روش پاره‌سازه‌ها برای تحلیل قاب‌های بزرگ مقیاس با استفاده ازروش نیروها

پروفسور علی کاوه
استاد دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

مسعود پوربابا
عضو هیئت علمی دانشگاه آزاد اسلامی، واحد مراغه

چکیده

در این مقاله با بکارگیری مفاهیمی از تئوری گراف ها، تحلیل سازه ها بروش نیروهاو پاره سازه ها، روش هایی برای تحلیل بهینه سازه ها و نیز تحلیل قاب های بزرگ مقیاس با استفاده از پاره سازه ها ارائه شده است.در مورد تحلیل بهینه سازه ها، قاب های صلب دوبعدی با استفاده از تئوری گراف ها، به روش نیروها بوسیله یک نرم افزار محاسباتی بنام FORCE که در زبان Fortran Power Station تهیه گردیده است،تحلیل بهینه شده اند. بهینگی تحلیل با استفاده از تئوری گراف ها و دستگاه های خودمتعادل یا سیکل ها درمدل گراف سازه برمبنای تعداد کمینه اعضای غیرصفر ماتریس های اطلاعاتی و ساختار منظم آنها انجام گرفته است.در مورد تحلیل سازه ها به روش پاره سازه ها، قاب های صلب دو بعدی بزرگ مقیاس با استفاده از تئوری گراف ها و مفاهیم پاره سازه ها به روش نیروها بوسیله یک نرم افزار محاسباتی دیگر بنام SUBFRAME که در زبان Fortran Power Station تهیه گردیده است، تحلیل شده اند.

واژه های کلیدی :

تحلیل سازه ها بروش نیروها و پاره سازه، تحلیل بهینه، قاب های بزرگ مقیاس، تئوری گراف

مقدمه

روش نیرو کلی‌ترین روش برای تحلیل سازه‌ها محسوب می‌شود و با استفاده از این روش، می‌توان هر سازه‌ای اعم از تیرهای سراسری، قاب‌ها، خرپاها و سازه‌های مرکب را برای هر عاملی مانند نیروهای خارجی، تغییرات درجهٔ حرارت، نشست تکیه‌گاه‌ها و یا برای هر عامل دیگری تحلیل نمود. هنگامی که تعداد اعضای مدل سازه ای زیاد بوده و درجه نامعینی استاتیکی آنها نسبتاً کوچک باشند، روش نیروها نسبت بروش تغییرمکان برتری قابل توجهی دارد. علت عمده این برتری، حجم کوچک مسئله تحلیل عددی دستگاه معادلات خطی حاصل می باشد.

پنج روش در تحلیل سازه ها با این روش فرمول بندی مطرح شده که عبارتند از : روش های توپولوژیکی،روش های ترکیباتی، روش های جبری، روش های مختلط جبری و ترکیباتی و روش مجتمع نیروهااز بین انواع روش های فوق از روش های ترکیباتی (روش گسترشی) که برای برنامه نویسی رایانه ای و تهیه مدول های محاسباتی مناسب بوده، استفاده شده است.[۲,۳]

قاب های صلب دوبعدی با استفاده از تئوری گراف ها، به روش نیروها بوسیله یک نرم افزار محاسباتی تحلیل بهینه شده اند. بهینگی تحلیل با استفاده از تئوری گراف ها و دستگاه های خودمتعادل یا سیکل در مدل گراف سازه بر مبنای تعداد کمینه اعضای غیرصفر ماتریس های اطلاعاتی و ساختار منظم آنها انجام گرفته است.

روش پاره سازه ها نیز که در این مقاله استفاده شده است، به دلایل مختلفی برای مهندسان جذاب و جالب توجه می باشد. در مراحل اولیه توسعه این روش محدودیت در ذخیره سازی اطلاعات در حافظه رایانه ها برای تحلیل مسائل بزرگ علت عمده گرایش به سمت این روش ها بود. ولی اخیراً ارتباط نزدیک این روش ها و زمینه تخصصی نوین پردازش موازی و امکان کاربرد آنها در ایجاد برنامه های محاسباتی جدید برای تحلیل مسائل بزرگ انگیزه توجه پژوهشگران را به این روش ها معطوف نموده است. همچنین دیگر جنبهٔ تحقیقاتی و کاربردی این روش را می توان در بهینه یابی توپولوژیکی سازه ها مشاهده نمود که این روش به عنوان یک روش مهم و توانا در آن شناخته شده است. [۱۴,۱۵]

در این مقاله، روش ترکیباتی نیروها بمنظور تحلیل بهینه سازه ها و استفاده از پاره سازه ها برای تحلیل سازه های بزرگ مقیاس (قاب های صلب دوبعدی بزرگ مقیاس)، بکار گرفته شده اند.در این روش پایه استاتیکی برای مدل های سازه ای بر مبنای مفاهیم ترکیباتی از پایه سیکلی مدل ریاضی استخراج شده اند.

دراین روش از پایه استاتیکی کمینه و نزدیک به کمینه در فرمول بندی ماتریسی برای نرم افزارهای محاسباتی استفاده شده است. تحلیل بهینه قاب های صلب دو بعدی با استفاده از تئوری گراف ها، به روش نیروها بوسیله یک نرم افزار محاسباتی نشان داده شده است. و نیز تحلیل قاب های صلب دو بعدی بزرگ مقیاس توسط روش پاره سازه ها با ارائهٔ یک برنامه محاسباتی دیگر نشان داده شده است. [۴,۵,۶,۷,۸]

تعاریف و مفاهیمی از تئوری گراف

مدل ریاضی یک سازه G را می توان یک سه تائی مرتب $(M(G),N(G),\Psi(G))$ نشان داد که در آن مجموعه ناتهی $N(G)$ تحت عنوان رئوس یا گره ها و مجموعه $M(G)$ تحت عنوان شاخه ها هستند. $\Psi(G)$ نیز یک رابطه تلاقی برگشت پذیر متقارن بر روی $N(G)$ می باشد که هر شاخه از $M(G)$ یک جفت نامرتب از رئوس $N(G)$ را نظیر می کند.

تعداد رئوس G، مرتبه آن را مشخص ساخته و تعداد شاخه های آن نیز G نامیده می شود.

گراف g را زیرگراف G گویند، هرگاه کلیه گره های g در G نامیده می شود. و هر عضو از g دارای همان گره های انتهایی مشابه موجود در G باشد. بنابراین بطور کلی گراف g یک زیرگراف از G خواهد بود اگر :

$$N(G) \subseteq N(G), M(G) \subseteq M(G) \qquad (1)$$

اگر فرض کنیم V,U رئوس یک گراف G باشند، پیمایش یا گام U-V در G بنابه تعریف دنباله متناوبی از رئوس و شاخه های G است که با U آغاز شده و در V پایان می پذیرد. رشته U-V در یک گراف پیمایش U-V ای است که شامل شاخه تکراری نباشد. مسیر U-V نیز یک پیمایش U-V ای در گراف است که شامل رأس تکراری نباشد. دو رأس V,U در یک گراف G همبند خوانده می شوند، هرگاه U=V باشد ویا اگر $U \neq V$ باشد، آنگاه حداقل یک مسیر U-V در G موجود باشد. گراف هنگامی همبند خواهد بود که هر دو رأس آن همبند باشند. در غیراینصورت G را ناهمبند نامند. یک رشته U-V که در آن U=V بوده و حداقل سه شاخه را متضمن شود، یک مدار نامیده می شود.هررشته بسته ای در داخل گراف یک سیکل نامیده می شود.

درخت یک گراف همبند فاقد سیکل است. در این مقاله، منظور از درخت گراف ساده ای است که اولاً دارای شاخه باشد و ثانیاً فاقد حلقه، سیکل یا شاخه های موازی باشد. در گراف همبند G فاصله دو گره uj , ui که بصورت d(uj,ui) نشان داده شده، برابر طول حداقل مسیر بین آن دو گره است.

مجموعه بیشینه سیکل های مستقل گراف G یک پایه سیکل نامیده می شود. بعد این پایه سیکل برابر با عدد نخست بتی یا $b_1(G) = m - n + b_0(G)$ می باشد که در آن $b_0(G)$ برابر تعداد مؤلفه های گراف Gاست. طول پایه سیکل های مزبور طبق رابطه زیر برابر با مجموع تعداد شاخه های سیکل های آن تعریف می شود:

(۲)
$$L(C) = \sum_{i=1}^{b_1(G)} L(c_i)$$

پایهٔ سیکل C که در آن مجموع طول سیکل هایش کمینه باشد، تحت عنوان یک پایه سیکل کمینه گراف G شناخته می گردد.
روابط اساسی روش نیروها در روش نیروها، ابتدابا گزینش مجموعه ای مناسب از مؤلفه های اضافی نیرو و حذف آنها، مدل سازه S ، از لحاظ استاتیکی معین می شود. مدل ریاضی حاصل از حذف مؤلفه های نیرویی اضافی تحت عنوان سازهٔ مبنا Sp شناخته می گردد. مجموعه نیروهای داخلی در سازه را به صورت زیر می توان تعریف نمود:

(۳)
$$r = \{r_1, r_2, \ldots, r_{cm}\}$$

که در آن am تعداد نیروهای مجهول داخلی است، (a یک ضریب ثابت برای نوع سازه وm تعداد اعضای مدل سازه هستند).
نیروهای داخلی فوق را می توان حاصل دو دسته پاسخ نیرویی مجزا دانست :

۱– نیروهای درختی ویژه که عبارتنداز مجموعه نیروهای داخلی حاصل از تأثیر نیروهای خارجی بر روی گره ها و اعضای سازه. این مجموعه نیروها با ملاحظه روابط تعادل براحتی در اعضای مدل ریاضی سازه محاسبه می گردند.

۲– نیروهای سیکلی مکمل که عبارتنداز مجموعهٔ نیروهای داخلی حاصل از تأثیر کنش های دو تایی داخلی در محل حذف مؤلفه های نیرویی اضافی. این مجموعهٔ نیروها نیز با ملاحظه روابط تعادل براحتی در اعضای مدل ریاضی محاسبه می گردند. بارهای خارجی مؤثر بر مدل ریاضی سازه S در طول درجات آزادی فعال بصورت زیر تعریف می گردند.

(٤)
$$p = \{p_1, p_2, \ldots, p_n\}$$

این مجموعه نیروها با مجموعه عکس العمل های تکیه گاهی در طول درجات آزادی غیرفعال سازه یک دستگاه خودمتعادل ایستا را بوجود می آورند. اگر مجموعهٔ نیروهای مجهول اضافی در سازه بصورت زیر تعریف شود:

$$q = \{q_1, q_2, \ldots, q_{\gamma(s)}\}$$
(۵)

توزیع نیروهای داخلی سازه را می توان از رابطه اساسی و بنیادین روش نیروها بصورت زیر حاصل آورد:

(۶)
$$r = B_0 p + B_1 q$$

ابعاد ماتریس های تعادل B۰ وB۱ به ترتیب برابر am×na وam×γ(s) می باشد که na وγ(s) به ترتیب تعداد درجات آزادی فعال و درجه نامعینی استاتیکی سازه می باشند.

ماتریس B۰ در روابط فوق با تأثیر مؤلفه های بار خارجی واحد در طول درجات آزادی فعال توسط روابط تعادل حاصل آمده و ماتریس B۱ نیز با تأثیر کنش های دوتایی در محل حذف مجهولات اضافی، توسط روابط تعادل نتیجه می شود. در برخی از روش های نیرورابطه(۶)توسط تشکیل معادلات تعادل نیروهای داخلی در مجاورت گره ها و در طول درجات آزادی فعال مدل سازه محاسبه می شوند. پس از بررسی معادلات اساسی تعادل، معادلات سازگاری سازه استخراج می شوند. با استفاده از رابطهٔ نیرو- جابجایی برای هر عضووگردآوری آنها در یک ماتریس قطری بنام ماتریس نرمی سوار نشده Fm می توان نوشت :

(۷)
$$U = F_m r$$

$$U = F_m B_0 p + F_m B_1 q \qquad (۸)$$

که در آن

(۹)
$$U = \{u_1, u_2, u_3, \ldots, u_{cm}\}$$

که در فرم ماتریسی بصورت زیر در می آید :

(۱۰)
$$[U] = [F_m]\,[B_0 \;\; B_1]\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$

تغییرشکل های نسبی اعضای سازه درطول مؤلفه های نیروهای داخلی خودهستند. با استفاده از قضیه کار مجازی می توان نشان داد که میزان جابجایی های گرهی با رابطه زیر به تغییر شکل های نسبی عضوی مرتبط است:

(۱۱)
$$V = B_0^t U_p + B_1 U_q$$

که در آن t ترانهاده ماتریس، Up و Uq به ترتیب نماینده زیر مجموعه ای از تغییرشکل های نسبی عضوی مربوط به نیروهای خارجی و نیروهای مجهول اضافی بوده و V بردار جابجایی در طول درجات آزادی و محل حذف مجهولات اضافی می باشد. با تلفیق دو رابطه (۸) و (۱۱) و تفکیک مؤلفه ها در بردار V داریم :

(۱ ۲)
$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_0^t \\ B_1^t \end{bmatrix}[F_m]\,[B_0 \;\; B_1]\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$

(۱ ۳)
$$\begin{bmatrix} V_0 \\ V_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_0^t F_m B_0 & B_0^t F_m B_1 \\ B_1^t F_m B_0 & B_1^t F_m B_1 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} p \\ q \end{bmatrix}$$

تعریف می کنیم:

(۱۴)
$$D_{00} = B_0^t F_m B_0 \;,\quad D_{01} = B_0^t F_m B_1$$
$$D_{10} = B_1^t F_m B_0 \;,\quad D_{11} = B_1^t F_m B_1$$

با توجه به تعاریف فوق داریم :

(۱۵)

$$V_{0} = D_{00}.p + D_{01}q$$

و

$$V_{c} = D_{10}.p + D_{11}q$$

(۱۶)

معادلات سازگاری بصورت زیر بدست می آیند:

(۱۷)

$$V_{c} = 0$$

که معادله فوق از عدم وجود تغییرمکان یا تغییرشکل در محل حذف مجهولات اضافی (داخلی یا خارجی) سازه حاصل می شود. با استفاده از رابطه (۱۶) و (۱۷) بدست می آید:

(۱۸)

$$q = -D_{11}^{-1}D_{10}.p$$

با قرار دادن معادله (۱۸) در معادله(۶) نیروهای داخلی بصورت زیر بدست می آیند:

(۱۹)

$$r = \left[B_{0} - B_{1}D_{11}^{-1}D_{10}\right]P$$

و با قرار دادن معادله(۱۸) در معادله(۱۵) جابجایی های گرهی در طول درجات آزادی فعال بصورت زیر بدست می آیند:

(۲۰)

$$V_{0} = \left[D_{00} - D_{01}D_{01}D_{11}^{-1}D_{10}\right]p$$

ماتریسی که در رابطه های فوق معکوس گردیده D۱۱، ضریب دستگاه معادلات سازگاری می باشد. این ماتریس مربعی با بعدی برابر با پایهٔ استاتیکی سازه بصورت زیر تعریف می گردد:

(۲۱)

$$D_{11} = B_{1}^{t}F_{m}B_{1}$$

ماتریس D۱۱، ماتریس نرمی سوارشده، یا بطور خلاصه ماتریس نرمی سازه نامیده می شود. ساختار این ماتریس رابطه بسیار نزدیکی با ساختار عناصر غیرصفر ماتریس Fm و B۱ خواهد داشت. انتخاب مناسب دستگاه نیروهای داخلی مستقل در هر عضو و گزینش مناسب دستگاه های خودمتعادل مستقل در کل سازه در نهایت بر ساختار آن ماتریس و نحوه پراکندگی عناصر غیرصفر و صفر در آن تأثیر مهمی خواهد گذاشت.

برای محاسبه این روابط اساسی در روش نیروها می توان از مدل ریاضی سازه که تحت عنوان گراف شناخته شده، استفاده می گردد. با کمک این مدل و مفاهیم نظیر در نظریه گراف ها بطور خودکار پایه استاتیکی و نیروهای مجهول اضافی حاصل می آیند. با تشکیل بهینه این ساختارها در مدل سازه و ترتیب شماره گذاری عناصر موجود در آن می توان آرایش مناسبی از اعداد صفر و غیرصفر در ضرایب معادلات و ماتریس نرمی نتیجه گرفت.

اهمیت پاره یابی و ملاک‌های بهینگی پارش[۹]

یکی از مراحل اساسی تحلیل سازه‌ها به روش پاره‌سازها، مرحله اول آن یعنی افراز سازه یا دامنه به زیر سازه‌ها یا زیر دامنه‌ها به تعداد پردازشگرها است. مرحله اول که انجام آن مستلزم استفاده از مفاهیم تئوری گراف‌هاست، از اهمیت خاصی برخوردار است. در حقیقت کیفیت افراز دامنه در مرحله اول بر بهینگی محاسبات مراحل بعدی تأثیر می‌گذارد.[۱]

مهم ترین شرایط افراز بهینه عبارتند از :

الف) دامنه های افراز شده باید حدالامکان از نظر تعداد المان، تعداد گره و درجه آزادی(درجه نامعینی) با همدیگر متعادل باشند. این حالت باعث می شود که پردازشگرها با حداکثر همزمانی کار کنند،(در تحلیل موازی).

ب) تعداد گره های مرزی مشترک بین دامنه ها حداقل باشد. این شرایط باعث می شود اندازه مسئلهٔ مرزی (معادلات گره های مرزی) کاهش یافته و در نتیجه تبادل اطلاعات بین پردازنده ها حداقل شود.

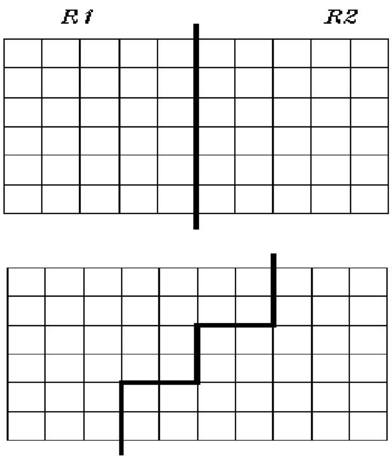
ج) دامنه های افراز شده باید دارای نسبت شکل خوب باشند. نسبت شکل یک شاخص هندسی است که تقریباً نمایانگر گستردگی هندسی شکل است و بصورت زیر تعریف می شود.

(۲۲)

$$A.R = \frac{H_{max}}{H_{min}}$$

که در آنH_{max}و درازاH_{min} و پهنای (حالت دوبعدی) تقریبی شکل می باشند.

مطلوب آن است که نسبت شکل حدالامکان کوچک و نزدیک به واحد باشد. بعنوان مثال در شکل(۱) یک دامنه المان محدود مستطیلی به دو گونه به دو ناحیه افراز شده است. که در هر دو تعادل المان بین زیردامنه ها برقرار است. در دامنه طرف چپ تعداد گره مرزی ۷ و در طرف راست ۱۱ می باشد. افراز سمت چپ شرایط بهینگی افراز را داراست.



شکل (۱) افراز یک دامنه المان محدود به دو گونه مختلف

روش جبری تنصیف طیفی

در این روش از خواص طیفی گرافها استفاده شده و با حل مسئله مقدار ویژه ماتریسی موسوم به لاپلاسین گراف افراز انجام می‌گیرد. لاپلاسین گراف یک ماتریس n×n است که بصورت زیر تعریف می‌شود:

$$L = D - A \qquad (۲۳)$$

در این رابطه ماتریس D یک ماتریس قطری است که اعضای آن درجه هر گره گراف است. درجه هر گره تعداد لبه های (اعضای) متصل به گره می باشد. A یک ماتریس متقارن متشکل از (۰,۱) است که ماتریس مجاورت گرهی نامیده می‌شود: $A_{ij} = \begin{cases} 0 \\ 1 \end{cases}$

اگر دو گره j,i متصل باشند

اگر دو گره j,i متصل نباشند

گام‌های اصلی روش تنصیف طیفی برگشتی RSB بشکل زیر است:

الف) تبدیل شبکه المان محدود به گراف مزدوج یا وابسته و تشکیل لاپلاسین گراف مزدوج.

ب) یافتن مقدار ویژه و بردار ویژه دوم گراف

ج) مرتب کردن صعودی مؤلفه های بردار ویژه دوم لاپلاسین. نصفی از المان ها که مربوط به مؤلفه های کوچکتر به یک زیردامنه و نصفی که شامل مؤلفه‌های بزرگترند به زیردامنهٔ دوم

با انجام این سه گام، گراف نصف می‌شود. حال اگر روی هر نصفه این روش تکرار شود، (N_P=۴) چهار زیردامنه افراز خواهد شد. با تکرار این الگوریتم بصورت برگشتی $N_P=2^{NR}$ زیردامنه بدست خواهدآمدو NR تعداد تکرار است.

فرمول بندی روش ترکیباتی نیروها برای پاره یابی سازه ها[۱۲,۱۳]

برای یک سازه نامعین، فرمول بندی روش ترکیباتی نیروها در بخش قبلی برای سازه‌های اسکلتی ارائه شد. حال فرض می کنیم یک سازه نامعین، با مدل سازه ای S برای تحلیل به q پاره سازه ($S_1,S_2,\ldots,S_q$) افراز شده است. در پاره یابی و پاره بندی دستگاه سازه‌ای در محل مرز بین پاره‌سازه‌های مختلف، تکیه‌گاه هر پاره‌سازه به صورت معین استاتیکی ملاحظه می شود. در صورتی که تعدادگره های مرزی بیش از واحد باشد، به جز یکی از گره‌های مرزی(به طور اختیاری)اعضای سازه در مجاورت بقیه گره ها بریده می شوند. در صورتی که برای یک پاره‌سازه S_i مشخص، نیروهای خارجی p_i و مجهولات اضافی q_i باشند، رابطه (۲۰) را می توان برای آن بصورت زیر نوشت:

$$v_{oi} = (D_{00} - D_{01}D_{11}^{-1}D_{10})_i\, p_i \qquad (۲۴)$$

دیگر روابط مربوط به هر پاره سازه را براحتی می توان با ملاحظه اختصاصی هر یک از روابط (۶) تا (۲۰) به دست آورد.

برای هر پاره‌سازه S_i، نیروهای p_{es} بصورت زیر محاسبه می‌شود:

$$p_{es} = \begin{bmatrix} a_e & b_e \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_e \\ q_c \end{bmatrix} \qquad (۲۵)$$

که در آن p_e وq_c بترتیب نیروهای خارجی و نیروهای مجهول پیوندی هستند. در یک پاره سازه مشخص سه نوع نیروی مختلف وجود خواهد داشت:

p_{ei} نیروهای خارجی پاره‌سازه‌ها هستند.

p_{eb} نیروهای اتصال معین استاتیکی هستند.

p_{ec} نیروهای مجهول پیوندی هستند.

برای کل سازه، ماتریس‌های A و B بصورت زیر تعریف می‌شوند:

$$A^t = [\, a_{e1}, a_{e2}, \ldots, a_{eq} \,] \qquad (۲۶)$$

$$B^t = [\, b_{e1}, b_{e2}, \ldots, b_{eq} \,] \qquad (۲۷)$$

وارتباط نیروهای p_e و q_c با p_s بصورت زیر است:

$$p_s = \begin{bmatrix} p_{s1} \\ p_{s2} \\ M \\ p_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_e \\ q_c \end{bmatrix} \qquad (۲۸)$$

نیروهای p_s را می‌توان به نیروهای p_{ei} وp_{eb} و p_{ec} تفکیک کرد:

$$\begin{bmatrix} p_{ei} \\ p_{eb} \\ p_{ec} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{ei} & 0 \\ a_{eb} & b_{eb} \\ a_{ec} & b_{ec} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} p_e \\ q_c \end{bmatrix} \qquad (۲۹)$$

ماتریس نرمی کل سازه نظیر p و q با کمک روابط (۲۴) تا (۲۸) بدست می‌آید:

$$\begin{bmatrix} f_{ee} & f_{ec} \\ f_{ce} & f_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A^t \\ B^t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} F_1 & & & \\ & F_2 & & \\ & & \cdots & \\ & & & F_q \end{bmatrix} \qquad (۳۰)$$

$$\begin{bmatrix} v_e \\ v_o \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_{ee} & f_{ec} \\ f_{ce} & f_{cc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p_e \\ q_c \end{bmatrix} \qquad (۳۱)$$

با اعمال شرایط پیوستگی در محل بریدگی های پیوندی پاره سازه ها (v_c=۰) خواهیم داشت:

$$q_c = -f_{cc}^{-1} f_{ce}\, p_e \qquad (۳۲)$$

و با استفاده از این رابطه مقدار نیروهای داخلی و جابجایی‌های هر پاره سازه S_i به صورت زیر حاصل می‌شوند:

$$r_i = (B_0 - B_1 f_{cc}^{-1} f_{ce})\, p_{si} \qquad (۳۳)$$

$$v_{ei} = (f_{ee} - f_{ec} f_{cc}^{-1} f_{ce})\, p_{si} \qquad (۳۴)$$

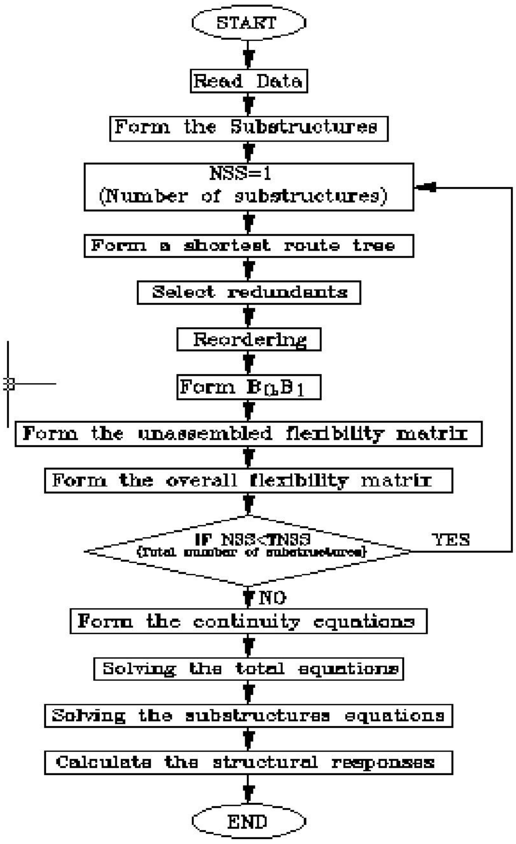
برنامه‌های کامپیوتری

برنامه محاسباتی *FORCE*

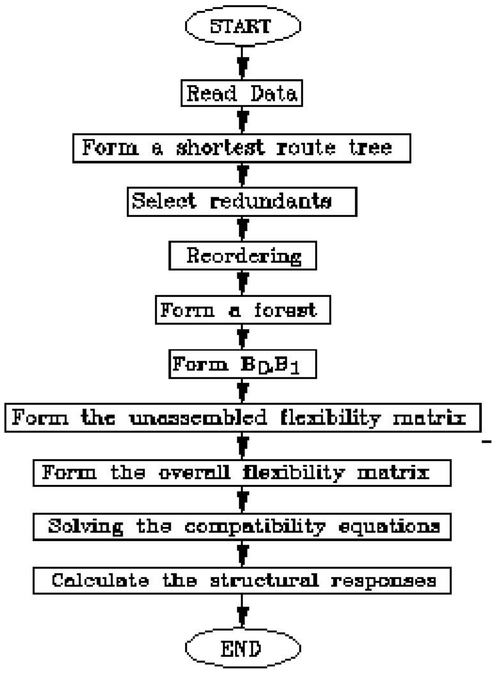
برنامه *FORCE* در زبان برنامه نویسی *Fortran Power Station* به منظور تحلیل بهینه قاب‌های صلب دوبعدی تهیه شده است. روند اجرایی برنامهٔ *FORCE* در صفحات بعدی نشان داده شده است.*[۱۰]*

برنامه محاسباتی *SUBFRAME*

برنامه *SUBFRAME* در زبان برنامه‌نویسی *Fortran Power Station* به منظور تحلیل قاب‌های صلب دو بعدی بزرگ مقیاس تهیه شده است. روند اجرایی برنامهٔ *SUBFRAME* در صفحات بعدی نشان داده شده است.



روند اجرایی برنامه *SUBFRAME*



روند اجرایی برنامه FORCE

مثال‌های عددی

در این بخش ۲ قاب صلب دوبعدی با استفاده از برنامه‌های محاسباتی *FORCE* و *SUBFRAME* مورد تحلیل قرار گرفته‌اند.

مثال (۱) یک قاب صلب مسطح طبق شکل(۲) دارای ۴ طبقه و۱ دهانه می‌باشد. ارتفاع طبقات ۳ متر و طول دهانه ۵ متر می‌باشد. پای ستون‌هادر طبقه همکف گیردار بوده و کلیه گره‌های بالایی صلب می‌باشند. مقادیر بارهای گرهی وارد بر سازه در شکل (۲) نشان داده شده‌اند. جنس و مشخصات مصالح بشرح زیر می‌باشند:

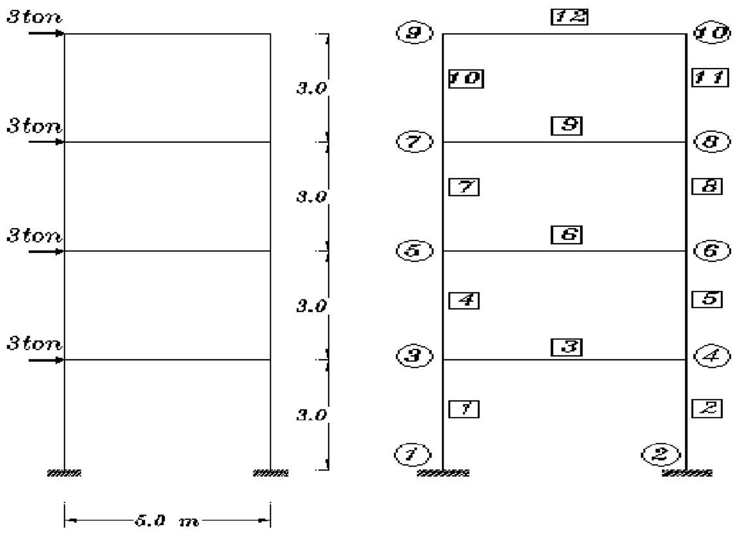
خواص ستون‌ها :

$$E = 2.1 \times 10^{6} \ \frac{Kg}{cm^{2}}$$
$$A = 23.9 \ cm^{2}$$
$$I_z = 1330 \ cm^{4}$$

خواص تیرها:

$$E = 2.1 \times 10^{6} \ \frac{Kg}{cm^{2}}$$
$$A = 20.1 \ cm^{2}$$
$$I_z = 869 \ cm^{4}$$

مطلوب است، تعیین نیروهای داخلی کلیهٔ اعضا توسط برنامهٔ FORCE



شکل (۲) سازه مربوط به مثال (۱) و شماره گذاری گره‌ها و المان‌ها

مثال (۲) یک قاب صلب مسطح طبق شکل (۳) دارای ۱۰ طبقه و۱۰ دهانه می‌باشد. ارتفاع طبقات ۳ متر و طول دهانه‌ها ۵ متر می‌باشد. پای ستون‌ها در طبقهٔ همکف گیرداربوده وکلیه گره‌های بالایی صلب می‌باشند مقادیر بارهای گرهی وارد بر سازه در شکل (۳) نشان داده شده‌اند. جنس و مشخصات مصالح بشرح زیرمی‌باشند:

خواص ستون‌ها:

$$E = 2.1 \times 10^{6} \ \frac{Kg}{cm^{2}}$$
$$A = 100 \ cm^{2}$$
$$I_z = 12000 \ cm^{4}$$

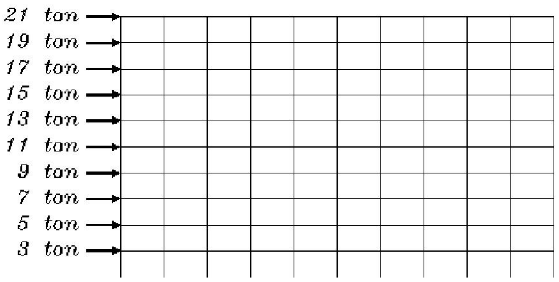
خواص تیرها :

$$E = 2.1 \times 10^{6} \ \frac{Kg}{cm^{2}}$$
$$A = 60 \ cm^{2}$$
$$I_z = 8000 \ cm^{4}$$

مطلوب است:

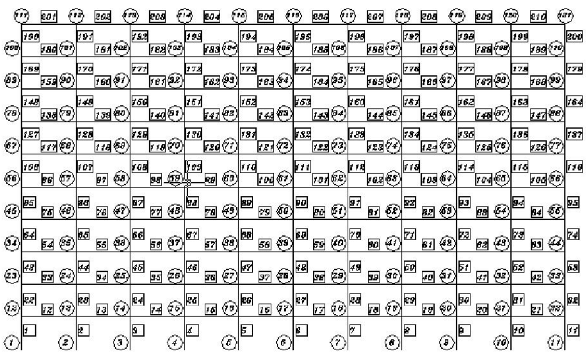
الف) افراز سازه به NP=۲

ب) تعیین نیروهای داخلی کلیه اعضا توسط برنامه SUBFRAME



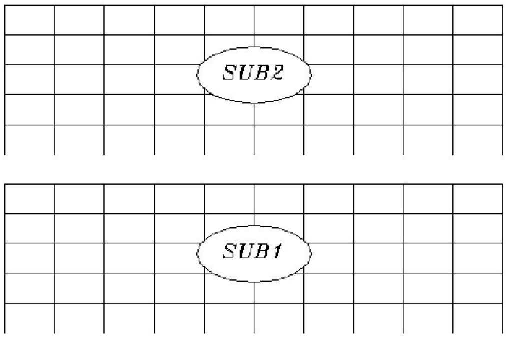
شکل (۳) سازهٔ قالب صلب مربوط به مثال (۲)

در شکل (۴) شماره گذاری المان ها و گره‌ها نشان داده شده‌اند.



شکل (٤) شماره گذاری گره‌ها و المان‌ها برای سازه مربوط به مثال (۲)

پاره سازه‌های افراز شده در شکل (۵) نشان داده شده‌اند.



شکل (۵) پاره سازه‌های افراز شده برای سازهٔ مربوط به مثال (۲)

نتیجه گیری

در این مقاله از روش نیروها برای تحلیل سازه‌ها استفاده شده است. قاب های صلب دو بعدی با فرض رفتار خطی و تغییر شکل های کوچک تحلیل بهینه شده‌اند. این تحلیل استاتیکی بوده و گره های قاب ها بصورت صلب در نظر گرفته شده‌اند. برای تحلیل بهینه از تئوری گراف ها استفاده شده است و بهینگی تحلیل نیز با استفاده از دستگاه های خودمتعادل یا سیکل ها در مدل گراف سازه بر مبنای تعداد کمینه اعضای غیرصفر ماتریس‌های اطلاعاتی و ساختار منظم آنها انجام گرفته است. ماتریس‌های اطلاعاتی در روش نیروها، شامل ماتریس تعادل دستگاه های خود متعادل B_1 (مستطیلی)، ماتریس تعادل سیستم های درختی B_0 (مستطیلی)، و ماتریس نرمی G (مربعی) هستند. به این منظور یک نرم‌افزار محاسباتی بنام FORCE که در زبان Fortran Power Station تهیه گردیده است. نتایج تحلیل مثال‌های متعددی با این نرم‌افزار (FORCE) با نرم‌افزارهای دیگر مورد مقایسه قرار گرفته، که نشان دهنده صحت نتایج این نرم افزارمی‌باشند.

در ادامه تحلیل سازه‌ها به روش پاره‌سازه‌ها انجام گرفته است. یکی از گام‌های اصلی در تحلیل سازه‌ها به روش پاره‌سازه‌ها، افراز و پارش سازه یا دامنه ای است که تحلیل خواهد شد. لذا انواع روش های متداول افراز مورد بررسی قرار گرفته، در نهایت از روش تنصیف طیفی استفاده شده است. به این منظور یک نرم افزار محاسباتی بنام SUBFRAME در زبان Fortran Power Station تهیه گردیده است. نتایج تحلیل مثال‌های متعددی با این نرم‌افزار، با نرم‌افزارهای دیگر مورد مقایسه قرار گرفته، که نشان دهندهٔ صحت نتایج این نرم افزار می‌باشند. این نرم‌افزار(SUBFRAME) از نظر ظرفیت با نرم افزار SAP90 قابل مقایسه بوده ودر بعضی حالات (قاب‌های صلب دو بعدی بزرگ مقیاس) ظرفیت بیشتری نشان داده است. با این نرم افزار سازه‌هایی تا ۱۵۰۰۰ درجهٔ نامعینی تحلیل شده‌اند.

مراجع

۱. Farhat, C., Maman, N. and Brown, G.W., 1995, Mesh partitioning for implicit computations via iterative domain decompostion: impact and optimization of the subdomain aspect ratio, Int. J. Numer. Meths Engng., 38, 989-1000.
۲. Kaveh, A. and Davaran, A., 1996, A mixed method for subdomain generation for parallel processing, in Advances in Compoutational Structural Techonology, Civil-Comp Press, Edinburgh, pp. 259-264.
۳. Kaveh, A. and Mokhtar-Zadeh, A., 1997, A comparative study of the combinatorial and algebraic force methods, Comput. Struct., 63, 727-737.
۴. Kaveh, A., Roosta,G.R. and Mokhtar-Zadeh, A., 1995, Substructuring for combinatorial force method of structural analysis, Proc, Civil-Comp, Edinburgh, U.K, pp.53-60.
۵. Kaveh, A. and Roosta, G.R., 1994, A graph theoretical method for decomposition in finite element analysis., Proc. Civil-Comp 94 , Edinburgh, U.K, pp.35-42.
۶. Kaveh, A. and Roosta, G.R., 1997, Domain Decomposition for finite element analysis, Commmunications in Numerical Methods in Engineering., 13, 61-71.
۷. Kaveh, A. and Roosta, G.R., 1995, Graph-theoritical Methods for substructuring and ordering, Proc. of the 10th European Conf. on Earthquake Engineering, Vienna, A. A. Blakema/Rotterdam/Brookfield, 2, 1461-1466.
۸. Kaveh, A. and Roosta, G.R., 1995, Graph-theoretical methods for substructuring, subdomaining and ordering, Int. J. Space Structures, No. 2, 10, 121-131.
۹. Kaveh, A., 1979, A Combinatorial optimization problem; Optimal generalized cycle bases, Comput. Meth. Appl. Mech. Engng., 20, 39-52.
۱۰. Kaveh, A., 1986, An efficient program for generating Subminimal cycle bases for the flexibility analysis of structures, Commun. Appl. Numer. Meth., 2, 339-344.
۱۱. Kaveh, A., 1976, Improved cycle bases for flexibility analysis of structures, Comput. Meths Appl. Mech. Engng., 9, 267-272.
۱۲. Kaveh, A., (1997), Optimal Structural Analysis, RSP(John Wiley), U.K.
۱۳. Kaveh, A., (1995), Structural Mechanics: Graph and Matrix Methods, RSP(John Wiley), U.K., 2nd Edition.
۱۴. Prezemieniecki, J.S., 1963, Matrix structural analysis of substructures, AIAA Journal, 1,138-147.

Substructureing Method For Analysis Large Scale Regid Frames Using Force Method

Ali Kaveh

Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Elmosanat University

Masood Poorbaba

Islamic Azad University,Maragheh Branch

Abstract

In this paper by using concepts of graph theory, forces method and substructure ing method for analysis of structures, some methods have been introduced for optimal analysis of structures in a large scale, using substructuring method.

Planar rigid frames assuming linear behavior and small deformations, have been optimal analyzed, by using forces method. Thus, a FORTRAN POWER STATION computational software called FORCE has been provided.

Large scale planar rigid frames are analyzed assuming linear behavior (without considering P-Δ effects etc). Thus, a FORTRAN POWER STATION computational software called SUBFRAME has been provided.

Keywords:

Substructureing method for analysis, Optimum analysis, large scale rigid frame