طراحی بهینه پیوسته وگسسته دریچه‌های خروجی سدها با روش توابع جریمه و محاسبات تقریبی

عیسی سلاجقه
دانشیار

جواد سلاجقه
مربی

گروه عمران دانشکده فنی دانشگاه شهید باهنر کرمان

چکیده

در این مقاله برای محاسبهٔ وزن حداقل سازه‌ها به کمک توابع جریمه، توابع وزن و محدودیتهای طرح یک سازه تبدیل به یک تابع بدون محدودیت گردیده و با روشهای عددی وزن حداقل سازه و مقادیر متغیرهای پیوستهٔ طرح در طراحی بهینهٔ پیوسته محاسبه می‌گردند و آنگاه برای انطباق مقادیر متغیرهای محاسبه شده بر مقادیر گسستهٔ متغیرها که از جداول استاندارد برداشت می‌شود، با افزودن یک تابع سینوسی به تابع بدون محدودیت حاصله در طراحی بهینهٔ پیوسته، تابع مزبور اصلاح و مجدداً حداقل این تابع اصلاح شدهٔ جدید محاسبه می‌گردد و نهایتاً وزن حداقل سازه به ازاء مقادیر گسستهٔ متغیرها به دست می‌آید.

از آنجا که در خلال هر مرحله از محاسبات عددی طراحی بهینهٔ پیوسته و گسسته برای محاسبهٔ توابع وزن و محدودیتها بایستی سازهٔ موردنظر به تعداد زیادی آنالیز گردد، لذا با کمک محاسبات تقریبی نیروها و تغییر شکلها و یک بار آنالیز سازه در هر مرحله از طراحی بهینه، مقادیر توابع وزن و محدودیتها برحسب متغیرها فرمول‌بندی گردیده و بجای استفاده از نتایج آنالیز سازه از روابط حاصله استفاده می‌گردد و در نتیجه وقت مصرفی کامپیوتر و طراحی به میزان قابل توجهی کاهش می‌یابد.

Continuous and Discrete Optimization of Dam's Outlet Gates Via Penalty Approaches and Approximation Concepts

E. Salajegheh
Associate Prof.

J. Salajegheh
lecturer

Civil. Eng. Dept. Shahid Bahonar Univ. of kerman.

ABSTRACT

In this study the optimum design of structures is achieved by means of penalty function. First the objective function and the constraints are expressed in terms of the design variables. Then the problem is expressed as a constained optimization problem which is transformed into a serious of unconstained minimization problems. To solve the problem with discrete design variables an special penalty function is employed. To reduce the computational cost of optimization all the quantities that are obtained from analysis are approximated. Thus in each design cycle only one analysis of the structure is required. Examples are offered to demonstate the efficiency and reliability of the proposed method.

۱ـ مقدمه

باتوجه به توسعه روزافزون ماشینهای حسابگر و روشهای ماتریسی تحلیل سازه‌ها، طراحی بهینه در سالهای اخیر در تمام زمینه‌ها مورد توجه قرارگرفته است. هدف از طراحی بهینهٔ یک سازه محاسبه متغیرهای طرح مانند سطوح مقاطع، مکان هندسی گره‌ها، نوع مقاطع و ... می‌باشد که به ازاء آن وزن سازهٔ موردنظر حداقل گردیده و کلیه محدودیتهای طرح ارضاء گردند.

روشهای طراحی بهینه سازه‌ها یا حداقل‌یابی، با درنظر گرفتن محدودیتها کاملاً مبتنی بر اصول ریاضی بوده و علت عدم امکان استفاده از روشهای تحلیلی این است که نمی‌توان مقادیر توابع وزن و محدودیتها را بر حسب متغیرهای طرح فرمول‌بندی نمود و لذا ناگزیر به استفاده از روشهای عددی و بهره‌گیری از کامپیوتر می‌باشیم.

به کمک روش توابع جریمه، توابع وزن و محدودیتها در یکدیگر ادغام و تابع بدون محدودیت جدیدی حاصل می‌گردد که در محاسبهٔ حداقل این تابع توجه به نکات زیر ضروری می‌باشد.

- تابع حاصله بایستی در محدودهٔ تعریف شده لااقل دارای یک حداقل باشد.
- تابع بدون محدودیت فوق و مشتقات آن بایستی پیوسته بوده و چنانچه تابع مزبور به ازاء بعضی از متغیرها پیوسته نباشد بایستی به نحوی اصولی و علمی تابع دیگری را جایگزین آن تابع نمود که هم خواص تابع اصلی را در نقاط گسسته دارا بوده و هم پیوسته باشد.

در کلیه روشهای عددی محاسبات بهینه طرح از یک نقطه اولیه یا X^0 شروع شده و در یک جهت مشخص در فضای متغیرهای طرح و به میزان معینی حرکت نموده تا بتوان به یک نقطه جدید دست یافت و با چندین بار تکرار این عملیات امکان محاسبهٔ نقطه حداقل تابع میسر گردد.

اصولاً روشهای طراحی بهینه به دو دسته کلی تقسیم‌بندی می‌گردند :

۱ـ روشهای مستقیم : در این روشها توابع وزن و محدودیتها تواماً درنظرگرفته‌شده و جهت بردار حرکت و میزان آن بنحوی تعیین می‌گردد که هم به سمت نقطه حداقل تابع نزدیک گردد و هم محدودیتها را نقض‌نکند ازجمله این روشها می‌توان روشهای Method of Center, Sequential Quadratic of linear Programming و Feasible Direction Method را نام‌برد.

۲ـ روشهای غیرمستقیم : در این روشها باکمک توابع جریمه، توابع وزن و محدودیتها در یکدیگر ادغام و یک تابع جدید بدون محدودیت حاصل خواهد شد که مقدار توابع جریمه ناشی از محدودیتها و گسسته بودن متغیرها به دو پارامتر اسکالر دیگر نیز بستگی دارد ولذا برای محاسبهٔ حداقل وزن سازه بایستی حداقل چندین تابع بدون محدودیت (که مقادیر ضرایب توابع جریمه متفاوت هستند) را محاسبه نمود. از اهم این روشها می‌توان روش تابع جریمه خارجی، تابع جریمه داخلی، تابع جریمه توسعه یافته خطی و درجه دوم داخلی و روش ضریب افزایشی لاگرانژ را نام برد.

در طراحی سازه‌های نامعین استاتیکی تحت بارگذاری و شرایط تکیه‌گاهی معین می‌دانیم هرگونه تغییری در مقادیر یک یا چند متغیر طرح میزان نیروها و تغییر شکلها را تغییر می‌دهد و لذا مقادیر توابع وزن و محدودیتها نیز تغییر خواهد نمود، و از آنجاکه در خلال هر مرحله از طراحی بهینه بایستی مقادیر توابع وزن و محدودیتها چند صدبار محاسبه گردند در نتیجه استفاده از برنامه آنالیز سازه به این تعداد، وقت زیادی را طلب نموده به طوری که برای سازه‌های سنگین به دلیل حجم زیاد محاسبات یا امکان طراحی بهینهٔ سازه میسر نبوده و یا به وقت زیاد و کامپیوتر با ظرفیت بالا نیاز خواهد بود، لذا برای امکان بهره‌وری از طراحی بهینه در سازه‌های سنگین ضرورت استفاده از محاسبات تقریبی نیروها و تغییر شکلها روشن و واضح می‌باشد. از طرف دیگر نظر به اینکه در اغلب سازه‌های مهندسی انتخاب مقادیر متغیرها به‌صورت پیوسته میسر نبوده و ناگزیر به استفاده از پروفیلهای استاندارد می‌باشیم، بنابراین در اینگونه موارد برای امکان بهره‌وری از طراحی بهینه بایستی مقادیر متغیرهای محاسبه شده بر مقادیر گسستهٔ آنها منطبق گردد.

با توجه به مراتب فوق و نظر به تعدد روشها، تعدد متغیرها، گسسته بودن و نبودن متغیرها، استفاده و یا عدم استفاده از محاسبات تقریبی نیروها و تغییر شکلها، طیف تحقیقات و مطالعات در زمینهٔ طراحی بهینهٔ سازه‌ها بسیار وسیع بوده که قسمتی از مطالعات انجام شده به شرح زیر خلاصه می‌گردد.

در سال ۱۹۷۶ بعضی از اصول محاسبات تقریبی جهت تنشها ارائه گردیده و متعاقب آن با روش Duality و با کمک محاسبات تقریبی در سال ۱۹۸۰ طراحی بهینهٔ سازه‌ها ارائه شده است [۱ و ۲].

با کمک محاسبات تقریبی در سال ۱۹۸۴ بهینهٔ سازه‌های دو لایهٔ فضایی و متعاقباً در سالهای ۱۹۹۳ و ۱۹۹۴ طی شش مقاله با روشهای مستقیم، طراحی بهینهٔ سازه‌های فضایی، طراحی بهینهٔ گسستهٔ قابها، طراحی بهینهٔ صفحات و پوسته‌ها ارائه شده است [۳ - ۹].

در سالهای ۱۹۸۶ تا ۱۹۸۹ روشهای استفاده از محاسبات تقریبی بهبود بخشیده شده و با محاسبهٔ نیروها و تغییر شکلها و فرکانسها بصورت تقریبی و جایگزینی آنها در توابع وزن و محدودیتها در طی هر مرحله از محاسبات بهینه توابع مزبور بر حسب متغیرهای طرح فرمول‌بندی گردید. همچنین در سال ۱۹۹۳ طی دو مقاله روش جدید دیگری برای محاسبات تقریبی ارائه گردید که با کمک این محاسبات و با روش Branch and Bound طراحی بهینه گسسته و همچنین با روش Duality نحوهٔ بهینهٔ شکل سازه‌ها ارائه گردید [۱۵ - ۱۰].

درسال ۱۹۹۰ نوشتاری‌دررابطه‌باطراحی‌بهینه‌گسسته‌باکمک توابع جریمه ارائه شد که به دلیل عدم استفاده از محاسبات تقریبی، استفاده از این برنامه وقت زیادی را می‌طلبد و عملاً برای سازه‌های سنگین کاربردی نمی‌تواند داشته باشد،[۱۶].

در نوشتار حاضر با روش توابع جریمه (تابع جریمه درجه دوم داخلی توسعه یافته)، با تبدیل توابع وزن و محدودیتهای سازه به تابع بدون محدودیت و کمک گرفتن از روش متغیر متریک برای تعیین جهت بردار حرکت (Search)، با استفاده از روش مقاطع طلایی برای تعیین حداقل توابع یک متغیره (برای محاسبه میزان حرکت در جهت بردار Search) و با استفاده از محاسبات تقریبی نیروها و تغییر شکلها طراحی بهینهٔ پیوسته و گسسته ارائه می‌گردد که وقت مورد نیاز طراحی را به میزان قابل توجهی کاهش داده و با حل چند مثال و مقایسهٔ جوابها با جوابهای آمده در مراجع، دقت روش ارائه شده و برنامهٔ تهیه شده اثبات خواهد گردید و آنگاه سازهٔ باربر انتخابی دریچهٔ خروجی سد ساوه (سازهٔ دو لایه فضایی) برای دو حالت بارگذاری طراحی بهینه می‌گردد. ضمناً متغیرهای طرح در این نوشتار سطوح مقاطع انتخاب گردیده‌اند.

۲ـ اصول طراحی بهینهٔ سازه‌ها

۲ـ۱ـ طراحی بهینهٔ پیوسته

همانطور که قبلاً بیان گردید هدف از طراحی بهینه محاسبه وزن حداقلی از سازه می‌باشد که به ازاء متغیرهای محاسبه شده نظیر وزن حداقل کلیه محدودیتهای طرح ارضاء گردند، لذا می‌توان مسائل مربوط به طراحی بهینه را به شکل ریاضی زیر فرمول‌بندی نمود.

$$\text{Minimize:} F(X) \qquad \text{تابع هدف یا تابع وزن} \qquad (۱)$$

$$\text{Subject to}: g_j(X) \le 0 \qquad j = 1, m \qquad (۲)$$

$$h_k(X) = 0 \qquad k = 1, l \qquad (۳)$$

$$X_i^L \le X_i \le X_i^U \qquad i = 1, n \qquad (۴)$$

$$X = \begin{Bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_n \end{Bmatrix} \qquad \text{متغیرهای طرح} \qquad (۵)$$

که در این روابط $F(X)$ تابع هدف یا وزن، $g_j(X)$ توابع با محدودیتهای نامساوی، $h_k(X)$ توابع با محدودیتهای مساوی و X_i^L و X_i^U بترتیب حدود پایین و بالای متغیر X_i، n تعداد متغیرهای طرح، m تعداد محدودیتهای نامساوی، l تعداد محدودیتهای مساوی و X بردار متغیرهای طرح می‌باشد.

راه حل عمومی تبدیل توابع با محدودیت به توابع بدون محدودیت، درنظر گرفتن یک تابع جریمه می‌باشد که به تابع هدف اضافه می‌گردد و این تابع به کمک یک پارامتر اسکالر افزایش و یا کاهش می‌یابد و در نتیجه بجای تعیین حداقل یک تابع با محدودیت،حداقل چندین تابع بدون محدودیت محاسبه می‌گردد و این روش به نام روش تسلسلی حداقل توابع بدون محدودیت یا SUMT(Sequential - Unconstrained - Minimization -Techniques) نامیده می‌شود، لذا فرم کلی برای استفاده SUMT این است که یک تابع شبه هدف را مطابق رابطهٔ زیر تعریف نموده و از آن استفاده گردد [۱۷].

$$\Phi(X, r_p) = F(X) + r_p\, P(X) \qquad (۶)$$

در این رابطه $F(X)$ تابع هدف، $P(X)$ تابع جریمه، r کمیتی اسکالر است که مقدار تابع جریمه را مشخص نموده و p شماره مراحل محاسبات تعیین حداقل توابع بدون محدودیت رامشخص می‌نماید.

از آنجا که در این نوشتار با روش تابع جریمه درجه دوم داخلی توسعه یافته توابع با محدودیت به توابع بدون محدودیت تبدیل گردیده، لذا براساس این روش تابع جریمه مطابق رابطهٔ (۷) تعریف می‌گردد [۱۷].

$$P(X) = \sum_{j=1}^{m} \bar{g}_j(X) + \sum_{k=1}^{l} [h_k(X)]^2 \qquad (۷)$$

و مقدار $\bar{g}_j(X)$ بر اساس رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد [۱۷].

$$\bar{g}_j(X) = -\frac{1}{g_j(X)} \quad \text{اگر} \quad g_j(X) \le \varepsilon \qquad (۸)$$

$$\bar{g}_j(X) = -\frac{1}{\varepsilon}\left[\left[\frac{g_j(X)}{\varepsilon}\right]^2 - 3\left[\frac{g_j(X)}{\varepsilon}\right] + 3\right] \quad \text{اگر} \quad g_j(X) > \varepsilon \qquad (۹)$$

در روابط فوق ε عددی منفی و کوچک بوده که در شروع محاسبات مقدارش در محدودهٔ $-0/3 \le \varepsilon \le -0/1$ پیشنهاد می‌شود و در مراحل بعدی مقدار ε از رابطه زیر محاسبه می‌گردد.

$$\varepsilon = -C(r_p)^a \quad , \quad \frac{1}{3} \le a \le \frac{1}{2} \qquad (۱۰)$$

پارامتر C عددی ثابت بوده که مقدار آن در شروع محاسبات با توجه به مقدار ε و r_p از رابطهٔ (۱۰) محاسبه گردیده و آنگاه در خلال محاسبات طراحی بهینه مقدار آن ثابت فرض می‌گردد.
بنابراین تابع شبه هدف حاصله به شکل زیر تبدیل می‌شود:

$$\Phi(X, r_p, r'_p) = F(X) + r_p \sum_{j=1}^{m} \bar{g}_j(X) + r'_p \sum_{k=1}^{l} [h_k(X)]^2 \qquad (۱۱)$$

مقادیر r'_p و r_p در شروع محاسبات فرض گردیده (مثلاً $r_p = 1$ و $r'_p = 1$) و در خلال مراحل محاسبات بهینه مقدار r'_p توسط ضریبی مانند (γ') افزایش یافته ولی مقدار r_p در خلال محاسبات بایستی توسط ضریبی مانند (γ) کاهش یابد بهترین مقادیر (γ') و (γ) با توجه به نوع سازه و با سعی و خطا تعیین می‌گردد و می‌توان مقدار $\gamma = 0/1 - 0/3$ و مقدار $\gamma' = 7 - 10$ انتخاب نمود.

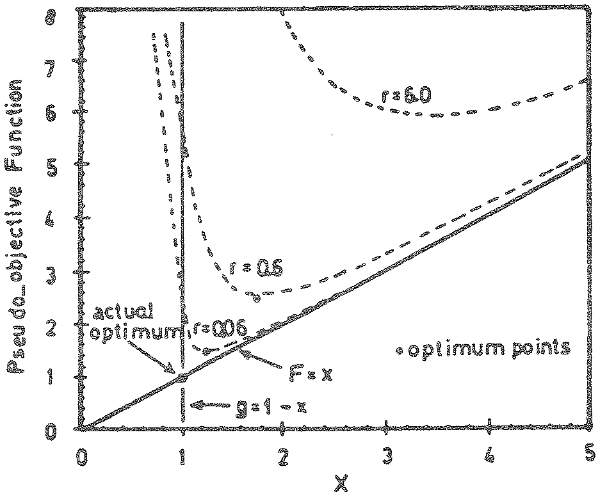
بنابراین هدف محاسبهٔ حداقل تابع رابطه (۱۱) می‌باشد و برای بهینه کردن رابطهٔ فوق در شروع محاسبات نیاز به مقادیر اولیه‌ای برای کلیه متغیرهای طرح داریم تا با داشتن این مقادیر بتوان محاسبات را شروع نمود. معمولترین رابطهٔ محاسبات بهینه رابطهٔ زیر می‌باشد.

$$X^q = X^{q-1} + \alpha^* \cdot S^q \qquad (۱۲)$$

در رابطهٔ (۱۲)، q شماره مرحله تکرار عملیات، X بردار متغیرها و S جهت بردار حرکت (Search) در فضای متغیرهای طرح می‌باشد و α^* کمیتی اسکالر است که مقدار حرکت در جهت S را مشخص می‌نماید. بنابراین با فرض مشخص بودن جهت بردار حرکت (S) و بامعلوم بودن نقطهٔ شروع (X^0) مختصات نقطه جدید بر حسب پارامتر α فرمول‌بندی می‌گردد که برای محاسبه میزان حرکت در جهت S چنانچه مقدار محاسبه شده بردار X بر حسب α را در رابطهٔ (۱۱) جایگزین نمائیم رابطهٔ (۱۱) برحسب α رابطه‌ای یک متغیره می‌گردد که میزان α^* در حقیقت حداقل تابع فوق یعنی حداقل $\phi(\alpha)$ می‌باشد، لذا با کمک رابطهٔ (۱۲) و با معلوم بودن بردار مختصات نقطهٔ شروع، بردار مختصات نقطهٔ اول بدست آمده و با تکرار این روش نهایتاً می‌توان به نقطه حداقل تابع دست یافت. (برای مشخص نمودن بردار نقطه حداقل بایستی در حقیقت مقدار α^* محاسبه شده در آن مرحله صفر و یا نزدیک به صفر گردد).

۲-۲- طراحی بهینهٔ گسسته

بنابه موارد آمده در بخش قبل اگر تابع هدف $F(X)=x$ و محدودیت طرح $1-X \le 0$ باشد چنانچه بر اساس رابطهٔ (۱۱) تابع شبه هدف تشکیل گردد و این تابع بانضمام محدودیت و تابع هدف ترسیم گردد شکل (۱) حاصل می‌گردد.



شکل (۱) نمایش توابع هدف و شبه هدف و محدودیت
$g(X) = 1-X \le 0$ و $F(X)=X$

حال با توجه به شکل فوق چنانچه مقدار X یا متغیر طرح بتواند فقط مقادیر مشخصی مثلاً (... و ۳، ۲، ۱) $\in X_D$ را داشته باشد تابع شبه هدف $\phi(X, r_p)$ بایستی بنحوی اصلاح گردد که امکان محاسبهٔ حداقل تابع به ازاء مقادیر گسستهٔ X_D عملی باشد. بنابراین شکل کلی مسائل برای توابع با محدودیت نامساوی بصورت زیر درخواهد آمد.

Minimize : F(X)

Subject to : $g_i(X) \le 0 \qquad j = 1, m$

$X^L_i \le X_i \le X^U_i \qquad i = 1, n$

$$X_i \in D_i \text{ or } X_i \in \{d_{i1}, d_{i2}, d_{i3}, \ldots, d_{iq}\}$$
$$, i=1,2,\ldots,nd \qquad (۱۳)$$

در روابط فوق، n تعداد متغیرها، nd تعداد متغیرهای گسسته، m تعداد محدودیتهای نامساوی طرح، q تعداد کمیتهای انتخابی برای هر یک از متغیرهای گسسته بوده که می‌توانند برای متغیرهای مختلف مقادیر متفاوتی داشته باشد.

با توجه به شکل (۱)، در حالتی که متغیرها گسسته باشند، بایستی شکل تابع شبه هدف رابطه (۱۱) بنحوی اصلاح شود که در نقاط گسسته دارای حداقل و در نقاط بین نقاط گسسته مقادیر بیشتری داشته باشد.

یکی از روشهای اصلاح تابع شبه هدف، با افزودن یک تابع سینوسی به تابع شبه هدف رابطهٔ (۱۱) حاصل می‌گردد که شکل کلی آن برای توابع با محدودیتهای نامساوی بصورت زیر درمی‌آید [۱۶].

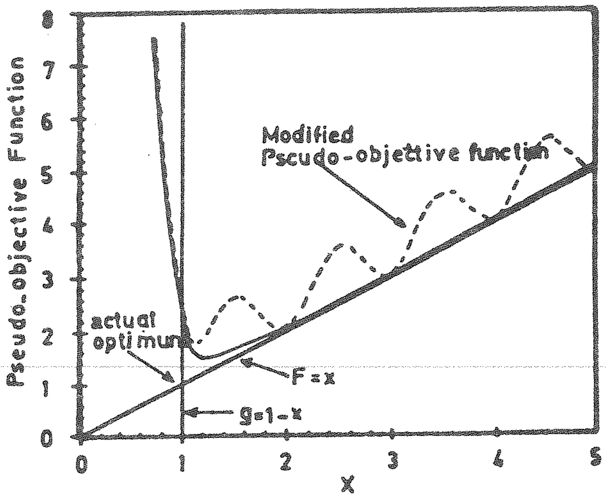
$$\psi(X, r_p, s)=F(X)+ r_p \sum_{j=1}^{m} \bar{g}_j(X)+s\sum_{k=1}^{nd} \phi^k{}_d (X) \qquad (۱۴)$$

در این رابطه، $\psi(X, r_p, s)$ تابع شبه هدف اصلاح شده، F(X) تابع هدف، r_p ضریب تابع جریمه ناشی از محدودیتها، $\bar{g}_j(X)$ تابع جریمه محدودیتها، s کمیتی اسکالر و مثبت است که بنام ضریب تابع جریمه ناشی از گسسته بودن متغیرها نامیده می‌شود و مقدار آن در شروع محاسبات بهینهٔ گسسته کوچک بوده و در مراحل مختلف توسط یک ضریب مقدار آن افزایش می‌یابد، $\phi_d{}^k(X)$ تابع جریمه ناشی از گسسته بودن متغیرها بوده که می‌تواند قسمت مثبت تابع سینوسی مار بر نقاط گسسته باشد که بصورت زیر تعریف می‌گردد [۱۶ و ۱۸].

$$\phi^k{}_d (X) = \frac{1}{2} \left[\sin \frac{2\pi(X_i - 1/4(d_{ij+1}+3d_{ij}))}{d_{ij+1}-d_{ij}} +1\right], \qquad (۱۵)$$
$$d_{ij} \le X_i \le d_{ij+1}$$

حال چنانچه تابع شبه هدف اصلاح شدهٔ رابطه (۱۴) برای مثال شکل (۱) تشکیل و ترسیم گردد، با فرض $X_i \in$ { ... و ۲ و ۱ }، r_p = ۰/۰۶ و s = ۱/۰ شکل (۲) حاصل می‌گردد.

همانطور که از شکل برمی‌آید مقدار تابع شبه هدف اصلاح شده در نقاط گسسته منطبق بر مقادیر تابع شبه هدف رابطهٔ (۱۱) بوده ولی در سایر نقاط مقدار آن از تابع شبه هدف بیشتر می‌باشد بنابراین حداقل تابع شبه هدف اصلاح شده ناگزیر منطبق بر نقاط گسسته خواهد بود.



شکل (۲) رسم تابع شبه هدف اصلاح شده شکل (۱)

با توجه به مراتب فوق نحوهٔ عمل بدین صورت است که نخست بدون درنظرگرفتن گسسته بودن متغیرها، عمل طرح بهینهٔ پیوسته مطابق مطالب آمده در قسمت (۲-۱) صورت گرفته و پس از پایان یافتن طرح بهینهٔ پیوسته، تابع شبه هدف با افزودن رابطه (۱۵) به آن اصلاح گردد و مجدداً تابع شبه هدف اصلاح شده را مطابق مرحلهٔ طراحی بهینه پیوسته مینیمم نموده و نهایتاً مقادیر متغیرهای طرح که منطبق بر نقاط گسستهٔ متغیرها می‌باشند به ازاء حداقل تابع شبه هدف اصلاح شده محاسبه خواهد شد، ضمناً مقدار r_p در خلال طراحی بهینهٔ گسسته بایستی ثابت و مساوی آخرین r_p محاسبه شده از طراحی بهینهٔ پیوسته باشد. مقدار پارامتر اسکالر s را در شروع محاسبات معمولاً بر اساس رابطهٔ زیر محاسبه نموده و در خلال مراحل طرح بهینهٔ گسسته توسط ضریبی که مقدار آن تقریباً بین $\sqrt{\frac{1}{0.05}}$ تا $\sqrt{\frac{1}{0.5}}$ پیشنهاد می‌گردد، افزایش می‌یابد. ضمناً مقادیر متغیرهای اولیه در طرح بهینهٔ گسسته را مقادیر متغیرهای حاصل از طراحی بهینهٔ پیوسته درنظر می‌گیرند [۱۶].

$$s=0.1r_p \cdot \sum_{j=1}^{m} \bar{g}_j(X) \qquad (۱۶)$$

۳ـ ضوابط همگرایی

برای اختتام برنامهٔ محاسبهٔ طراحی بهینهٔ پیوسته و گسسته روشهای متعددی آمده است [۱۶ و ۱۷] که در این نوشتار برای اختتام طراحی بهینهٔ پیوسته از مقایسهٔ مقادیر تفاوت توابع شبه

هدف و هدف همچنین از مقایسهٔ مقادیر تابع هدف در دو مرحله متوالی بصورت روابط زیر استفاده گردیده است.

$$\Phi(X,r_p)-F(X)\leq(0.01 \text{ یا } 0.005)\ \Phi(X,r_p) \qquad (۱۷)$$

$$F(X^q)-F(X^{q-1}) \leq 0.001\ F(X^\circ) \qquad (۱۸)$$

و همچنین برای اختتام محاسبات طراحی بهینه گسسته از رابطه (۱۷) و همچنین مقایسه مقادیر متغیرهای محاسبه شده با مقادیر گسسته متغیرها مطابق رابطه زیر استفاده شده است [۱۶].

$$\max\{\min\ \{\frac{|X_i - d_{ij}|}{d_{ij+1}-d_{ij}}\ ,\ \frac{|X_i - d_{ij+1}|}{d_{ij+1}-d_{ij}}\}\}$$

$$\leq 0.001 \quad i=1,\ 2,\ ....,\ nd \qquad (۱۹)$$

۴ـ محاسبات تقریبی نیروها و تغییر شکلها

از آنجا که در طراحی سازه‌ها سطح مقطع المانهای تشکیل دهنده سازه اغلب متغیرهای طرح می‌باشند و در خرپاها و قابهای فضایی مقدار نیروی داخلی هر المان با سطح مقطع آن المان رابطهٔ مستقیم و مقدار تغییر شکل با سطح مقطع المان رابطهٔ عکس دارد، لذا برای نشان دادن روابط به صورت ریاضی تغییر و متغیر زیر را در نظر می‌گیریم [۱۰].

$$Z=Y \quad \text{or} \quad Z=\frac{1}{Y} \qquad (۲۰)$$

در رابطه (۲۰)، Y بردار مربوط به سطح مقاطع و یا ممان اینرسی اعضاء بوده که به بردار واسطه موسوم است. از طرفی می‌دانیم که Y و Z هر دو توابعی Explicit بر حسب متغیر X هستند. بنابراین صورت کلی مسأله طراحی بهینه را می‌توان بصورت رابطهٔ زیر نمایش داد.

$$\text{Minimize : } F(X)$$

$$\text{Subject to : } g_i[X\ ,\ u(Z),\ f(Z)] \leq 0 \quad j = 1\ ,\ m$$

$$X^L{}_i \leq X_i \leq X^U{}_i \qquad i = 1\ ,\ n$$

$$\delta Z^L{}_i \leq \delta Z_i \leq \delta Z^U{}_i \qquad (۲۱)$$

حال با کمک بسط تیلور می‌توان نوشت :

$$u(Z) \approx u(Z^\circ) + \nabla u(Z^\circ)\ .\ \delta Z$$

$$f(Z) \approx f(Z^\circ) + \nabla f(Z^\circ)\ .\ \delta Z \qquad (۲۲)$$

در روابط فوق f و U بترتیب نشان دهندهٔ بردار نیرو و تغییر شکل هستند و $Z^\circ, \delta Z=Z-Z^\circ$ نمایانگر نقطه‌ای است که بسط تیلور تابع به ازاء آن نقطه نوشته شده است و اپراتور ∇، نشان دهندهٔ مشتق مرحله اول می‌باشد.

حدود بالا و پایین Z بصورت کسری از مقدار Z یا عدد ثابتی است، عدد ثابت زمانی استفاده می‌گردد که حدود بالا دست و پایین دست خیلی به Z نزدیک گردند، لذا در چنین موردی یک حداقل لازم است که بایستی مشخص گردد.

بعنوان مثال می‌توان در اولین مرحله محاسبات حدود بالا و پایین دست Z مساوی ۸۰± درصد مقدار Z باشد و در هر مرحله بمیزان ۱۰± درصد به حدود اضافه و یا کسر گردد. بدیهی است چنانچه مراحل آنالیز زیاد باشد در مراحل نهایی بایستی حداقل حدود بالا و پایین دست Z، ۸± درصد باشد که از یک مقدار ثابت کمتر نگردد. در غیر این صورت محاسبات بهینه از روال طبیعی خارج می‌گردد. علت تنگ نمودن حدود Z بدلیل‌خطی فرض‌کردن تغییرات نیرو و تغییرشکل است که‌هرچه دامنه تغییرات کمتر باشد به دقت محاسبات اضافه خواهد شد.

از طرفی بر اساس محاسبات روش تغییر شکلها داریم :

$$Ku = P \qquad (۲۳)$$

که در این رابطه K ماتریس کلی سختی سازه، u بردار تغییر شکل و P بردار نیروهای خارجی وارده به سازه است. حال چنانچه مشتق نسبی رابطهٔ (۲۳) نسبت به Z_i محاسبه گردد داریم.

$$\frac{\partial K}{\partial Z_i}\ .\ u+K\ .\ \frac{\partial u}{\partial Z_i} = \frac{\partial P}{\partial Z_i}$$

یا

$$K\ \frac{\partial u}{\partial Z_i} = \frac{\partial P}{\partial Z_i} - \frac{\partial K}{\partial Z_i}\ u \qquad (۲۴)$$

با معلوم بودن بردار تغییر شکل و داشتن $\frac{\partial k}{\partial z_i}$ طرف راست رابطهٔ (۲۴) براحتی قابل محاسبه است و در نتیجه $\frac{\partial u}{\partial z_i}$ محاسبه می‌شود. در صورتی که از رابطه (۲۴) $\frac{\partial u}{\partial y_i}$ در دست باشد مقدار $\frac{\partial u}{\partial z_i}$ از رابطه زیر حاصل می‌شود :

$$\frac{\partial u}{\partial Z_i} = \frac{\partial u}{\partial Y_i}\ .\ \frac{\partial Y_i}{\partial Z_i} \qquad (۲۵)$$

در نتیجه در حالتی که $Z = Y$ باشد داریم :

$$u(Y) = u(Y^\circ) + \nabla u(Y^\circ)\ (Y-Y^\circ) \qquad (۲۶)$$

و چنانچه $Z = \frac{1}{Y}$ باشد داریم :

$$\frac{\partial u}{\partial Z_i} = \frac{\partial u}{\partial Y_i}\ (-Y_i^2) \qquad (۲۷)$$

لذا می‌توان نوشت :

$$u(Y) = u(Y^\circ) + \nabla u(Y^\circ)\ (-(Y^\circ{}_i)^2)\ (Z_i-Z_i{}^\circ)$$

یا

$$u(Y)=u(Y^\circ)+ \nabla u(Y^\circ)(-(Y^\circ{}_i)^2)(\frac{1}{Y^\circ{}_i} - \frac{1}{Y^\circ{}_i}) \qquad (۲۸)$$

چنانچه رابطهٔ (۲۸) ساده شود نتیجه می‌گردد که :

$$u(Y) = u(Y^\circ) + \nabla u(Y^\circ)\ (Y-Y^\circ)\ \frac{Y_i^\circ}{Y_i} \qquad (۲۹)$$

بنابراین با کمک روابط (۲۶) و (۲۹) و بوسیله کامپیوتر براحتی

می‌توان مقدار نیرو و تغییر شکل را به شرح زیر محاسبه نمود.

۱ـ به ازاء بردار (X°) سازه آنالیز و مقادیر نیرو و تغییر شکل محاسبه می‌گردد.

۲ـ ماتریس مشتق نیرو و تغییر شکل $(\nabla f\ ,\ \nabla u)$ را محاسبه می‌نمائیم.

۳ـ باکمک رابطه (۲۶) می‌توان مقدارنیروی تقریبی هر عضو سازه را از رابطهٔ زیر بدست آورد. (با فرض $Y=X$) :

$$f(X) = f(X^\circ) + \nabla f(X^\circ)\,(X-X^\circ) \qquad (۳۰)$$

۴ـ همچنین با کمک رابطه (۲۹) مقدار تغییر شکل سازه برابر خواهد بود با (فرض $Y = \frac{1}{X}$) :

$$u(X) = u(X^\circ) + \nabla u(X^\circ)\,(X-X^\circ)\,\frac{X^\circ}{X} \qquad (۳۱)$$

باید توجه شود که در روابط فوق X و X° و f و u بردار هستند و ∇u و ∇f دو ماتریس می‌باشند، لذا رابطهٔ کاربردی قابل استفاده بوسیله کامپیوتر بصورت زیر درمی‌آید.

$$f(X) = f(X^\circ) + \sum_{I=1}^{n} \left[\frac{\partial f(X)}{\partial X_i}\right](X_i-X_i^\circ)$$

$$u(X)=u(X^\circ) + \sum_{I=1}^{n} \left[\frac{\partial u(X)}{\partial X_i}\right](X_i-X_i^\circ)\,.\,\frac{X_i^\circ}{X_i} \qquad (۳۲)$$

۵ـ برنامه کامپیوتری

با توجه به مطالب آمده در بندهای قبلی، برنامه کامپیوتری طراحی بهینه پیوسته و گسستهٔ سازه‌ها (نوع سازه، خرپا یا سازهٔ فضایی منظورگردیده) با روش توابع جریمه (تابع جریمه درجه دوم داخلی توسعه یافته) و با کمک محاسبات تقریبی نیروها و تغییر شکلها تهیه گردیده است.

قدمهای اساسی در طرح بهینه پیوسته و گسسته سازه‌ها که برنامه بر اساس آنها نوشته شده است عبارتند از :

۱ـ کلیه اطلاعات تغییر شکل‌ناپذیر سازه را تحت عنوان برنامه Data تنظیم نموده و مقادیر اولیه متغیرها را برای طرح بهینه انتخاب می‌نمائیم.

۲ـ با اطلاعات ردیف ۱ سازه را آنالیز نموده و بردار نیرو و تغییر شکل را محاسبه می‌کنیم.

۳ـ مشتق بردار نیرو و تغییر شکل را بطور دقیق و یا تقریبی محاسبه نموده و ماتریس‌های مشتقات را تنظیم می‌نمائیم.

۴ـ روابط لازم برای محاسبه نیروها و تغییر شکل را براساس رابطه (۳۲) تنظیم می‌کنیم.

۵ـ توابع هدف و محدودیتها را بر مبنای نیروها و تغییر شکلها و حدود تغییرات متغیرها محاسبه نموده و محدودیتهای غیربحرانی‌راحذف می‌نمائیم(بعنوان مثال تمام $g_i \leq -0.5$).

۶ـ تابع شبه هدف را با روش تابع جریمه درجه دوم داخلی توسعه یافته تشکیل داده و حداقل عددی آن را بر اساس روشهای ذکر شده استخراج نموده و نهایتاً متغیرهای جدید را از محاسبات استخراج می‌نمائیم.

۷ـ با داشتن متغیرهای جدید قدمهای ۲ الی ۶ را مجدداً تکرار نموده تا ضوابط همگرائی برای اختتام برنامهٔ طراحی بهینه پیوسته فراهم گردد.

۸ـ متغیرهای حاصله از طراحی بهینه پیوسته را بعنوان مقادیر اولیه متغیرها انتخاب می‌کنیم.

۹ـ با مقایسه متغیرها با مقادیر متغیرهای گسسته، d_{ij+1} و d_{ij} و همچنین حدودبالاوپایین‌دست‌متغیرهارااستخراج می‌نمائیم.

۱۰ـ قدمهای مشابه ۲ الی ۵ را تکرار نموده و ضریب تابع جریمه محدودیتها را ثابت کرده و همچنین تابع جریمه ناشی از گسسته بودن متغیرها را محاسبه نموده و تابع شبه هدف اصلاح شده را (رابطه ۱۴) تشکیل داده و از حداقل نمودن‌این تابع مقادیر متغیرهای‌جدیدرااستخراج می‌نمائیم.

۱۱ـ قدمهای ۹ و ۱۰ راتکرارنموده‌تازمانی‌که‌ضوابط‌همگرائی برای اختتام محاسبات طراحی بهینه گسسته فراهم گردد و نهایتاً مقادیر متغیرها و وزن حداقل سازه محاسبه می‌گردد.

برای اطمینان از دقت و صحت عملکرد برنامه نخست، دو مثال که جواب مثالها در مراجع بیان گردیده با این برنامه طراحی بهینهٔ پیوسته و گسسته گردیده که بشرح زیر می‌باشند.

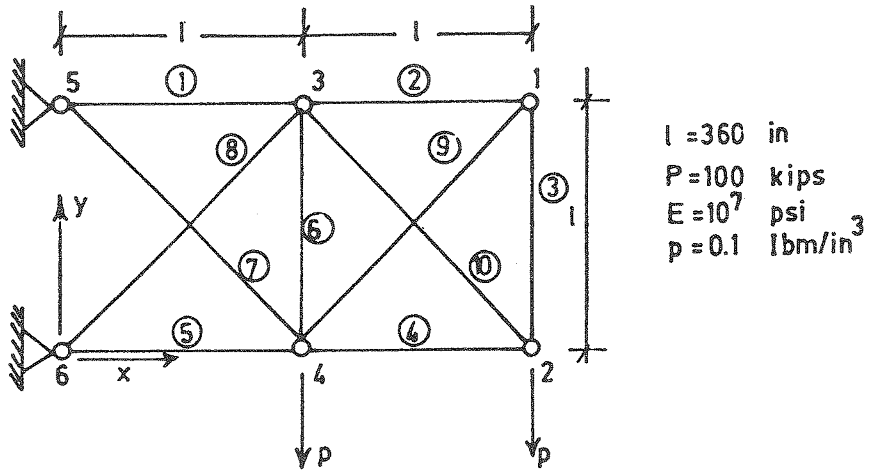
۶ـ مثالها

۶ـ۱ـ مثال ۱ : خرپای ده عضوی

خرپایی با ده عضو مطابق شکل (۳) مفروض بوده، چنانچه $E=10^{7}$psi و تنش مجاز تمام اعضاء به جزء عضو شماره ۱۰ مساوی ۲۵۰۰۰psi ± و تنش مجاز عضو شماره ۱۰ ۵۰۰۰۰psi ± باشد، مطلوب است طراحی بهینهٔ پیوسته و گسسته این طرح در صورتی که متغیرهای گسسته $D_i \in$ {۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ...} باشد. (بدیهی است متغیرهای این خرپا سطح مقطع اعضاء تشکیل دهنده می‌باشند).

ضمناً بدلیل امکان مقایسه نتایج با مراجع در مثالهای ۱ و ۲ از واحدهای غیرمتریک استفاده شده است.

حل : این مثال با کمک برنامه کامپیوتری تهیه شده طراحی بهینه



شکل (۳) خرپای ده عضوی مثال ۱ و ۲

پیوسته و گسسته شده که نتایج آن همراه با نتایج همین مثال که در مراجع آمده‌است جهت مقایسه در جدول(۱) درج گردیده‌است.

- با مقایسه ستونهای ۳ و ۴ با ستون ۵ ، دقت روش بکاربرده شده نشان داده می‌شود.
- تنشهای داخلی اعضاء، محدودیتهای این مسأله تماماً در حد مجاز می‌باشند.
- وقت مصرفی کامپیوتر (باکامپیوتر ۳۸۶ با سرعت ۲۰MH) برای طراحی پیوسته و گسسته کلاً ۳ دقیقه بوده که در مقایسه با زمان لازم برای طراحی بهینه همین مثال با کمک برنامه آنالیز (۹۰ دقیقه) بسیار ناچیز است.

۶-۲- مثال ۲

چنانچه ماکزیمم تغییر شکل قائم گره‌های (۲)، (۳)، (۴) و (۵) خرپای مثال ۱ مساوی ۲± اینچ باشدطراحی بهینه این خرپا با در نظرگرفتن متغیرهای گسسته $D_i \in \{۰/۱، ۰/۵، ۱، ۱/۵، ...\}$ مدنظر است. نتایج طراحی بهینه پیوسته و گسسته این مثال همراه با حل همین مثال که در مراجع آمده، جهت مقایسه در جدول (۲) درج شده است.

با مقایسهٔ نتایج آمده در ستون سوم با مقادیر آمده در ستون ۴ و همچنین مقایسه مقادیر ستونهای ۶ و ۷ مشاهده می‌گردد که با تعداد مراحل آنالیز کمتر و با دقت خوب و وقت مصرفی بسیار کم کامپیوتر (۲ دقیقه) مثال مزبور با برنامه تهیه شده طراحی بهینه گردیده است.

۷- طراحی بهینهٔ دریچهٔ خروجی سد

با توجه به مثالهای حل شده به کمک برنامهٔ کامپیوتری تنظیم گردیده، صحت عملکرد برنامه، قابل تأیید بوده و از آن می‌توان برای انواع سازه‌ها از جمله دریچه‌های خروجی سدها که سازه‌های حساس و مهمی می‌باشند استفاده نمود در این مقاله، سازهٔ باربر دریچهٔ خروجی سد ساوه که برای تخلیه ماکزیمم ۱۲۵ متر مکعب آب در ثانیه پیش‌بینی شده و ماکزیمم هد آب پشت دریچه تا محور آن برابر با ۷۱ متر می‌باشد و برای دو حالت بارگذاری (حالت الف : دریچه بسته، حالت ب : دریچه در شرف بازشدن می‌باشد) طراحی بهینه پیوسته و گسسته گردیده است [۱۹] .

سازهٔ انتخابی دریچه شبکه دو لایه فضایی فرض گردیده، (مطابق شکل ۴) دریچه از نوع چرخدار بوده که با ۴ چرخ نصب شده در گره‌های ۱، ۲، ۳ و ۴ در جهت قائم می‌تواند باز و بسته شود و نیروهای وارده به گره‌های مختلف برای دو حالت بارگذاری فوق‌الذکر محاسبه و بشرح زیر می‌باشد.

۷-۱- نیروهای وارده به گره‌های مختلف دریچه در حالتی که دریچه کاملاً بسته است (حالت بارگذاری الف).

۷-۱-۱- نیروهای عمودی بر دریچه (در جهت محور Z).

$F_5 = F_7 = -22600$ kg

$F_4 = -45200$ kg

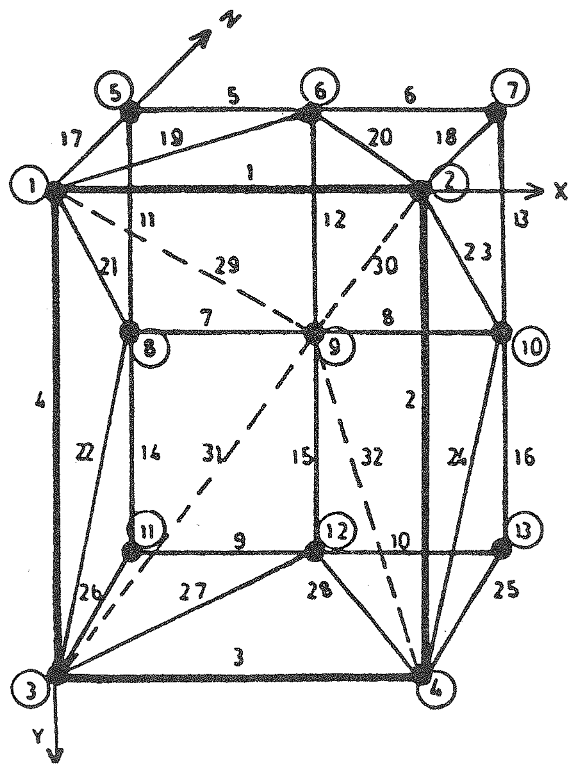
$F_8 = F_{10} = -46500$ kg

جدول (۱) جواب طراحی بهینه مثال ۱

شماره اعضاء	سطح مقطع اعضاء (in^2)			
	سطح اولیه	نتایج طراحی پیوسته	نتایج بهینه گسسته	نتایج مرجع پیوسته [۱]
۱	۲۰/۰	۷/۹	۷/۵۰	۷/۹
۲	۲۰/۰	۰/۱	۰/۵۰	۰/۱۰
۳	۲۰/۰	۰/۱	۰/۵	۰/۱۰
۴	۲۰/۰	۳/۹	۳/۵۰	۳/۹۰
۵	۲۰/۰	۸/۱	۸/۵۰	۸/۱۰
۶	۲۰/۰	۰/۱	۰/۱۰	۰/۱۰
۷	۲۰/۰	۵/۸	۶/۰	۵/۸۰
۸	۲۰/۰	۵/۵۲	۵/۰	۵/۵۱
۹	۲۰/۰	۰/۱۴	۰/۵	۰/۱۴
۱۰	۲۰/۰	۳/۶۸	۳/۵۰	۳/۶۷
وزن (*Lbs*)	۸۳۹۲/۹	۱۵۰۰/۰	۱۵۰۵/۰	۱۴۹۷/۶
تعداد آنالیز	-	۷	۷	۱۶

جدول (۲) نتایج طراحی بهینه مثال ۲

مفروضات اولیه		طراحی بهینه پیوسته		طراحی بهینه گسسته	
شماره اعضاء	سطح مقطع اعضاء (in^2)				
	سطح اولیه	نتایج این نوشتار	نتایج مرجع [۱]	نتایج این نوشتار	نتایج مرجع [۱۶]
۱	۲۰/۰	۳۰/۰۸	۳۰/۶۷	۳۰/۰	۳۰/۵۰
۲	۲۰/۰	۰/۵۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰
۳	۲۰/۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۵۰
۴	۲۰/۰	۱۴/۳۸	۱۴/۵۹	۱۴/۵	۱۵/۰
۵	۲۰/۰	۲۴/۸۸	۲۳/۷۶	۲۵/۰	۲۴/۰
۶	۲۰/۰	۰/۱۰	۰/۱۰	۰/۱	۰/۱۰
۷	۲۰/۰	۸/۴	۸/۵۸	۸/۵۰	۷/۵۰
۸	۲۰/۰	۲۰/۳۳	۲۱/۰۷	۲۰/۵۰	۲۱/۰
۹	۲۰/۰	۰/۵۹	۰/۱۰	۰/۵	۰/۱۰
۱۰	۲۰/۰	۲۰/۴۲	۲۰/۹۶	۲۰/۵۰	۲۱/۵
وزن (*Lbs*)	۸۳۹۲/۹	۵۰۵۵	۵۰۷۶/۹	۵۰۷۲/۰	۵۰۷۷/۹
تعداد آنالیز	-	۱۰	۱۳	۷	۱۶×۵۰۰



شکل (۴) سازه فضایی دریچه خروجی سد

$F_9 = -93000$ kg

$F_{11} = F_{13} = -28800$ kg

$F_{12} = -57600$ kg

۷ـ۱ـ۲ـ نیروهای وارده در راستای قائم (در جهت محور y).

$F_{11} = F_{12} = F_{13} = -845$ kg

$F_3 = F_4 = -1265$ kg

۷ـ۲ـ نیروهای وارده به گره‌های مختلفهٔ سازهٔ دریچه هنگامی که دریچه در شرف باز شدن می‌باشد (حالت بارگذاری ب).

۷ـ۲ـ۱ـ نیروهای عمود بر دریچه در جهت محور Z مطابق نیروهای بند (۷ـ۱ـ۱) می‌باشد.

۷ـ۲ـ۲ـ نیروهای وارده در راستای قائم (در جهت محور y).

$F_1 = F_2 = 7350$ kg

$F_3 = F_4 = 4675$ kg

$F_5 = F_7 = -3865$ kg

$F_6 = -2535$ kg

$F_8 = F_9 = F_{10} = 614$ kg

$F_{11} = F_{12} = F_{13} = -5205$ kg

۷ـ۳ـ طراحی بهینهٔ دریچهٔ خروجی سد

با توجه به نیروهای محاسبه شدهٔ فوق و با درنظرگرفتن مفروضات زیر، دریچهٔ مزبور برای دو حالت بارگذاری، طراحی بهینهٔ پیوسته و گسسته گردیده که نتایج حاصله (وزن حداقل و مقادیر متغیرهای طرح) در جدول (۳) درج گردیده است.

- متغیرهای طرح سطح مقطع اعضای سازه فضایی دریچه می‌باشند.
- تنشهای‌فشاری‌وکششی‌ماکزیمم(محدودیتهای طرح) بر اساس دستور آیین‌نامه IS - 4622 - 1967، برابر ۱۲۶۰ kg/cm^2 درنظر گرفته شده‌اند.
- سطح مقطع حداقل اعضاء ۱ cm^2 فرض شده است.
- سطح مقطع حداکثر اعضاء ۲۰۰ cm^2 فرض شده است.
- تعداد متغیرهای طرح ۱۲ متغیر انتخاب شده است.
- سطح مقطع متغیرهای گسسته عبارتند از :

$$D_i \in \{1, 1.5, \dots 10, 11, \dots, 20, 22, \dots, 40, 42.5, \dots, 60, 63, \dots, 90, 94, \dots, 110, 115, \dots\}\ cm^2$$

لذا با عنایت به موارد فوق و مشاهده نتایج، جوابها منطقی وقابل قبول بوده و با مبانی طرح مغایرتی ندارند. ضمناً چنانچه شکل سازه بهینه گردد، تفاوت بین سطح مقطع اعضاء کم خواهد شد.

ضمناً نمودارهای شکل (۵) وزن سازهٔ مثالها و دریچهٔ انتخابی را در مراحل مختلف طرح بهینه پیوسته و گسسته نشان می‌دهد.

۸ـ نتیجه‌گیری

با توجه به مثالهای حل شده و مقایسهٔ نتایج با جوابهای آمده در مراجع می‌توان به سرعت و دقت روش استفاده شده پی برد و چنین نتیجه گیری نمود.

۱ـ استفاده از محاسبات تقریبی نیروها و تغییر شکلها زمان لازم برای طراحی بهینه توسط کامپیوتر را به مقدار قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد (حدود ۳۰ برابر).

۲ـ دقت جوابهای حاصله در هر دو مرحله طراحی بهینه پیوسته و گسسته (با کمک محاسبات تقریبی) در مقایسه با جوابهای آمده در مراجع (بدون کمک محاسبات تقریبی) بسیار خوب و قابل قبول می‌باشد.

۳ـ بنا به موارد فوق امکان بهره‌وری از برنامهٔ طراحی بهینه برای سازه‌های سنگین با این روش میسر می‌باشد.

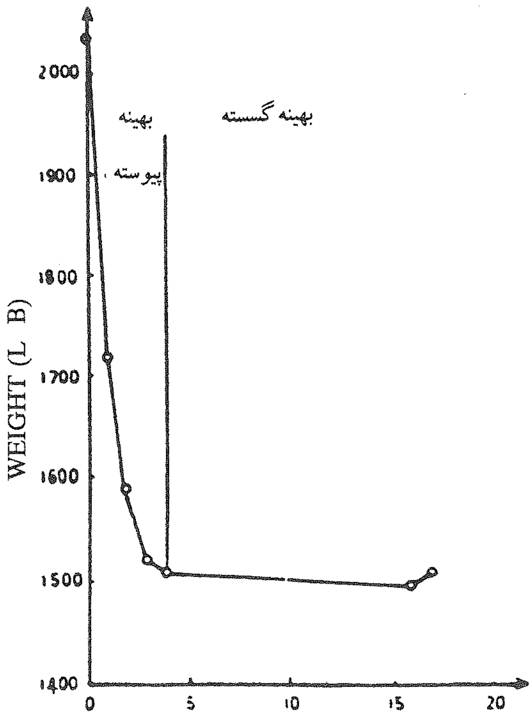
۴ـ باکمک روش توابع جریمه و ترکیب آن با روشهای تقریبی، امکان طراحی بهینهٔ گسسته فراهم بوده و لذا می‌توان براحتی مقادیر گسستهٔ متغیرها را از جدول استاندارد مورد استفاده قرار داد.

۵ـ با توجه به دقت حاصله، با اطمینان می‌توان در طراحی بهینهٔ سازهٔ دریچه‌های سد از این روش استفاده نمود.

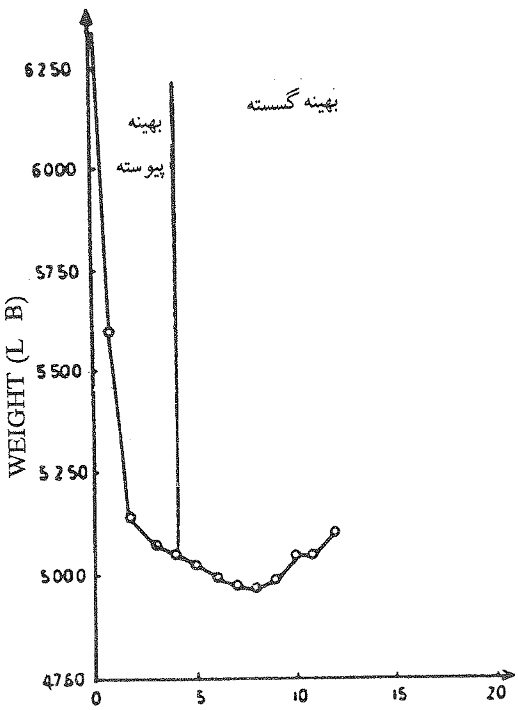
۶ـ استفاده از توابع جریمه و ترکیب آن با روشهای تقریبی در طراحی بهینهٔ گسسته کار جدیدی بوده که نتایج حاصله موفقیت روش را نشان می‌دهد.

جدول (۳) نتایج طراحی بهینه دریچه خروجی انتخاب شده

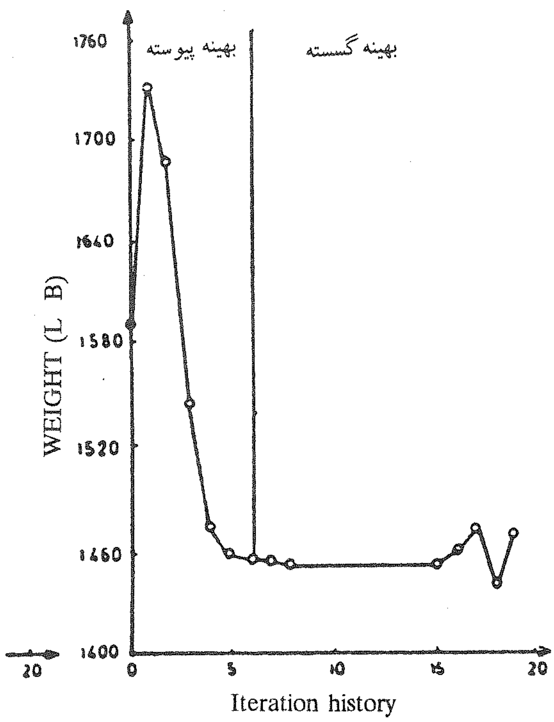
شماره اعضاء	سطح مقطع حالت الف (cm^2)			سطح مقطع حالت ب (cm^2)	
	سطح اولیه	طراحی بهینه پیوسته	طراحی بهینه گسسته	طراحی بهینه پیوسته	طراحی بهینه گسسته
۱،۳،۵،۶،۷،۸،۹، ۱۰،۱۱،۱۲،۱۳	۴۵/۰	۱/۰۲	۱/۰	۳/۱۱۰	۳/۰
۲،۴	۴۵/۰	۱۱۲/۹۰	۱۱۵/۰	۱۰۳/۰۷	۱۰۲/۰
۱۴،۱۶	۴۵/۰	۱۳/۱۳	۱۳/۰	۱۱/۱۵	۱۱/۰
۱۵	۴۵/۰	۲۶/۷۷	۲۶/۰	۲۴/۱۹	۲۴/۰
۱۷،۱۸	۴۵/۰	۱۸/۰۶	۱۸/۰	۲۰/۱۳	۲۰/۰
۱۹،۲۰	۴۵/۰	۴۱/۸۱	۴۲/۵۰	۴۲/۹۳	۴۲/۵۰
۲۱،۲۳	۴۵/۰	۶۱/۳۵	۶۰/۰	۵۹/۲۰	۵۷/۵۰
۲۲،۲۴	۴۵/۰	۴۶/۰۸	۴۵/۰	۵۱/۰۷	۵۰/۰
۲۵،۲۶	۴۵/۰	۲۶/۷۳	۲۶/۰	۲۹/۱۵	۲۸/۰
۲۷،۲۸	۴۵/۰	۵۴/۹۶	۵۵/۰	۵۶/۲۲	۵۵/۰
۲۹،۳۰	۴۵/۰	۷۷/۹۲	۷۸/۰	۷۷/۱۶	۷۸/۰
۳۱،۳۲	۴۵/۰	۵۴/۶۴	۵۵/۰	۵۷/۶۳	۵۷/۵۰
وزن	۱۵۷۴/۰	۱۴۲۷/۰	۱۴۳۲/۰	۱۴۲۵/۰	۱۴۰۹/۰
تعداد آنالیز	-	۷	۱۱	۵	۱۱/۰



مثال (۱)



مثال (۲)



دریچه انتخابی

شکل (۵)   وزن سازه مثالها و دریچه در مراحل مختلف طرح بهینه

مراجع

[1] *Schmit, L.A., and Miura, H., "Approximation Concepts for Efficient Structural Synthesis", NASA CR-2552, 1976.*

[2] *Schmit, L.A., and Fleury, C., "Discrete - Continuous Variables Structural Synthesis Using Dual Methods", AIAA J., 18, 1515-1524,1980.*

[3] *Salajegheh, E., "Optimum Design of Double Layer Grids", in "Proc. 3rd Int. Conference on Space Structures", held at the Univ. of Surrey, England, H. Nooshin (Editor), Elsevier Applied Publishers, London, 661-668, 1984.*

[4] *Salajegheh, E., "Efficient Optimum Design of Structures", in "Porc. 4th Int. Conference on Space Structures", held at the Univ. of Surrey, England, G.A.P. Parke and C.M. Howard (Editors), Thomas Telford Services Ltd., London, 1735-1745, 1993.*

[5] *Salajegheh, E., "Structural Optimization Technique Involving Discrete Design Variables", in "Proc. 2nd Asian - Pacific Conference on Computational Mechanics", held at the Univ. of New South Wales, Australia, S.Vallappan, V.A. Pulmano and F.Tin-Loi (Editors), Balkema, Rotterdam, 975-980, 1993.*

[6] *Salajegheh, E., "Approximate Discrete Variable Optimization of Frame Structures with Dual Methods", in "Proc. 17th Energy - Sources Technology Conference & Exhibition (ETCE)" held at the University of Texas, USA. ASME 1994, PD Vol.61, Tribology Symposium, 81-89, 1994.*

[7] *Salajegheh, E., "Optimum Design of Plate and Shell Sturctures with Discrete Disign Variables", In proc. of the Second International Conference on Computational Structures Technology, Civil Comp. Ltd., Edinburgh, Scotland, B.H.V. Topping and M. Papadrakakis (Editors), Advances in Structural Optimization, 187-193, 1994.*

[8] *Salajegheh, E., "A Tow Level Approximation Technique for structural Optimization", In Press in the Journal of Engineering, Islamic Republic of Iran, 1994.*

[9] *Salajegheh, E., "Optimum Design of Structures with Reference to Space Structures", Accepted for the Int. Conf. on Lightweight Structures in Civil Engineering, 25-29 Sep. 1995, Warsaw, Poland, 1995.*

[10] *Salajegheh, E., and Vanderplaats, G.N., "An Efficient Approximation Method for Structural Synthesis with Reference to Space Structures", Int. J. of Space Structures, 2, 165-175, 1986/87.*

[11] *Vanderplaats, G.N., and Salajegheh, E., "An Efficient Approximation Technique for Frequency Constraints in Frame Optimization", Int. J. for Numerical Methods in Engineering, 26, 1057-1069, 1988.*

[12] *Vanderplaats, G.N., and Salajegheh E., "A New Approximation Method for Stress Constraints in Structural Synthesis", AIAA J., 27, 352 - 358, 1989.*

[13] *Vanderplaats, G.N., and Thomas, H.L., "An Improved Approximation for Stresses Constraints in Plate Structures", Structural Optimization, 6, No. 1, 1-7 , 1993.*

[14] *Salajegheh, E. and Vanderplaats, G.N., "Efficient Optimum Design of Structures with Discrete Design Variables", Int. J. space Structures, 8, No.3, 199-208, 1993.*

[15] *Salajegheh, E., and Vanderplaats, G.N., "Optimum Design of Trusses with Discrete Sizing and Shape Variables", Structural Optimization, 6, No.2, 79-85. 1993.*

[16] *Shin, D.K., Gurdal, Z., and Griffin, O.H., JR., "A Penalty Approach for Nonlinear Optimization with Discrete Design Variables", Engineering Optimization, 16, 29-42, 1990.*

[17] *Vanderplaats, G.N., Numerical Optimization*

Techniques for Engineering Design: With Applications, McGraw - Hill, Inc., New York, 1984.

[18] *Haftkà, R.P., and Gurdal, Z., Elements of Structural Optimization, Kluwer Academic Publishers, Netherlands, 1992.*

[19] *Salajegheh, J., "Continuous and Discrete Optimization of outlet Gates Via Penalty Approachesand Approximation Concepets", M.Sc. Dissertation Civil Engineering Department, University of Kerman, Iran, 1994.*