یابد(شکل ۴). برای لنگرماکزیمم دهانه از۵ تا۲۵ درصد، درمقاطع کناری دهانه از۵ تا ۳۰ درصدوبرای لنگردرزیرستون میانی از ۱۰ تا ۷۰ درصد (درنوارکناری) واز۱۵ تا ۴۰ درصد (درنوارمیانی). این مقادیرمربوط به حداکثردامنهٔ تغییرات درشالوده‌های مختلف است.

ب) لنگرخمشی درجهت طولی

شکلهای ۴ و ۵ اختلاف نتایج حاصل از دو روش را به صورت تابعی از اختلاف طول دهانه‌ها برای نوارهای میانی وکناری تحت بارگذاریهای ۱ و ۵ نشان‌می‌دهد. شکل ۶ نیز اختلاف نتایج دو روش را به صورت تابعی از اختلاف بار ستونها نمایش می‌دهد. باتوجه به این شکلها نتایج زیر حاصل می‌شود:

ـ درحالتهای مختلف بارگذاری، اختلاف لنگرخمشی حاصل ازدوروش بیش از۴۰ درصدودرنوارهای میانی تا ۲۰۰ درصد(وحتی بیشتر) نیزمی‌رسد.

ـ باتشدید اختلاف طول دهانه‌های مجاور، برمیزان اختلاف لنگرهاافزوده وتقریب روش صلب بیشترمی‌شود (شکلهای ۵ و ۶). به علاوه، شدت تغییرات دردهانه‌های میانی نسبت به دهانه کناری مشهودتر است.

ـ در دهانه میانی، منحنیهای مربوط به لنگرماکزیمم ولنگردرمقاطع کناری درنوارمیانی به هم نزدیک می‌شوند، امادرنوارهای کناری فاصله بیشتری پیدامی‌کنند (شکل ۵). همچنین باافزایش فاصله ستونهامیزان اختلاف بین این دومنحنی نیزفزونی می‌یابد (شکل ۷).

ـ درموردلنگر زیر ستون میانی برای حالتی که اختلاف دهانه هاافزایش داده شود، منحنیهای اختلاف لنگرحاصل ازدوروش به سمت یک مجانب میل می‌کند(شکلهای ۵ و ۶).

ج) اثرافزایش ضخامت

به‌منظور روشن‌شدن علت وجود اختلافهای قابل ملاحظه درمقادیرنیروهای درونی حاصل ازدوروش اجزای محدودوپی صلب، یک نمونه ازشالوده‌هاانتخاب وتحت دوحالت بارگذاری مختلف سعی شدتاباافزایش ضخامت آن نسبت به ضخامت محاسباتی اولیه مقادیرلنگرهای خمشی باهم مقایسه شوند. شکلهای ۸ و ۹ نتایج این مقایسه را برای لنگرهای جهتهای عرضی و طولی تحت بارگذاری ۵ نشان‌می‌دهند. درمنحنی نمونهٔ شماره ۹ باافزایش ضخامت شالوده، ازشدت اختلاف لنگرهای خمشی طولی (M_y) به سرعت کاسته می‌شود ودرضخامت چهاربرابر، این اختلافات به کمتراز۱۵ درصد (وگاهی کمتراز۱۰ درصد) می‌رسد. شدت کاهش اختلاف لنگرهادردهانهٔ میانی وزیرستون میانی کمترازدهانهٔ کناری است. بدین ترتیب به‌نظرمی‌رسد درصورت افزایش ضخامت شالوده ودرنتیجه نزدیک شدن فرضیات دوروش (تأمین صلبیت)، اختلاف نیروهای حاصله به شدت کاهش یابدولذانتایج روش پی صلب جهت منطقی وقابل قبولی بیابد.

مقایسهٔ نتایج حاصل ازروشهای اجزاء محدودوپی انعطاف پذیر:

دراین حالت نیزپنج مدل شالوده تحت پنج حالت بارگذاری مختلف مطالعه شده‌اند، لازم به تأکیداست که برخلاف شرایط قبلی دراین حالت مبنای هردوروش براساس تغییرشکل پذیری شالوده (ونه صلبیت آن) است. به طورکلی باتوجه به فرض پیوستگی، مقادیرنیروهای حاصل ازروش پی انعطاف پذیرکمترازروش اجزای محدوداست (شکلهای ۱۰ و ۱۱). ازطرف دیگربرای هرحالت بارگذاری، باافزایش اختلاف طول دهانه‌های مجاور، اختلاف لنگرهای مقطع وسط صفحه نیزفزونی می‌یابد، امابرای مقطع وسط دهانه کناری کاهش می‌یابد. مقدارمتوسط اختلاف لنگرهادرجهت عرضی (M_x) بیش از۴۵ درصداست. درموردلنگرجهت طولی (M_y) باافزایش اختلاف طول دهانه هابرمیزان اختلاف لنگردروسط دهانهٔ کناری افزوده می‌شود. درموردمقطع وسط صفحه نیزدرصورتی که اختلاف بارستونهابیش از۱۵ درصدباشدشرایط مشابهی وجود دارد.

مقایسه نتایج حاصل از روشهای اجزاء محدودوتفاضلهای محدود:

دراین موردنیزشالوده‌هاباتوجه به برنامهٔ کامپیوتری تدوین شده به روشهای اجزای محدود وتفاضلهای محدودآنالیزشده که هردوبراساس تغییرشکل پذیری صفحه‌اندوموارد‌زیررابامقایسه

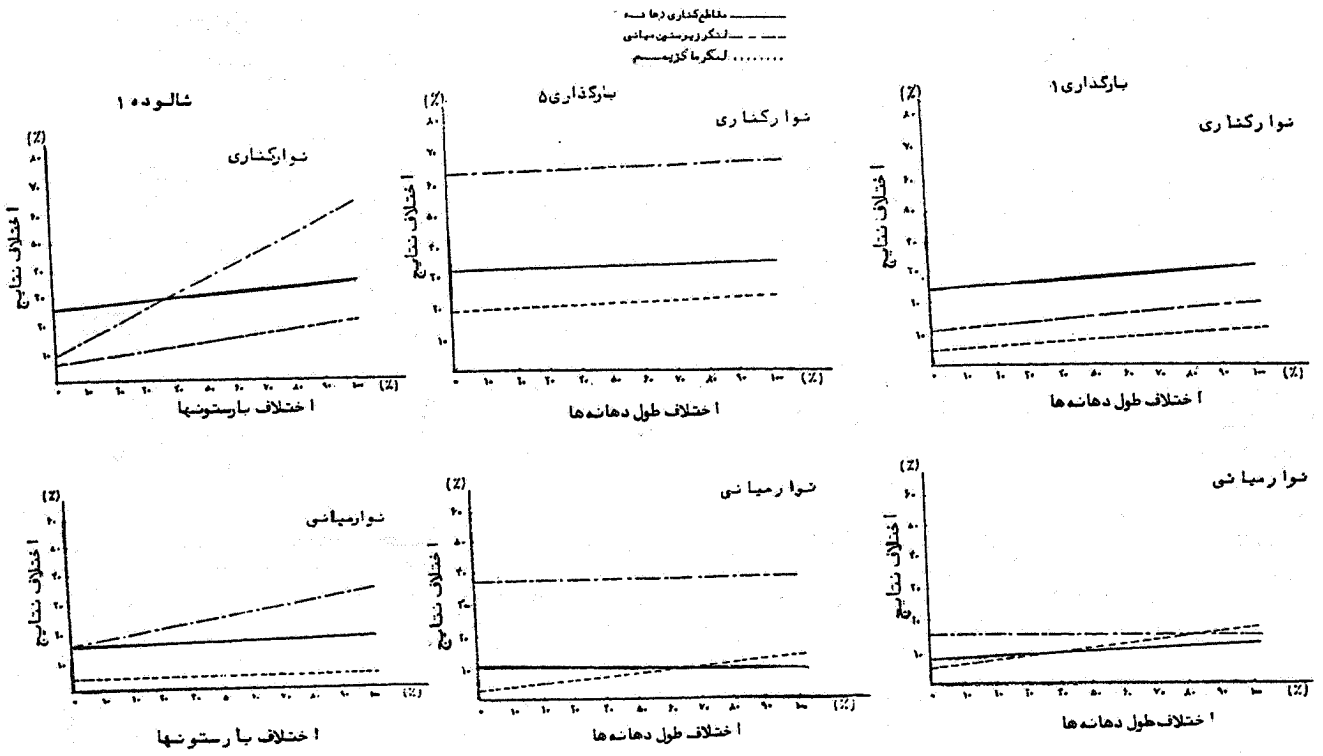
نتایج حاصله می‌توان موردتأکیدقرارداد(شکل ۱۲).

ـ با افزایش اختلاف بار ستونها اختلاف لنگرهای خمشی طولی (M_x) فزونی می‌یابد، این اختلاف درمقطع زیرستون بیش ازوسط دودهانه کناری ومیانی است.

ـ باافزایش اختلاف بارستونها، مقادیرلنگرهای خمشی طولی (M_y) درمقطع میانی صفحه ثابت است، امادرمقاطع زیرستون میانی ووسط دهانه کناری اختلاف کمتری خواهدداشت.

نتیجه‌گیری

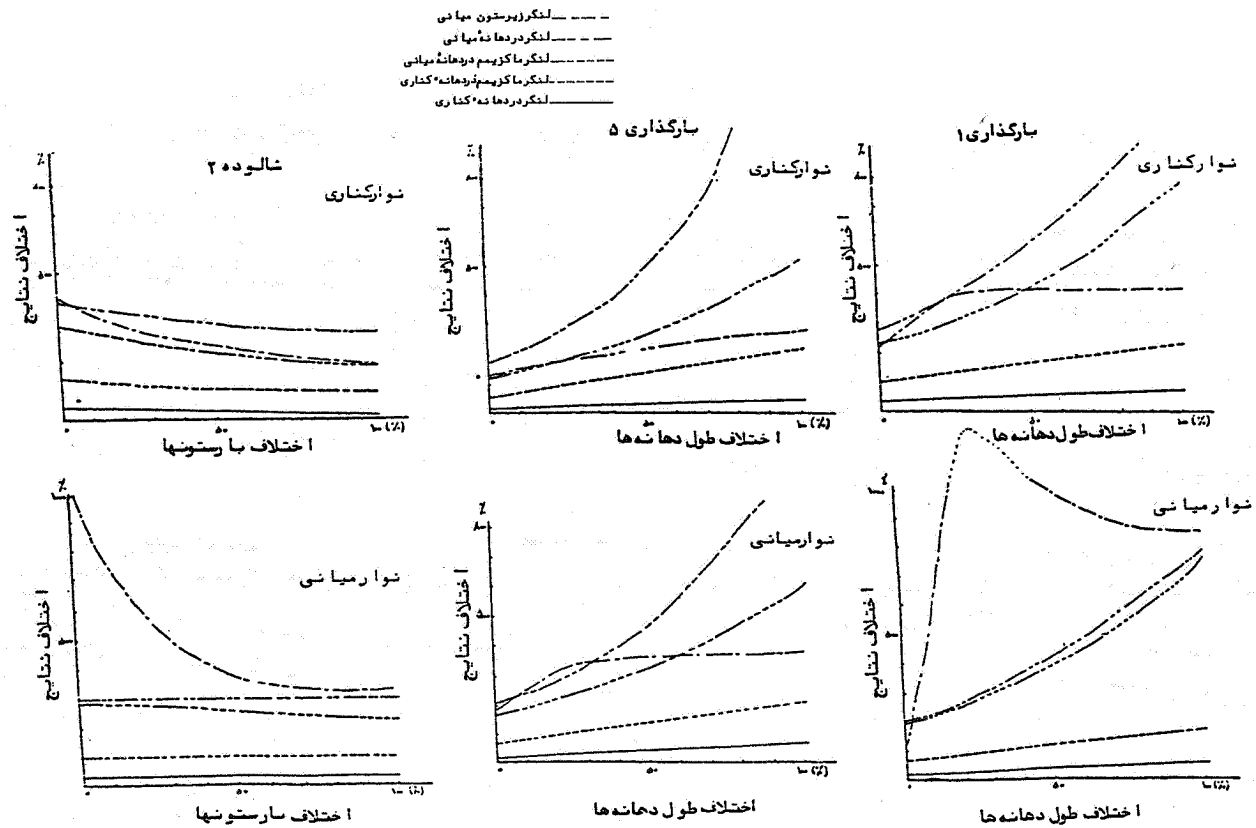
درحالت کلی باتوجه به حجم قابل ملاحظه مطالعات انجام گرفته، می‌توان نتیجه گرفت که روش پی صلب تنهادرشرایط خاص صفحات باضخامت مهم قابل قبول بوده واستفاده غیرمعقول ازآن درطراحی پی سازه‌ها غالباً غیراقتصادی وگاهی خطرناک نیز هست. برعکس درصورت انتخاب مبانی وفرضیات مناسب، استفاده ازروشهای عددی نتایج رضایت بخش ومساعدی رانتیجه‌می‌دهد.



شکل ۲ـ مقایسهٔ M_x حاصل
از روش اجزای محدود و پی‌صلب

شکل ۳ـ مقایسهٔ M_x حاصل
از روش اجزای محدود و پی‌صلب

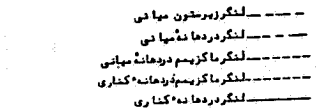
شکل ۴ـ مقایسهٔ M_x حاصل
از روش اجزای محدود و پی‌صلب

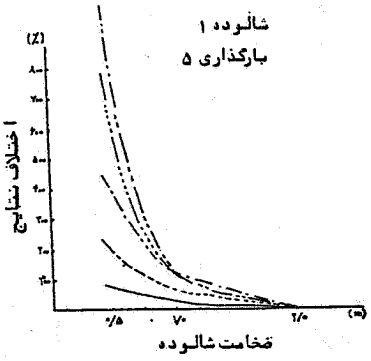


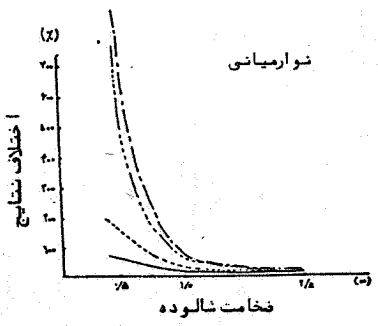
شکل ۵ـ مقایسهٔ M_y حاصل
از روش اجزای محدود و پی صلب

شکل ۶ـ مقایسهٔ M_y حاصل
از روش اجزای محدود و پی صلب

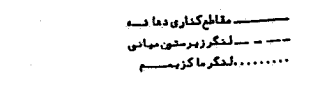
شکل ۷ـ مقایسهٔ M_y حاصل
از روش اجزای محدود و پی صلب

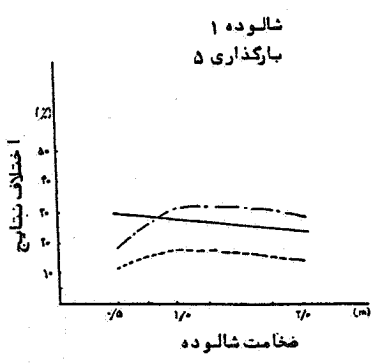


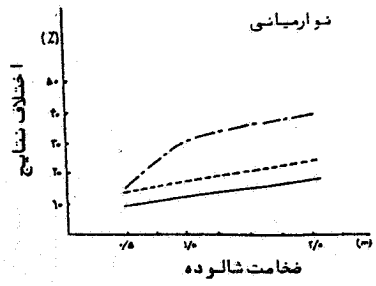




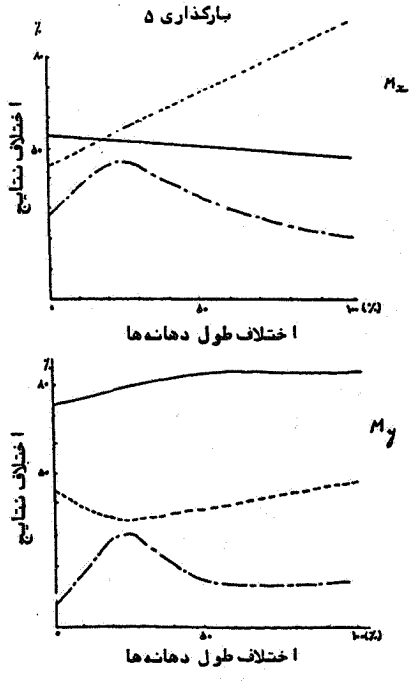
شکل ۹ـ اثر افزایش ضخامت شالوده بر M_y



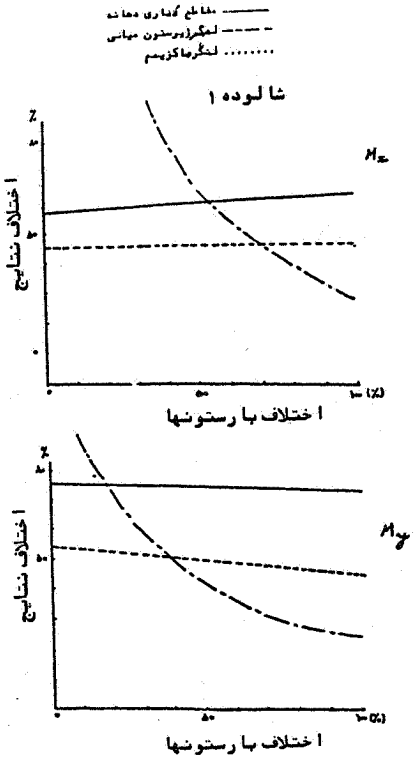




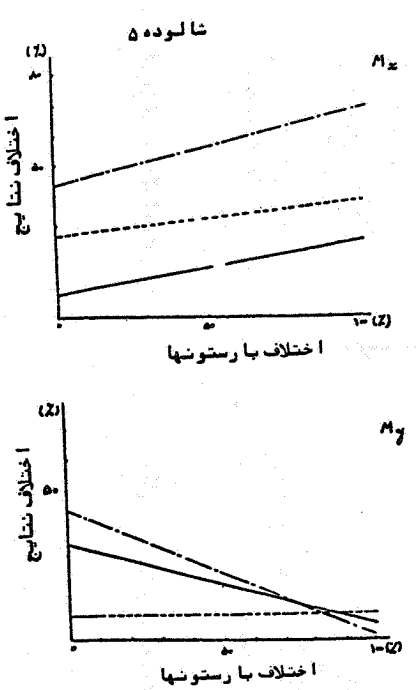
شکل ۸ـ اثر افزایش ضخامت شالوده بر M_x



شکل ۱۰ـ مقایسهٔ نتایج حاصل
از روش اجزای محدود و پی انعطاف‌پذیر



شکل ۱۱ـ مقایسهٔ نتایج حاصل
از روش اجزای محدود و پی انعطاف‌پذیر



شکل ۱۲ـ مقایسهٔ نتایج حاصل
از روش اجزای محدود و تفاوتهای 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.