دانشگاه صنعتی شاهرود
دانشکده عمران و معماری

عنوان:

بهینه سازی شکل سدهای وزنی و تعیین محل بهینه گالری های سد با استفاده از بهینه سازی توپولوژیک

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر بهروز حسنی

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر احمد احمدی

ارایه دهنده:

حمید فهمیده

تابستان ۱۳۸۵

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

تقدیر و تشکر

در ابتدا بر خود لازم می دانم از پدر و مادر بزرگوارم که همواره در تمام مراحل زندگی مرا یاری نموده اند تشکر نمایم.

در ادامه از استاد راهنمای ارجمند و فرزانه جناب آقای دکتر بهروز حسنی که درطول انجام این تحقیق از هیچ کمکی دریغ ننمودند، کمال تشکر را دارم. از استاد مشاورم جناب آقای دکتر احمد احمدی به جهت حمایت ها و کمک هایشان تشکر می نمایم. همچنین از دوست عزیز و بزرگوارم جناب آقای مهندس توکلی به لحاظ کمک های بی دریغشان کمال تشکر را دارم.

در ادامه از همسرمهربانم و تمام کسانی که در طول انجام این تحقیق مرا یاری نمودند تشکر می نمایم.

حمید فهمیده

تابستان ۱۳۸۵

تقدیم به همسر مهربان و دلسوزم

فهرست مطالب .... شماره صفحه

چکیده مطالب

یکی از عوامل مهمی که بشدت باعث افزوده شدن زمان محاسبات و دشواری حل مسائل بهینه سازی می شود، تعداد متغیرهای طراحی[1] می باشد. بدین ترتیب اگر بتوانیم تعداد متغیرهای طراحی را کاهش دهیم، با سرعت و احتمال بیشتری به سمت جواب بهینه همگرا خواهیم شد.[۱] به طور کلی می توانیم این پایان نامه را به سه بخش تقسیم کنیم.

در بخش اول به معرفی سد های وزنی و انواع آنها از جهات مختلف، نیروهای واده و چگونگی محاسبه این نیروها و همچنین انواع مختلف گالری ها ، لزوم وجود گالری ها در سد، شکل و محل گالری ها پرداخته ایم. بخش دوم مربوط به بهینه سازی می باشد. که در این بخش اهمیت بهینه سازی سازه ها و کاربرد آن در علوم مهندسی بیان شده است. در ابتدا به بهینه سازی توپولوژیک سازه ها پرداخته شده است. در این رساله هدف اصلی ما از بهینه سازی توپولوژیک، تعیین محل گالری های سد می باشد که این کار با استفاده از روش معیار بهینگی[2] با استفاده از شرایط کان_تاکر و به کار گیری مدل مواد مصنوعی انجام شده است. در ادامه بهینه سازی شکل و انواع آن توضیح داده شده است که در این پایان نامه از روش CA[3] استفاده شده است. بخش سوم به کاربرد روش های فوق در تعیین شکل بهینه سدهای وزنی و همچنین محل بهینه گالری های این نوع سدها اختصاص دارد که در این بخش با حل چندین مثال، کاربرد بهینه سازی توپولوژیک و شکل سازه ها به ترتیب در تعیین محل گالری ها و همچنین شکل سدهای وزنی نشان داده شده است.

واژگان کلیدی:

بهینه سازی توپولوژی، بهینه سازی شکل، سدهای وزنی، گالری.

[1] Design Variable
[2] Optimality Criteria
[3] Cellular Automata

فصل اول : پیش گفتار

۱-۱-اهداف کلی

با مراجعه به تاریخ و یادداشت‌های گذشتگان معلوم و مسلم می‌گردد که از زمان‌های بسیار دور و قدیم از موقعی که بشر، متمدن و شهرنشین گردیده است بـرای مهـار کـردن آب‌هـای جـاری در سطح کره خاک و استفاده از آب به میل و دلخواه خـود در امـر حیـات، اقـدام بـه سـاختن بنـدها و سدهای کوچک و بزرگ نموده است. تا این که فنّ سدسازی در این اواخر به حد اعلای تکامل خـود رسیده و سدهای عظیم در گوشه و کنار جهان ساخته شده است و هر روز نیز روش‌هـای تـازه‌ای در امر سدسازی از طرف اهل فن ارایه می‌شود تا بشر بتواند با غلبه بر امر طبیعت و استفاده از انـرژی و کاربرد آب در زندگی موفق و کامیاب گردد.[۱۸]

از طرف دیگر با توجه به اهمیت و هزینه بالای اجرای این سازه ها (سدها)، طراحی و اجرای بهینـه این نوع سازه ها ضروری به نظر میرسد.

در قسمت اول این پایان نامه به تحقیق در مورد انواع سـدهای وزنـی و همچنـین انـواع گـالری هـا پرداخته شده است. از اهداف این قسمت می توان به بررسی انواع نیروهای وارد بـر ایـن سـازه هـا و تعیین نیروی غالب وارد بر سد به منظور ایجاد شکل و توپولوژی بهینه اشاره کرد.

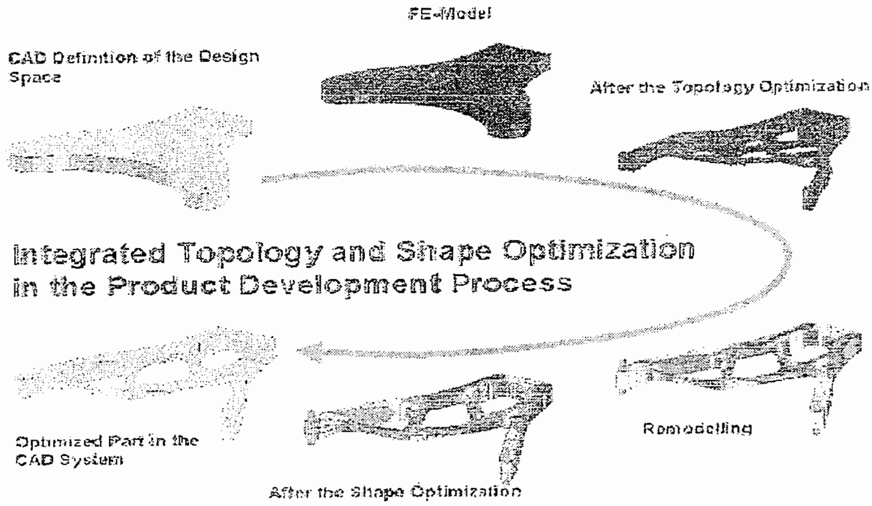
یکی از علومی که امروزه به شدت موردتوجه ریاضیدانان، محققـین، مهندسـین و غیـره اسـت، علـم بهینه سازی می باشد. درحیطه کارهـای مهندسـی، یکـی از مـشکلات همیـشگی مهندسـان سـازه، مکانیک و غیره، ساخت و تولید سازه ها و قطعاتی است که علاوه بر دارابودن کـارآیی مـوردنظر، بـه لحاظ اقتصادی نیز مقرون به صرفه باشند و این مساله همواره ذهن آنها را مشغول کرده است. بـرای برآورده کردن خواسته های آنها بایستی به علم بهینه سازی پرداخته و به آن توجهی وافر داشت.

مسائل بهینه سازی را می توان در سه رده مختلف دسته بندی نمود که عبارتند از بهینه سازی توپولوژی، شکل و ابعاد[1] سازه.[۱]

1- Topology, Shape and Size Optimization

محققین با تحقیقات بیشتر در زمینه بهینه سازی سازه ها سعی در یافتن مرزهای بهینه یک سـازه نمودند. پیداکردن مرزهای بهینه سازی که با استفاده ازفرضیات تنش وکرنش مسطح مدل شده ویـا پیداکردن محل بهینه اتصالات اسکلت یک سازه قاب یا خرپا نمونـه هـای ازایـن نـوع بهینـه سـازی می باشند. این نوع بهینه سازی درتقسیم بندی مسائل بهینه سازی سازه ها به بهینـه سـازی شـکل معروف است. در این مسائل مرزهای فضای طراحی ثابت نیستند اما توپولوژی فضای طراحـی ثابـت است. بهینه سازی شکل را میتوان در مرحله طرح مقدماتی از مراحل طراحی یـک سـازه بکـار بـرد. برای طرح یک سازه بهینه، استفاده ازروشهای بهینه سازی ابعادی وشکل کافی نبوده ولازم است که توپولوژی بهینه فضای طراحی معلـوم باشـد. بـرای غلبـه بـر ایـن مـشکل میتـوان از بهینـه سـازی توپولوژیک استفاده نمود.[۱] بعنوان نمونه در بهینه سازی توپولوژیک سازه های دوبعدی وسه بعدی درمحیطهای پیوسته هدف، محاسبه شکل وتعداد سوراخها ومحل قرارگیری آنهاسـت. بهینـه سـازی توپولوژیک درمرحله تصمیم گیری درمورد سیـستم سـازه ای از مراحـل طراحـی یـک سـازه مـورد استفاده قرار گیرد.

بدین ترتیب برای بدست آوردن یک طرح مهندسی بهینـه مـی بایـست ابتـدا توپولـوژی سـازه بااستفاده از بهینه سازی توپولوژیک مشخص گرددوسپس با استفاده از بهینـه سـازی ابعـادی وشـکل مشخصات هندسی دقیق وبهینه آن تعیـین شـود. در۱-۱مراحـل طراحـی یـک قطعـه سـازه ای بـا استفاده از بهینه سازی توپولوژیک وبهینه سازی شکل نشان داده شده است.[۱۷]



شکل ۱-۱-مراحل طراحی یک قطعه سازه ای با استفاده از بهینه سازی توپولوژیک و شکل

در قسمت دوم این پایان نامه بهینه سازی توپولوژیک و شکل سازه ها در محیط های پیوسته که کلیه مسائل الاستیسیته را در بر می گیرند و با فرضیات تنش و کرنش مسطح مدل شده اند، مورد نظر می باشند و برای این منظور برای بهینه سازی توپولوژیک[1] از روش معیار بهینگی[2] و برای بهینه سازی شکل از روش CA [3] استفاده شده است. از جمله اهداف این پایان نامه پیاده سازی یک برنامه بهینه سازی توپولوژیک و شکل سازه ها در مسائل کرنش مسطح می باشد.

به عنوان مثال درمورد یک خرپا، هدف از بهینه سازی توپولوژی، بدست آوردن تعداد بهینه اعضای خرپا می باشد. دربهینه سازی شکل سازه ها هدف اصلی پیداکردن بهترین موقعیت مرزهای سازه است. برای مثال اگر خرپایی را در نظر بگیرید، حل مساله بهینه سازی شکل خرپا، منجر به حل مساله ای می شود که جواب آن بهترین موقعیت مکانی گره های خرپا خواهدبود و متغیرهای طراحی مساله بهینه سازی، مختصات گره های دو سر اعضای خرپا می باشد. نوع دیگر مسائل بهینه سازی، ابعاد می باشد که برای یک سازه خرپایی به مفهوم بدست آوردن حداقل سطح مقطع

---
[1] Topology Optimization
[2] Optimality Criteria
[3] Cellular Automata

موردنیاز است. هرکدام از موارد نامبرده شده، نکات و پیچیدگی های خاص خودش را دارد. اما در مسائل واقعی به ترکیبی از هر سه مورد بر میخوریم و می خواهیم سازه ای با توپولوژی، شکل و ابعاد بهینه داشته باشیم. در این حالت مساله بقدری بغرنج می شود که ناگزیر بایستی ازکامپیوترهایی با توانایی بسیار بالا استفاده کنیم. برای حل اینگونه مسائل حتی با کامپیوترهای پیشرفته امروزی گاه به ساعتها، روزها و یا هفته ها زمان نیاز است.[۱]

یکی از عوامل مهمی که بشدت باعث افزوده شدن زمان محاسبات و دشواری حل مسائل بهینه سازی می شود، تعداد متغیرهای طراحی[1] می باشد. بدین ترتیب اگر بتوانیم تعداد متغیرهای طراحی را کاهش دهیم، با سرعت و احتمال بیشتری به سمت جواب بهینه همگرا خواهیم شد.[۱] همانطوریکه در بالا گفته شد دراین پایان نامه هدف اصلی بهینه سازی شکل سدهای وزنی و بهینه سازی توپولوژی محل گالریها میباشد که در بهینه سازی شکل آن از روش CA استفاده کرده ایم. همچنین بهینه سازی توپولوژی، به روش معیار بهینگی با استفاده از شرایط کان تاکر و بکارگیری مدل مواد مصنوعی انجام می شود.

۱-۲- بهینه سازی توپولوژیک سازه ها

بهینه سازی توپولوژیک برای طراح وسیله ای است که به اوامکان میدهد با جابجاکردن ویاپخش مواد در فضای طراحی توپولوژی مناسب برای سازه اولیه را انتخاب کند. بهینه سازی توپولوژیک سازه ها ترکیب پیچیده ای از مسائل بهینه سازی شکل وابعادی میباشد. بطور معمول در بهینه سازی شکل با استفاده از روش تغییرات مرزی به چندین بار تغییر شبکه المانهای مدل نیاز است وطرح بهینه نهایی به لحاظ توپولوژیکی همانند طرح اولیه است. بنابرین سعی برای تغییر دادن توپولوژی سازه در حین بهینه سازی شکل سبب پیچیده شدن مسئله میشود.[۱]

روشهای یافتن توپولوژی بهینه به دودسته تقسیم میشوند. دسته اول روشهایی هستند که بر پایه واساس ریاضی استوارند ودسته دوم روشهایی میباشند که برمبنای تجربه ودرک مهندسی بدست

[1] - Design Variable

آمده اند.[۱] از دسته اول میتوان به روشهایی که بر پایه تئوری همگن سازی استوارند اشاره نمـود و از دسته دوم میتوان روشهای حذف کامل ویاحذف تدریجی را نام بـرد. در ایـن پایـان نامـه از روش معیار بهینگی با استفاده از شرایط کان_تاکر وبکارگیری مـدل مـواد مـصنوعی، بـرای بهینـه سـازی سازه های سه بعدی و دوبعدی تنش و کرنش مسطح استفاده می شود. به این روش، روش SIMP اطلاق می شود.

۱-۳-بهینه سازی شکل سازه ها

روش HCA روشی برای تسهیل بهینه سازی توپولوژی و شکل سازه می باشـد. متـدولوژی HCA برای استفاده در سازه های پیوسته ایجاد شـده اسـت کـه از رونـد زیـست شـناختی رشـد لایـه ای استخوان الهام گرفته است. در رشد لایه ای استخوان فقط المان هایی که روی سطح ترکیب معدنی شده قرار دارند می توانند چگالی شـان را در طـول رونـد سـاخت ترکیـب تغییـر دهنـد.[۱۱] روش HCA شامل قوانین طراحی محلی بر پایه الگوی CA و روش المان محدود می باشد. کنترل حلقه بسته در اصلاح توزیع جرم روی سطح خارجی و داخلی دامنه طراحی برای یافتن یـک سـازه بهینـه مورد استفاده قرار می گیرد. کنترل محلی تعادل بین جرم و صلبیت سازه را حفظ می کند.[۱۲] در این پایان نامه از قوانین طراحی محلی بر اساس روش CA برای بهینه سازی شـکل سـازه اسـتفاده کرده ایم.

فصل دوم: معرفی سدهای وزنی و انواع گالری ها

۲-۱-مقدمه

سد، در لغت به معنی بستن و بند آوردن می‌باشد که مفهوم آن دراین رساله به ساختمان‌هـایی اطلاق می‌گردد که جهت ذخیره و مهار کردن یا برای بالا آوردن سطح طبیعی آب و انحـراف مـسیر طبیعی آن ساخته می‌شود.[۱۹]

از آنجایی که آب در حیات انسان و تمامی موجودات نقش اساسی داشته و از ارکان حیات محـسوب می شود، انسان ها از دیرباز به فکر کنترل و استفاده بهینه از آن بوده اند. سد سازی انـسان هـا نیـز تقریبا در همین راستا است، یعنی تامین آب شرب، ذخیره برای روزهای خـاص، رونـق کـشاورزی و دامداری، پرورش آبزیان خوراکی نظیر ماهی و میگو، تامین برق، تعدیل آب و هوا، ایجاد مناظر زیبـا و در نهایت مکانی برای ورزش و تفریح.[۱۸]

ساخت سدها به محاسبات فیزیکی و زمین شناسی زیادی احتیـاج داشـته تـاپس از احـداث در اثـر تخریب ناخواسته به تاسیسات انسانی آسیب نرساند. انرژی حاصل از جمع شدن آب بـه حـدی زیـاد است که مسئولین تعمیر و نگهداری آن به صورت شیفت های شبانه روزی کـار کـرده و ۲۴ سـاعته تحت کنترل است تا مبادا اتفاق غیر مترقبه ای رخ دهد. این حالت کنترل و تـست در کـشور هلنـد - که با ساخت سدها بر وسعت خاک خود افزوده اند- بیش از دیگر کشورها است. جالب است بدانید از دیرباز ساخت سدها سنگین ترین هزینه های بیمه را در بر داشته است.[۲]

اهداف پروژه سد سازی:

یک پروژه سد سازی ممکن است برای چند منظور استفاده شود که در این صورت به آن طـرح یـک یا چنـد منظوره می گویند. این اهداف می توانند:

۱. آبرسانی(آب مصرفی)
۲. آبیاری برای کشاورزی
۳. مصارف صنعتی
۴. برق آبی
۵. جلوگیری از خسارت سیل

پروژه های سد سازی در سه فاز یا مرحله مختلف انجام می شود. مرحله اول شامل مرحله مطالعات و بررسی ها می باشد که در این فاز کلیه مطالعات مورد لزوم برای کسب اطلاعات پایه ای به منظور تهیه بهترین طرح ها انجام می گیرد. مقصود از بهترین طرح، طرحی است که به نحو شایسته ای:

۱. از لحاظ اقتصادی و اجرایی
۲. از لحاظ فنی

حداکثر کارایی را داشته باشد. فاز دوم فاز تهیه طرح های نهایی است که در این مرحله نقشه های فنی و اجرایی تهیه می شود و در مرحله سوم طرح فوق به اجرا در می آید.

۲-۲-طبقه‌بندی سدها

سدهایی که تاکنون در جهان برای نیل به هدف‌های خاص ساخته شده است، انواع و اقسام مختلفی دارند که در کلیّات شامل:[۱۶]

- سدهای وزنی
- سدهای قوسی
- سدهای پایه‌دار
- سدهای انحرافی

سدهایی که با مواد غیرمتصل ساخته می‌شوند که عبارتند از:

- سدهای خاکی
- سدهای سنگی
- سدهای خاکی و سنگی توأم

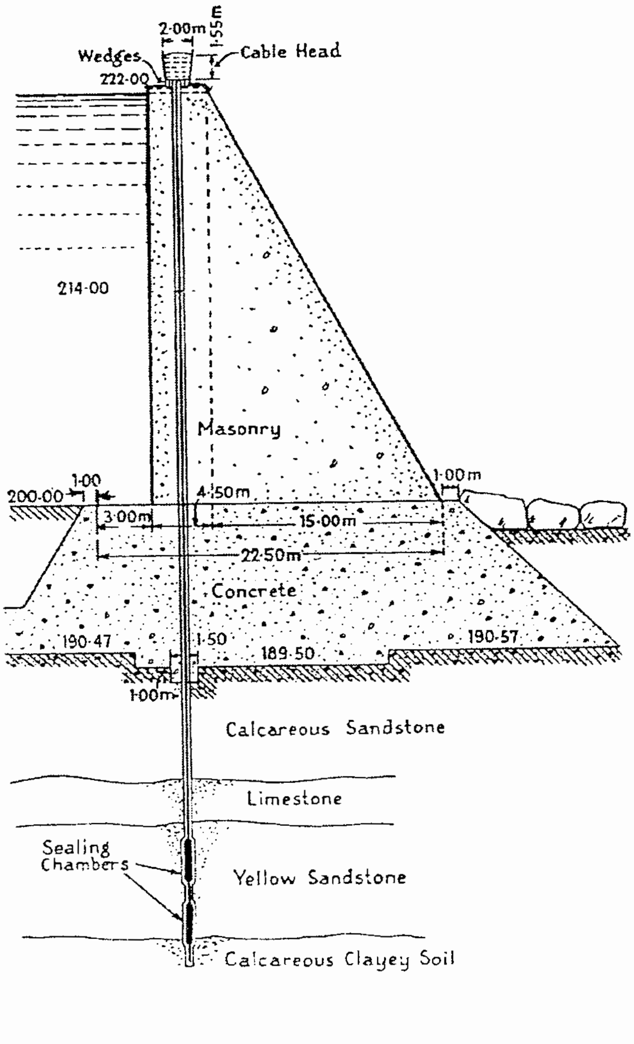
۲-۳-تعریف سدهای وزنی

سدهای وزنی به آن دسته از سدها اطلاق می‌شود که وزن سد در مقابل نیروهای وارده مؤثر بوده و به پایداری سد کمک می‌نماید که به صورت یکپارچه از مصالح ساختمانی به فرم بتنی روی پی‌های سنگی که کاملاً از مواد زاید تمیز شده و دندانه‌های مناسب به خود گرفته باشد، بنا می‌گردند تا بتن با پی سد خوب جفت شده و جسم یکپارچه‌ای را تشکیل می‌دهد.[۱۶]

سدهای وزنی در اشکال ظاهری گوناگون طرح و اجرا می‌گردند، در شکل‌های (۲ـ۱)، (۲ـ۲) و (۲ـ۳) نمونه‌هایی از مقاطع عرضی چند نوع از آنها نشان داده شده است.[۱۶]

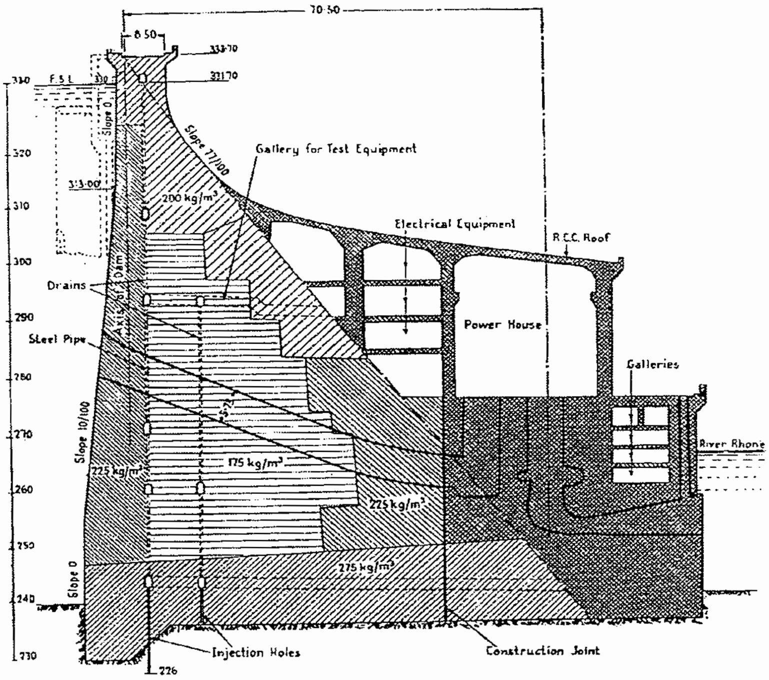
۲-۴- طراحی بدنه یا جسم سد

۱ـ در سدهایی که ارتفاع آنها کم یا متوسط باشد، مجموع تانژانت زاویه‌های قسمت‌های شیب‌دار بالادست و پایین‌دست سد را برابر $(tg\alpha + tg\beta = 0.7)$ انتخاب می‌نمایند.[۱۶]



شکل ۲-۱- سد وزنی با دیواره قائم در بالادست

۲ـ در سدهای وزنی مرتفع مجموع تانژانت زاویه‌های قسمت‌های شیب‌دار بالادست و پایین‌دست سد را مابین دو مقدار $(0.8 \le tg\alpha + tg\beta \le 0.9)$ انتخاب می‌نمایند.[۱۶]



شکل ۲-۲- سد وزنی با دیواره شیب‌دار بالادست

توضیح این که: در هر دو حالت از مجموع تانژانت به اندازه پنج درصد (5٪) برای شیب قسمت بالادست و مابقی را برای پایین‌دست مابین دو مقدار $(0.0 \le tg\alpha \le 0.1)$ تغییر خواهد کرد.

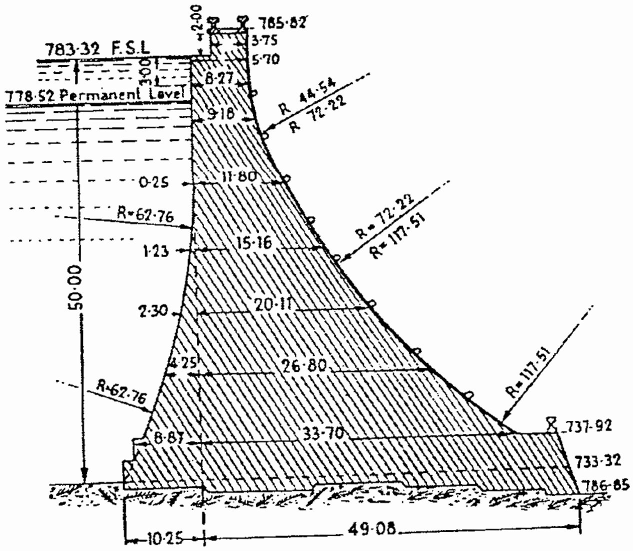
۳ـ برای محاسبه و انتخاب مقدار (L') که عرض تاج سد می‌باشد و برابر ضلع A_1A_1' ذوزنقه $A_1A_1'ED$ می‌باشد، از رابطه زیر استفاده می‌نمایند:

$$L' = A_1A_1' = 0.55\sqrt{H_4} \qquad (۲ـ۱)\ *$$

* در عمل مقدار L' را برای سدهای مرتفع ($0.1H_4$) و برای سدهای کم عرض ($0.15H_4$) در نظر می‌گیرند.[۱۶]

۴ـ برای محاسبه ارتفاع H_2 از سد وزنی چون مقدار زاویه (β) معلوم و مشخص می‌باشد، از رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$H_2 = \frac{L'}{tg\beta} \qquad (۲ـ۲)$$



شکل۲-۳- سد وزنی با دیواره قوسی شکل در بالادست و پایین‌دست

۵ـ شیب قسمت بالادست سد از نقطه (B) شروع می‌شود. موقعیت این نقطه به وسیله رابطه زیر در امتداد (AE) مشخص می‌گردد.

$$AB = H_5 = 2L' \tag{۳ـ۲}$$

۶ـ محاسبه عرض پی سد که با حرف (L) نشان داده شده است با استفاده از رابطه زیر عملی می‌باشد:

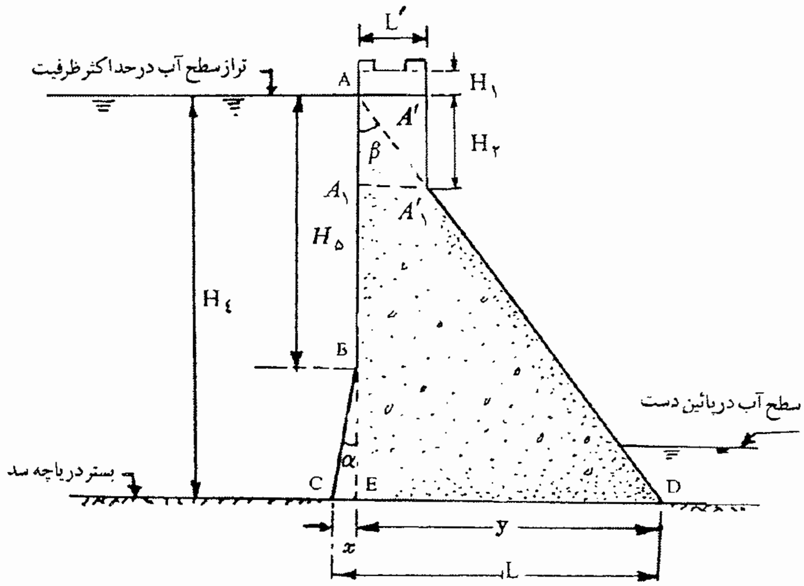
$$L = x + y = (H_4 - H_5)\cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta \tag{۴ـ۲}$$

توضیح این که: مقدار (y) را به وسیله رابطه تجربه زیر نیز می‌توان محاسبه نمود و در هر حال نباید مقدار آن از $(H_4 \cdot tg\beta)$ کمتر باشد.

$$y = \frac{H_4 - 0.4H_1}{\sqrt{D}} \tag{۵ـ۲}$$

H= عمق آزاد برحسب متر

D= وزن مخصوص بتن برحسب تن بر متر مکعب



شکل ۲-۴-برای طراحی بدنه یا جسم سد وزنی

۲-۵-محاسبه سدهای وزنی

محاسبه سدهای وزنی منجر می‌شود به بررسی تعادل سد در برابر نیروهای وارده. روی این اصل ابتدا مقداری نیروهای وارده به سد و لنگرشان را نسبت به نقطه مناسبی از آن محاسبه می‌نمایند و سپس تعادل سد را بررسی می‌کنند. در حالت کلی نیروهای وارد به سدهای وزنی را به دو دسته می‌توان تقسیم کرد:[۱۶]

-نیروهای قائم

- نیروهای افقی

۲-۵-۱-نیروهای قائم وارد به سدهای وزنی

نیروهای قائمی که بر پایه یا پی سدهای وزنی وارد می‌شوند، شامل تقسیم‌بندی زیر می‌باشند:

الف) نیروهای قائم وارده از طرف وزن خود سد

ب) نیروهای قائم فشار آب از قسمت‌های مختلف

ج) نیروی قائم وارده از طرف وزن مواد رسوبی

د) نیروی قائم وارده از طرف زمین‌لرزه

الف) نیروهای قائم وارده از طرف وزن خود سد

برای محاسبه نیروهای قائم وارده از طرف وزن خود سد به پی آن، ابتدا برابر شکل (۲ـ۵) سد را به قطعات مختلف تقسیم کرده و نیروی وزن هر قسمت یا قطعه را جداگانه محاسبه می‌نمایند. چنانکه شکل نشان می‌دهد، آن را به چهار قسمت تقسیم کرده‌اند. این تقسیم‌بندی اختیاری بوده و برای سادگی محاسبات انجام می‌یابد.[۱۶]

توضیح این که: در عمل تمامی محاسبات را برای واحد طول سد انجام می‌دهند و از نظر کلی برای محاسبه نیروی وزن هر قسمت از سد، ابتدا حجم آن قسمت را برآورد کرده و به وزن مخصوص مصالح به کار رفته ضرب می‌نمایند تا وزن و یا نیروی قائم وارده از آن قسمت به پی محاسبه و برآورد گردد. در نتیجه مطابق شکل (۲ـ۵) می‌توان نوشت:

$$V_1 = H_1 \cdot L' \times 1^m \qquad (۲\text{ـ}۶)$$

$$F_1 = V_1 \cdot D \qquad (۲\text{ـ}۷)$$

V_1= حجم قطعه شماره (۱) برحسب متر مکعب

F_1= نیروی قائم وارده از این قطعه برحسب تن

D= وزن مخصوص بتن برحسب تن بر متر مکعب

نیروی F_1از مرکز ثقل قطعه (۱) گذشته و در امتداد قائم، در نقطه C_1 که فاصله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۸) محاسبه می‌شود، اثر می‌نماید.

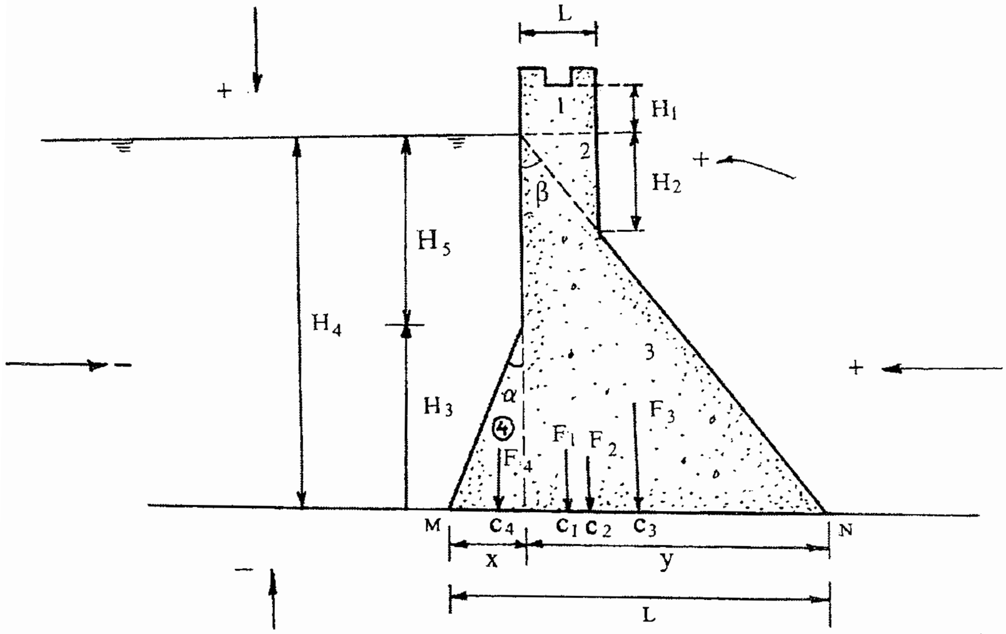
$$C_1N = y - \frac{1}{2}L' = H_4 \cdot tg\beta - \frac{1}{2}L' \qquad (۲\text{ـ}۸)$$

برای محاسبه لنگر این نیرو نسبت به نقطه N می‌توان نوشت:

$$M_N F_1 = F_1 \times C_1N = H_1 \cdot L' \cdot D \times 1^m (H_4 tg\beta - \frac{1}{2}L') \qquad (۲\text{ـ}۹)$$

$M_N F_1$= لنگر نیروی F_1 نسبت به نقطه N برحسب تن متر

β = زاویه قسمت شیب‌دار پایین‌دست سد با صفحه قائم برحسب درجه



شکل ۲-۵- برای محاسبه نیروهای قائم وارد شده توسط خود سد

۱-تذکر: برای محاسبه نیروی وزن قطعات دیگر نیز همین روش را به کار بـرده و محاسـبات را به ترتیب زیر انجام می دهند:[۱۶]

$$V_2 = \frac{1}{2}H_2 \cdot L' \times 1^m \quad (۲\_۱۰)$$

$$F_2 = V_2 \cdot D = \frac{1}{2}H_2 \cdot L' \cdot D \times 1^m \quad (۲\_۱۱)$$

نیروی F_2 از مرکز ثقل قطعه (۲) گذشته و در امتـداد قـائم و در نقطـه C_2 کـه فاصـله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۱۲) برآورد می‌شود، به پی سد اثر می‌نماید.

$$C_2N = y - \frac{2}{3}L' = H_4 \cdot tg\beta - \frac{2}{3}L' \quad (۲\_۱۲)$$

لنگر نیروی F_2 نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۱۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$M_N F_2 = F_2 \times C_2 N = \frac{1}{2}H_2 \cdot L' \cdot D \times 1^m (H_4 \cdot tg\beta - \frac{2}{3}L') \quad (۲\_۱۳)$$

$$V_3 = \frac{1}{2}H_4 \cdot y \times 1^m = \frac{1}{2}H_4^2 \cdot tg\beta \times 1^m \quad (۲\_۱۴)$$

$$F_3 = V_3 \cdot D = \frac{1}{2} H_4^2 \cdot D \cdot tg\beta \times 1^m \qquad (۱۵\_۲)$$

نیروی F_3 از مرکز ثقل قطعه (۳) گذشته و در امتداد قائم و در نقطه C_3 که فاصله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۱۶) برآورد می‌شود، به پی سد اثر می‌نماید.

$$C_3N = \frac{2}{3} y = \frac{2}{3} H_4 \cdot tg\beta \qquad (۱۶\_۲)$$

لنگر نیروی F_3 نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۱۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$M_N F_3 = F_3 \times C_3N = \frac{1}{4} H_4^3 \cdot D \cdot tg\beta \times 1^m \qquad (۱۷\_۲)$$

$$V_4 = \frac{1}{2} H_3 \cdot x \times 1^m = \frac{1}{2} H_3^2 \cdot tg\alpha \times 1^m \qquad (۱۸\_۲)$$

$$F_4 = V_4 \cdot D = \frac{1}{2} H_3^2 \cdot D \cdot tg\alpha \times 1^m \qquad (۱۹\_۲)$$

نیروی F_4 از مرکز ثقل قطعه (۴) گذشته و در امتداد قائم و در نقطه C_4 که فاصله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۲۰) برآورد می‌شود، به پی سد اثر می‌نماید.

$$C_4N = y + \frac{1}{3} x = H_4 \cdot tg\beta + \frac{1}{3} H_3 \cdot tg\alpha \qquad (۲۰\_۲)$$

لنگر نیروی F_4 نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۲۱) قابل محاسبه می‌باشد.

$$M_N F_4 = F_4 \times D_4N = \frac{1}{2} H_3^2 \cdot D \times 1^m \cdot tg\alpha (H_4 \cdot tg\beta + \frac{1}{3} H_3 \cdot tg\alpha) \qquad (۲۱\_۲)$$

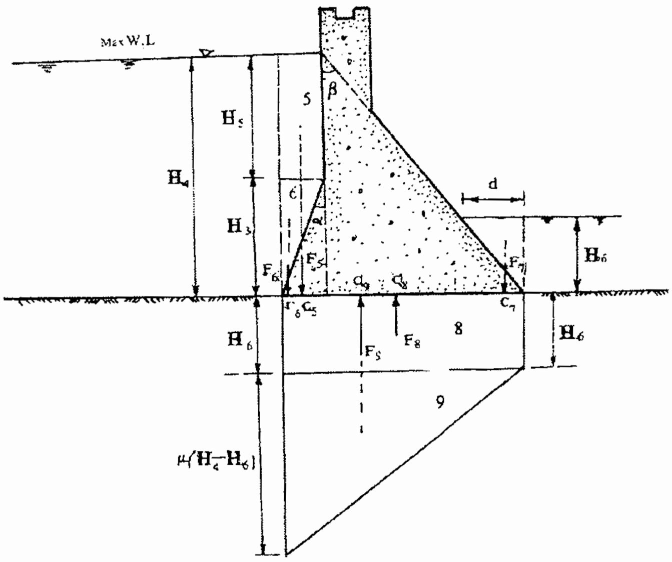
ب) نیروهای قائم فشار آب از قسمت‌های مختلف

برای محاسبه مقدار نیروهای قائم وارد شده به پی سد، برابر شکل (۲ـ۶) به ترتیب زیر عمل می‌نمایند.[۱۶]

ـ نیروهای قائم فشار آب از بالا به طرف پایین

$$V_5 = H_5 \cdot x \times 1^m = H_5 \cdot H_3 \cdot tg\alpha \times 1^m \qquad (۲۲\_۲)$$

$$F_5 = V_5 \cdot \gamma = H_5 \cdot H_3 \cdot \gamma \cdot tg\alpha \times 1^m \qquad (۲۳\_۲)$$



شکل ۲-۶- برای محاسبه نیروهای قائم وارد شده توسط آب

نیروی F_5 از مرکز ثقل قطعه (۵) گذشته و در امتداد قائم و در نقطه C_5 که فاصله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۲۴) برآورد می‌شود، به پی سد اثر می‌نماید.

$$C_5N = y+\frac{1}{2}x = H_4 \cdot tg\beta + \frac{1}{2}H_3 \cdot tg\alpha \qquad (۲۴\text{ـ}۲)$$

لنگر نیروی F_5 نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۲۵) قابل محاسبه می‌باشد:

$$M_N F_5 = F_5 \cdot C_5N = H_5 \cdot H_3 \cdot \gamma \cdot tg\alpha \times 1^m (H_4 \cdot tg\beta + \frac{1}{2}H_3 \cdot tg\alpha) \qquad (۲۵\text{ـ}۲)$$

$$V_6 = \frac{1}{2}H_3 \cdot x \times 1^m = \frac{1}{2}H_3^2 \cdot tg\alpha \times 1^m \qquad (۲۶\text{ـ}۲)$$

$$F_6 = V_6 \cdot \gamma = \frac{1}{2}H_3^2 \cdot \gamma \cdot tg\alpha \times 1^m \qquad (۲۷\text{ـ}۲)$$

نیروی F_6 از مرکز ثقل قطعه (۶) گذشته و در امتداد قائم و در نقطه C_6 که فاصله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۲۸) برآورد می‌شود، به پی سد اثر می‌نماید:

$$C_6N = y + \frac{1}{2}x = H_4 \cdot tg\beta + \frac{2}{3}H_3 \cdot tg\alpha \qquad (۲\_۲۸)$$

لنگر نیروی F_6 نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۲۹) قابل محاسبه می‌باشد:

$$M_N F_6 = F_6 \times C_6N = \frac{1}{2}H_3^2 \cdot \gamma \cdot tg\alpha \times 1^m (H_4 \cdot tg\beta + \frac{2}{3}H_3 \cdot tg\alpha) \qquad (۲\_۲۹)$$

$$V_7 = \frac{1}{2}H_6 \cdot d \times 1^m = \frac{1}{2}H_6^2 \cdot tg\beta \times 1^m \qquad (۲\_۳۰)$$

$$F_7 = V_7 \cdot \gamma = \frac{1}{2}H_6^2 \cdot \gamma \cdot tg\beta \times 1^m \qquad (۲\_۳۱)$$

نیروی F_7 از مرکز ثقل قطعه (۷) گذشته و در امتداد قائم و در نقطه C_7 که فاصله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۳۲) برآورد می‌شود، به پی سد اثر می‌نماید:

$$C_7N = \frac{1}{3}d = \frac{1}{3} \cdot H_6 \cdot tg\beta \qquad (۲\_۳۲)$$

لنگر نیروی F_7 نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۳۳) قابل محاسبه می‌باشد:

$$M_N F_7 = F_7 \times C_7N = \frac{1}{6}H_6^3 \cdot \gamma \cdot tg^2\beta \times 1^m \qquad (۲\_۳۳)$$

ـ نیروهای قائم فشار آب از پایین به طرف بالا

اگر پی سد از مواد نفوذپذیر تشکیل گردد، در اثر نفوذ آب از قسمت بالادست و پایین‌دست سد به پی، نیروی فشار آب به پی انتقال یافته و به طور قائم از پایین به طرف بالا به پی سد اثرمی‌نماید. لذا با توجه به شکل (۲ـ۶) می‌توان نوشت:[۱۶]

$$V_8 = H_6 \cdot L \times 1^m = H_6(H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta) \times 1^m \qquad (۲\_۳۴)$$

$$F_8 = -V_8 \cdot \gamma = -H_6(H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta) \cdot \gamma \times 1^m \qquad (۲\_۳۵)$$

نیروی F_8 از مرکز ثقل قطعه (۸) گذشته و در امتداد قائم و در نقطه C_8 که فاصله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۳۶) برآورد می‌شود، به پی سد اثر می‌نماید:

$$C_8N = \frac{1}{2}L = \frac{1}{2}(H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta) \qquad (۲\_۳۶)$$

لنگر نیروی F_8 نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲_۳۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$M_N F_8 = F_8 \times C_8 N = -\frac{1}{2}H_6(H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta)^2 \cdot \gamma \times 1^m \qquad (۲\_۳۷)$$

$$V_9 = \frac{1}{2}\mu(H_4 - H_6)\cdot L \times 1^m = \frac{1}{2}\mu(H_4 - H_6)(H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta)\times 1^m \qquad (۲\text{-}۳۸)$$

$$F_9 = -V_9 \cdot \gamma = \frac{1}{2}\mu(H_4 - H_6)(H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta)\cdot \gamma \times 1^m \qquad (۲\_۳۹)$$

نیروی F_9 از مرکز ثقل قطعه (۹) گذشته و در امتداد قائم و در نقطه C_9 که فاصله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲_۴۰) برآورد می‌شود، به پی سد اثر می‌نماید:

$$C_9N = \frac{2}{3}L = \frac{2}{3}(H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta) \qquad (۲\_۴۰)$$

لنگر نیروی F_9 نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲_۴۱) قابل محاسبه می‌باشد:

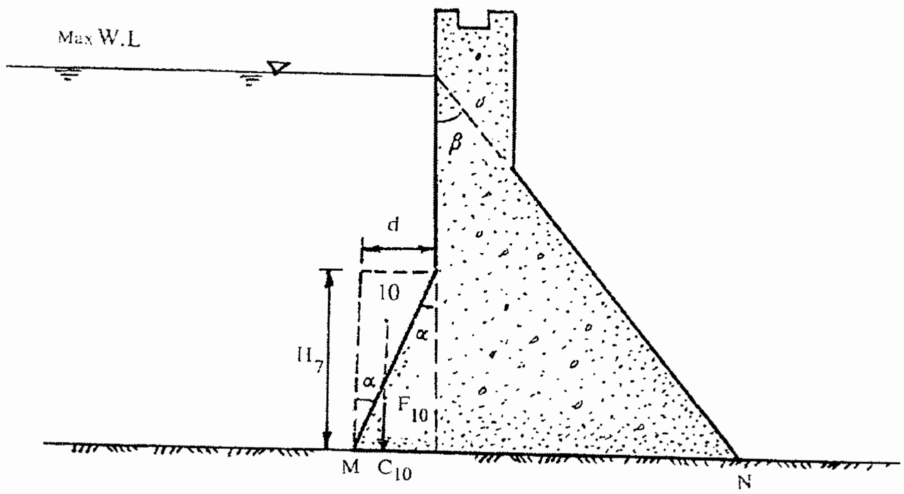
$$M_N F_9 = F_9 \times C_9 N = -\frac{1}{3}\mu(H_4 - H_6)(H_3.tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta)^2 \cdot \gamma \times 1^m \qquad (۲\_۴۱)$$

γ = وزن مخصوص آب برحسب تن بر متر مکعب

μ = ضریب کم‌کننده فشار تحتانی و مقدار آن را در مورد سدها برابر (μ=0.5) در نظر می‌گیرند.

ج) نیروی قائم وارده از طرف وزن مواد رسوبی

برای محاسبه مقدار نیروی قائم وارد شده از طرف مواد رسوبی که در قسمت بالادست سد ذخیره می‌شود، برابر شکل (۲_۷) می‌توان نوشت:[۱۶]



شکل ۲-۷-برای محاسبه نیروی قائم وارده از طرف مواد رسوبی

$$D'_S = D_d - \gamma(1-e) = \gamma\left(\frac{\delta - 1}{\delta}\right) \tag{۲\_۴۲}$$

$$V_{10} = \frac{1}{2}H_7 \cdot d' \times 1^m = \frac{1}{2}H_7^2 \cdot tg\alpha \times 1^m \tag{۲\_۴۳}$$

$$F_{10} = V_{10} \cdot D'_S = \frac{1}{2}H_7^2 \cdot D'_S \cdot tg\alpha \cdot \times 1^m \tag{۲\_۴۴}$$

نیروی F_{10} از مرکز ثقل قطعه (۱۰) گذشته و در امتداد قائم و در نقطه C_{10} کـه فاصـله آن از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۴۵) برآورد می‌شود، به پی سد اثر می‌نماید:

$$C_{10}N = L - \frac{1}{3}d' = (H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta) - \frac{1}{3}H_7 \cdot tg\alpha \tag{۲\_۴۵}$$

لنگر نیروی F_{10} نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۴۶) قابل محاسبه می‌باشد:

$$M_N F_{10} = F_{10} \times C_{10}N = \frac{1}{2}H_7^2 \cdot D'_S \cdot tg\alpha \times 1^m \left[(H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta) - \frac{1}{3}H_7 \cdot tg\alpha\right] \tag{۲\_۴۶}$$

D'_S = وزن مخصوص مواد جامد در داخل آب برحسب تن بر متر مکعب

D_d= وزن مخصوص خشک مواد رسوبی که در بالادست سد ذخیره می‌شود برحسب تن بر متر مکعب

e= ضریب تخلخل مواد رسوبی برحسب درصد

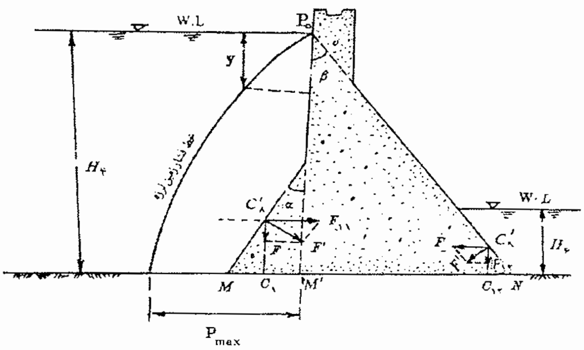
δ= چگالی مواد جامد رسوبی در بالادست سد

H_7= عمق مواد جامد یا رسوبی در بالادست برحسب متر

د) نیروی قائم وارده از طرف زمین‌لرزه

برای محاسبه نیروی قائم وارد شده از طرف زمین‌لرزه، ابتدا با استفاده از رابطه (۲ـ۴۷) دیاگرام فشار زمین‌لرزه را برابر شکل (۲ـ۸) رسم می‌نمایند. روش عمل به این ترتیب است که به جای (y) در رابطه مربوط به ترتیب ($y=0$ و $y=\frac{1}{6}H_4$ و $y=\frac{2}{6}H_4$ و $y=\frac{3}{6}H_4$ و $y=\frac{4}{6}H_4$ و $y=\frac{5}{6}H_4$ و $y=\frac{6}{6}H_4$)را قرار داده و فشارهای مربوطه را محاسبه کرده و دیاگرام مذکور را رسم می‌نمایند. توضیح این که ($y=H_4$) نشان‌دهنده حداکثر فشار زمین‌لرزه در امتداد خط MN می‌باشد.[۱۶]

$$P = 0.0159\,\omega \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4 \cdot \sin\frac{\pi y}{2H_4} \qquad (۴۷\text{ـ}۲)$$



شکل ۲-۸- برای رسم دیاگرام فشار و محاسبه نیروی قائم فشار آب

ـ حداقل فشار زمین‌لرزه :

$$y = 0 \text{ و } P_0 = 0$$

$$y = \frac{1}{6}H_4 \text{ و } P = 0.0159\varpi \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4 \cdot \sin\frac{\pi}{12}$$

$$y = \frac{2}{6}H_4 \text{ و } P = 0.0159\varpi \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4 \cdot \sin\frac{\pi}{6}$$

$$y = \frac{3}{6}H_4 \text{ و } P = 0.0159\varpi \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4 \cdot \sin\frac{\pi}{4}$$

$$y = \frac{4}{6}H_4 \text{ و } P = 0.0159\varpi \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4 \cdot \sin\frac{\pi}{3}$$

$$y = \frac{5}{6}H_4 \text{ و } P = 0.0159\varpi \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4 \cdot \sin\frac{\pi}{12}$$

ـ حداکثر فشار زمین‌لرزه :

$$y = H_4 \text{ و } P_{Max} = 0.0156\varpi \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4$$

۱ـ تذکر: فشار مؤثر زمین‌لرزه در فاصله $(y = 0.6H_4)$ از سطح آب و در فاصله $(0.4H_4)$ از امتداد خط MN به طور افقی به بدنه سد وارد می‌شود، لذا می‌توان نوشت:

$$P_8 = 0.0159\varpi \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4 \cdot \sin\frac{0.6\pi}{2} \qquad (۴۸\text{ـ}۲)$$

$$F_8' = -P_8 \cdot H_4 \times 1^m = -0.0159\varpi \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4^2 \cdot \sin\frac{0.6\pi}{2} \qquad (۴۹\text{ـ}۲)$$

$$F_{11} = F_8' \cdot \cos\alpha \cdot \sin\alpha \qquad (۵۰\text{ـ}۲)$$

نیروی F_{11} از نقطه C_8' در امتداد قائم در نقطه C_{11} به پی سد اثر می‌نماید و فاصله نقطه C_{11}از نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۵۱) برآورد می‌گردد:

$$C_{11}N = MN - MC_{11} = (H_3 \cdot tg\alpha + H_4 \cdot tg\beta) - 0.4H_4 \cdot tg\alpha \qquad (۵۱\text{ـ}۲)$$

لنگر این نیرو نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۵۲) قابل محاسبه می‌باشد:

$$M_N F_{11} = F_{11} \times C_{11}N \tag{۵۲_۲}$$

۲ـ تذکر: نیروی زمین‌لرزه که توسط آب موجود در پایین‌دست سد بـه طـور قـائم بـه پـی اثـر می‌نماید، به ترتیب زیر با توجه به مطالب بیان شده، قابل محاسبه می‌باشد:[۱۶]

$$F_9' = -P_9 \cdot H_6 \times 1^m = -0.0159\,\omega \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_6^2 \cdot \sin\frac{0.6\pi}{2} \times 1^m \tag{۵۳_۲}$$

$$F_{12} = -F_9' \cdot \cos\beta \cdot \sin\beta \tag{۵۴_۲}$$

نیروی F_{12} به طور قائم در نقطه C_{12} به پی سد اثر می‌نماید و فاصله آن از نقطه N به وسـیله رابطه (۲ـ۵۵) برآورد می‌شود:

$$C_{12}N = 0.4\,H_6 \cdot tg\beta \tag{۵۵_۲}$$

لنگر نیروی F_{12} نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲ـ۵۶) قابل محاسبه می‌باشد:

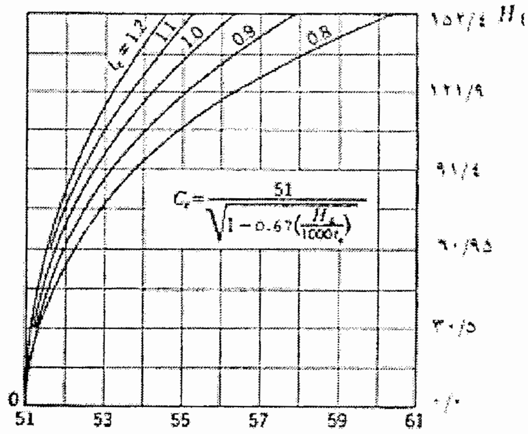
$$M_N F_{12} = F_{12} \times C_{12}N \tag{۵۶_۲}$$

ω= ضریب عددی بوده و نشان‌دهنده نسبت شتاب زمین‌لرزه به شتاب ثقل زمین مـی‌باشـد و در عمل مقدار آن را برابر $(\omega = \frac{g'}{g} \cong 0.1)$ در نظر می‌گیرند.

C_e= فاکتور زمین‌لرزه و مقدار آن به وسیله رابطه (۲ـ۵۷) قابل محاسبه می‌باشد.

$$C_e = \frac{51}{\sqrt{1 - 0.67(\frac{H_4}{1000t_e})}} \tag{۵۷_۲}$$

t_e= پریود یا زمان تناوب زمین‌لرزه برحسب ثانیه (مد اول ارتعاش).



شکل ۲-۹- برای محاسبه ضریب یا فاکتور زمین‌لرزه C_e

ضمناً فاکتور زمین‌لرزه را با در نظر گرفتن حداکثر عمق آب در بالادست سد (H_4) می‌توان با استفاده از دیاگرام‌های موجود در شکل (۲ـ۹) محاسبه و برآورد نمود.[۱۶]

۲ـ تذکر: برای محاسبه زمان لرزش خود سد با در نظر گرفتن عمق آب در بالادست و عرض پی، می‌توان از رابطه (۲ـ۵۸) استفاده نمود:

$$ts=\frac{H_4^2}{656L} \qquad (۲ـ۵۸)$$

ts= زمان لرزش سد برحسب ثانیه

- اثر شتاب عمودی زلزله بر سد:

در اثر شتاب عمودی نیروی اینرسی در سد معادل با $F=\alpha W$ به وجود می آید که در جهت عکس شتاب زمین لرزه است لذا فقط در موقعی که شتاب فوق از بالا به پایین است نیروی اینرسی فوق می تواند در جهت عکس ضریب اطمینان بوده و کم وزنی به مقدار αW در سد و همچنین آب دریاچه به وجود آورد.[۲۰]

α = ضریب شتاب که نسبت شتاب زمین لرزه به شتاب ثقل می باشد.

W= وزن سد

۲-۵-۲-نیروهای افقی وارد به سدهای وزنی

به طور کلی نیروهای افقی که به سدهای وزنی وارد و یا اثر می‌نمایند، عبارتند از:[۱۶]

الف) نیروهای افقی وارده از طرف فشار آب و مواد رسوبی

ب) نیروهای افقی وارده از طرف زمین‌لرزه

الف) نیروهای وارده از طرف فشار آب و مواد رسوبی

برای محاسبه مقدار نیروهای افقی وارده شده از طرف فشار آب در بالادست و پایین‌دست و مواد رسوبی، ابتدا برابر شکل (۲-۱۰) دیاگرام‌های فشار آب و مواد رسوبی را رسم می‌نمایند و بعد به ترتیب مقدار نیروهای بیان شده را محاسبه و برآورد می‌نمایند.[۱۶]

$$V_1' = \frac{1}{2} MM_2 \times MA \times 1^m = \frac{1}{2} H_4^2 \times 1^m \quad (۲\text{-}۵۹)$$

$$F_1' = -V_1' \cdot \gamma = -\frac{1}{2} H_4^2 \cdot \gamma \times 1^m \quad (۲\text{-}۶۰)$$

نیروی F_1' از مرکز ثقل مثلث $\underset{M_2AM}{\Delta}$ گذشته و به طور افقی در نقطه C_1' که فاصله آن از امتداد خط MN به وسیله رابطه (۲-۶۱) برآورد می‌شود، به بدنه سد اثر می‌نماید.

$$C_1' E_1' = \frac{1}{3} H_4 \quad (۲\text{-}۶۱)$$

لنگر نیروی F_1' نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲-۶۲) قابل محاسبه می‌باشد.

$$M_N F_1' = F_1' \times C_1' E_1' \quad (۲\text{-}۶۲)$$

$$V_2' = \frac{1}{2} H_6^2 \times 1^m \quad (۲\text{-}۶۳)$$

$$F_2' = V_2' \cdot \gamma = \frac{1}{2} H_6^2 \cdot \gamma \times 1^m \quad (۲\text{-}۶۴)$$

نیروی F_2' از مرکز ثقل مثلث $\underset{N_2BN}{\Delta}$ گذشته و در نقطه C_2' که فاصله آن از امتداد خط MN به وسیله رابطه (۲-۶۵) برآورد می‌شود به طور افقی برخلاف جهت F_1' به بدنه سد اثر می‌نماید.

$$C_2' E_2' = \frac{1}{3} H_6 \qquad (۲\_۶۵)$$

لنگر نیروی F_2' نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲_۶۶) قابل محاسبه می‌باشد:

$$M_N F_2' = F_2' \times C_2' E_2' \qquad (۲\_۶۶)$$

$$V_3' = -\frac{1}{2} H_7 \left[D_d - \gamma(1-e) \right] \frac{1-\sin\theta}{1+\sin\theta} = -\frac{1}{2} H_7 \cdot D_S' \cdot \frac{1-\sin\theta}{1+\sin\theta} \qquad (۲\_۶۷)$$

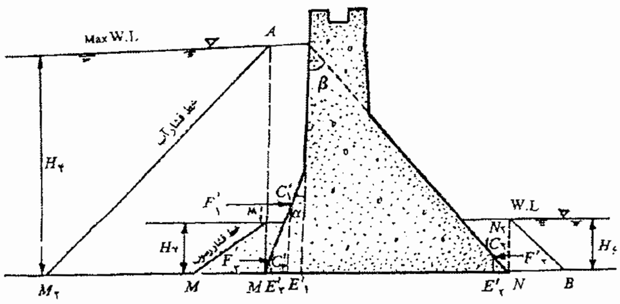
$$F_3' = V_3' \cdot D_S' = -\frac{1}{2} H_7^2 \left[D_d - \gamma(1+e) \right] \frac{1-\sin\theta}{1+\sin\theta} \qquad (۲\_۶۸)$$

نیروی F_3' از مرکز ثقل مثلث $\underset{M_1MM_1'}{\Delta}$ گذشته و در نقطه C_3' که فاصله آن از امتداد خـط MN به وسیله رابطه (۲_۶۸) برآورد می‌شود به طور افقی به بدنه سد اثر می‌نماید.

$$C_3' E_3' = \frac{1}{3} H_7 \qquad (۲\_۶۹)$$

لنگر نیروی F_3' نسبت به نقطه N به وسیله رابطه (۲_۷۰) قابل محاسبه می‌باشد:

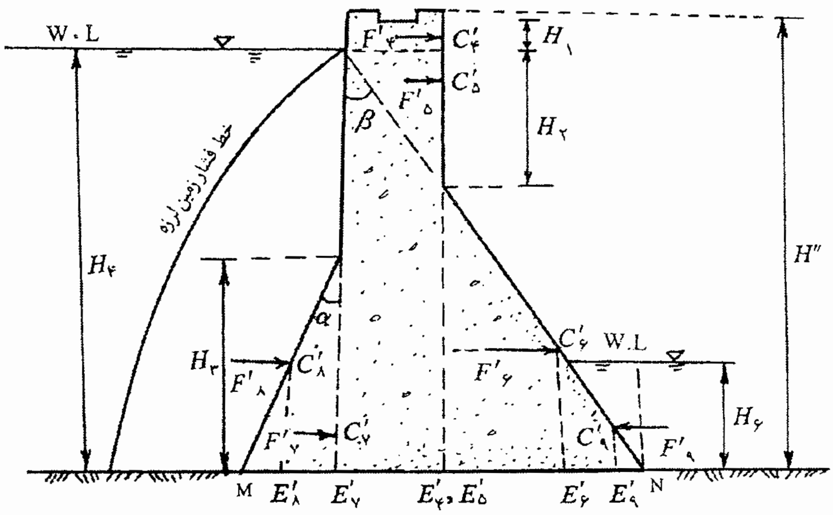
$$M_N F_3' = F_3' \times C_3' E_3' \qquad (۲\_۷۰)$$



شکل ۲-۱۰- برای محاسبه نیروی افقی وارد شده از طرف آب مواد رسوبی به سد

ب) نیروهای افقی وارده از طرف زمین‌لرزه

نیروی افقی زمین‌لرزه هم از طریق وزن خـود سـد و هـم از طریـق آب موجـود در بالادسـت و پایین‌دست سد به بدنه سد وارد می‌شود، برای محاسبه مقادیر این نیروها و لنگرشان نسبت به نقطه N با توجه به شکل (۲ـ۱۱) به ترتیب می‌توان نوشت:[۱۶]



شکل ۲-۱۱- برای محاسبه نیروی افقی زمین‌لرزه نسبت به سد

$$F_4' = -\omega \cdot F_1 \qquad (۷۱\text{ـ}۲)$$

$$M_N F_4' = F_4' \times C_4' E_4' = -\omega F_1 (H_4 + \frac{1}{2} H_1) \qquad (۷۲\text{ـ}۲)$$

$$F_5' = -\omega F_2 \qquad (۷۳\text{ـ}۲)$$

$$M_N F_5' = F_5' \times C_5' E_5' = -\omega F_2 (H_3 + \frac{1}{3} H_2) \qquad (۷۴\text{ـ}۲)$$

$$F_6' = -\omega \cdot F_3 \qquad (۷۵\_۲)$$

$$M_N F_6' = F_6' \times C_6' E_6' = -\omega \cdot F_3 \times \frac{1}{3} H_4 = -\frac{1}{3} \omega \cdot H_4 \cdot F_3 \qquad (۷۶\_۲)$$

$$F_7' = -\omega \cdot F_4 \qquad (۷۷\_۲)$$

$$M_N F_7' = F_7' \times C_7' E_7' = -\frac{1}{3} \omega \cdot H_3 \cdot F_4 \qquad (۷۸\_۲)$$

$$F_8' = -0.0159 \omega \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_4^2 \cdot \sin \frac{0.6\pi}{2} \times 1^m \qquad (۷۹\_۲)$$

$$M_N F_8' = F_8' \times C_8' E_8' = 0.4 H_4 \times F_8' \qquad (۸۰\_۲)$$

$$F_9' = 0.0159 \omega \cdot C_e \cdot \gamma \cdot H_6^2 \cdot \sin \frac{0.6\pi}{2} \qquad (۸۱\_۲)$$

$$M_N F_9' = F_9' \times C_9' E_9' = 0.4 H_6 \times F_9' \qquad (۸۲\_۲)$$

۲-۵-۳-مطالعه و بررسی تعادل سدهای وزنی

برای بررسی تعـادل سدهای وزنی در مقابل تمامی نیروهای وارده به آن، مطالعـاتی بـه ترتیـب انجام میابد:[۱۶]

الف) تعادل سدهای وزنی از نظر غلتیدن و لغزیدن

ب) مطالعه و بررسی فاکتور یا ضریب اطمینان برشی و مالشی

ج) مطالعه و بررسی خستگی قائم ایجاد شده در پی

الف) تعادل سدهای وزنی از نظر غلتیدن و لغزیدن

برای بررسی تعـادل سدهـای وزنی از نظر غلتیدن و لغزیـدن برابـر شـکل (۲ـ۱۲) بـه ترتیـب می‌توان نوشت:[۱۶]

$$F_V = \sum_{i=1}^{N} F_i = F_1 + F_2 + F_3 + \ldots + F_{12} \qquad (۸۳\text{ـ}۲)$$

$$F_H = \sum_{i=1}^{N} F_i' = F_1' + F_2' + F_3' + \ldots + F_9' \qquad (۸۴\text{ـ}۲)$$

$$M_N F_V = \sum_{i=1}^{N} M_N F_i = M_N F_1 + \ldots + M_N F_{12} \qquad (۸۵\text{ـ}۲)$$

$$M_N F_H = \sum_{i=1}^{N} M_N F_i' = M_N F_1' + \ldots + M_N F_9' \qquad (۸۶\text{ـ}۲)$$

$$G'N = \frac{M_N F_V}{F_V} \qquad (۸۷\text{ـ}۲)$$

$$GG' = G''N = \frac{M_N F_H}{F_H} \qquad (۸۸\text{ـ}۲)$$

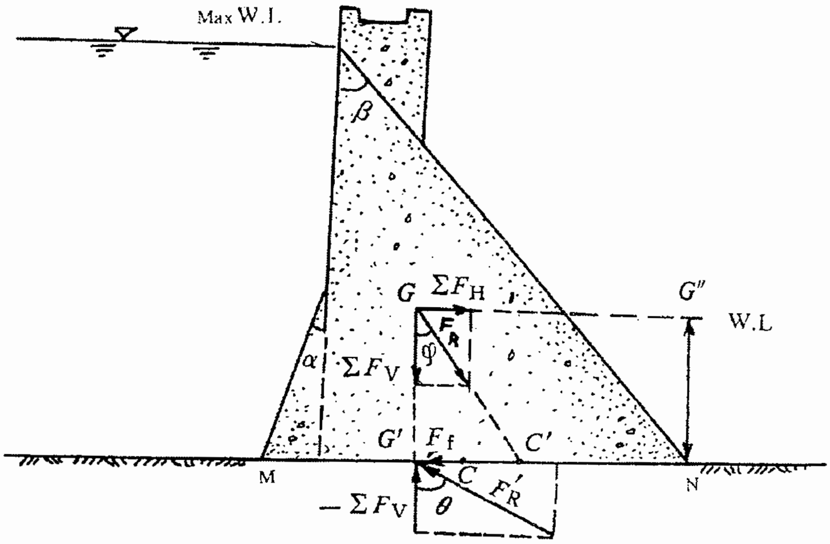
$$M_{C'} F_V + M_{C'} F_H = M_{C'} F_R \qquad (۸۹\text{ـ}۲)$$

$$G'C' \cdot F_V - G''N \cdot F_H = F_R \times 0 = 0 \qquad (۹۰\text{ـ}۲)$$

$$G'C' = \frac{G''N \cdot F_H}{F_V} \qquad (۹۱\text{ـ}۲)$$

$$tg\varphi = \frac{F_H}{F_V} \qquad (۹۲\text{ـ}۲)$$

$$tg\theta = f = \frac{F_f}{F_V} \tag{۲_۹۳}$$



شکل ۲-۱۲- برای بررسی تعادل سد

شرط این که سد از نظر غلتیدن در امان باشد، اولاً باید نقطه اثر برآیند کـل نیروهـای وارده از $(\frac{1}{3})$ قسمت وسطی عرض سد یعنی $(\frac{1}{3}MN)$ خارج نشود و رابطه (۲ـ۹۴) برقرار باشد.

$$F_V \geq F_H \tag{۲_۹۴}$$

برای این که سد در امتداد MN لغزش نکند، باید داشته باشیم:

$$tg\theta = f \geq tg\varphi \tag{۲_۹۵}$$

و

$$F_f \geq F_H \tag{۲_۹۶}$$

F_V= برآیند کل نیروهای قائم وارد شده به سد برحسب تن

F_H= برآیند کل نیروهای افقی وارد شده به سد برحسب تن

F_R= برآیند کل نیروهای وارد شده به سد برحسب تن

$G'N$ = فاصله نقطه اثر برآیند کل نیروهای قائم از نقطه N برحسب متر

$G''N$ = فاصله نقطه اثر برآیند کل نیروهای افقی از امتداد خط MN برحسب متر

$G'C'$ = فاصله نقطه اثر برآیند کل نیروها از نقطه G برحسب متر

φ = زاویه مابین امتداد نیروی F_R با نیروی F_V برحسب درجه

θ = زاویه مابین امتداد نیروی F'_R با نیروی F_V برحسب درجه، با ضریب زاویه اصطکاک داخلی بدنه سد با پی.

f= ضریب اصطکاک داخلی بدنه سد با پی و مقدار آن را در مورد بتن برابر $(f \cong 0.7)$ و در مورد پی‌های ضعیف مابین $(0.2 \leq f \leq 0.5)$ در نظر می‌گیرند.

F_f= مقدار نیروی اصطکاک برحسب تن

ب) مطالعه و بررسی فاکتور یا ضریب اطمینان برشی و مالشی

برای مطالعه و بررسی این فاکتور یا ضریب اطمینان از نظر مصالح به کار رفته در ساختمان سد از رابطه (۲_۹۶) استفاده می‌شود.[۱۶]

$$S_f = \frac{f \cdot F_V + r \cdot S_a \cdot L}{F_H} \quad (۹۷\_۲)$$

S_f= فاکتور یا ضریب اطمینان برشی و مالشی و حداقل مقدار مجاز آن در سدهای وزنی برابر $(S_f = 5)$ می‌باشد، یعنی باید داشته باشیم $(S_f \geq 5)$.

r= ضریب عددی بوده و آن نسبت تنش برشی متوسط به تنش برشی حداکثر می‌باشد و برابر $(r=0.5)$ در نظر می‌گیرند.

S_a= مقاومت برشی مصالح به کار رفته در واحد سطح در امتداد پی و بدنه، مقدار آن مابین $(420 \leq S_a \leq 994)$ تن بر متر مربع تغییر می‌نماید. در مورد سدها مقدار آن را برابر $(S_a = 565)$ تن بر متر مربع در نظر می‌گیرند.[۱۶]

ضمناً فاکتور پایداری یا ایمنی سدهای وزنی به وسیله رابطه ($S'_f = \frac{f \cdot F_V}{F_H} = \frac{f}{tg\varphi}$) محاسبه می‌شود و حداقل مقدار آن برابر ($S'_f \geq 1$) می‌باشد.[۱۶]

ج) مطالعه و بررسی خستگی قائم ایجاد شده در پی

برای محاسبه و بررسی خستگی یا تنش قائم ایجاد شده در پی سدهای وزنی که در اثر نیروهای وارده به وجود می‌آیند، برابر شکل ۲-۱۲ به ترتیب می‌توان نوشت:[۱۶]

$$C'N = G'N - G'C' \tag{۲_۹۸}$$

$$e = CC' = CN - C'N = \frac{1}{2}MN - C'N \tag{۲_۹۹}$$

$$P_m = \frac{F_V}{L}\left(1 - \frac{6e}{L}\right) \tag{۲_۱۰۰}$$

$$P_n = \frac{F_V}{L}\left(1 + \frac{6e}{L}\right) \tag{۲_۱۰۱}$$

e= فاصله نقطه اثر برآیند کل نیروها از مرکز پایه (MN)

P_m = تنش یا خستگی ایجاد شده در پی، در قسمت بالادست سد برحسب تن بر متر مربع، در حالی که سد از نظر لغزشی در حال تعادل باشد، مقدار آن مثبت خواهد بود و در صورت منفی بودن سد از نظر لغزشی در حال تعادل نبوده و باید اضافه نیروی رانش را با آرماتورگذاری از بین ببریم.

P_n = مقدار تنش یا خستگی در پی در قسمت پایین دست سد بر حسب تن بر متر مربع و مقدار مجاز آن در مورد پی ها مختلف عبارتند از:

- برای پی هایی که با ملات آهکی ساخته می شوند، مقدار آن برابر ($12 \leq P_m \leq 25$) کیلوگرم بر سانتی متر مربع انتخاب می شود.

- برای پی هایی که با ملات آهکی ساخته می شوند، مقدار آن برابر ($8 \leq P_n \leq 12$) کیلوگرم بر سانتی متر مربع انتخاب می شود.

$$P' = \gamma[H_6 + \mu(H_4 - H_6)] \tag{۱۰۲-۲}$$

$$P' = \gamma.H_6 \tag{۱۰۳-۲}$$

$$P_M = P_m + P'_m \tag{۱۰۴-۲}$$

$$P_N = P_n + P'_n \tag{۱۰۵-۲}$$

$$P_{LM} = P_M + (P_M - P'_m)\cdot tg^2\alpha \tag{۱۰۶-۲}$$

$$P_{Ln} = P_N + (P_N - P'_n)\cdot tg^2\beta \tag{۱۰۷-۲}$$

P'_m = تنش یا خستگی ایجاد شده در اثر فشار تحتانی آب در قسمت بالادست بر حسب تن بـر متـر مربع.

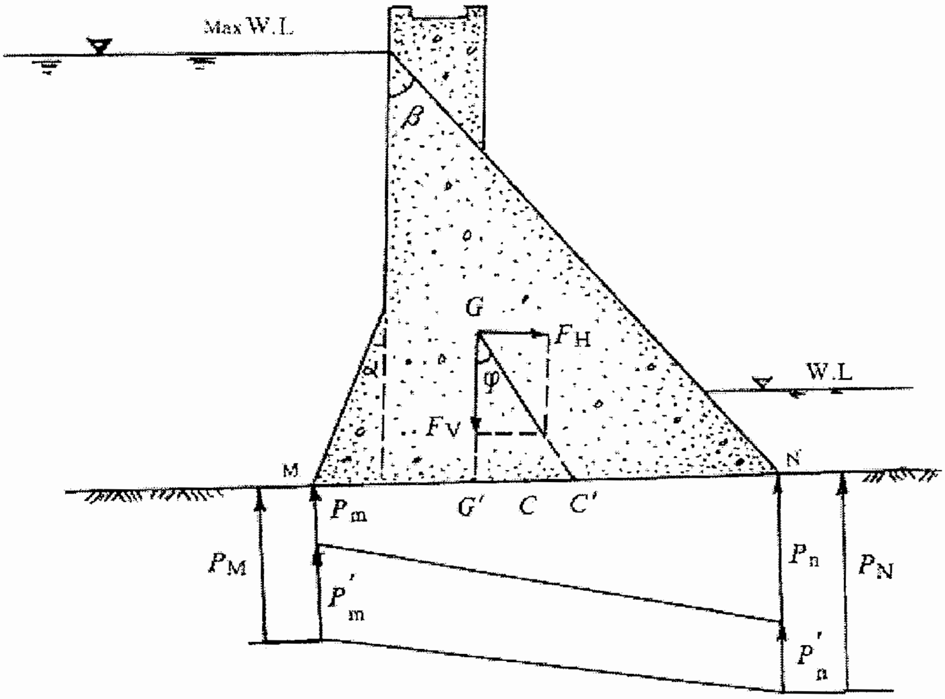
P'_n = تنش یا خستگی ایجاد شده دراثر فشار تحتانی آب در قسمت پایین دست بر حـسب تـن بـر متر مربع.

P'_M = برآیند تنش های وارده بر قسمت بالا دست سد.

P'_N = برآیند تنش های وارده در قسمت پایین دست سد.

P_{LM} = حداکثر تنش یا خستگی نهایی وارده درقسمت بالا دست سد به پی.

P_{Ln} = حداکثر تنش یا خستگی نهایی وارده در قسمت پایین دست سد به پی کـه مقـدار مجـاز آن در سدهای وزنی بتنی، بعد از ۲۸ روز بتن ریزی مابین ($226 \le P_{Ln} \le 272$) تن بر متر مربـع قـرار می گیرد و اگر چنانکه از این حد تجاوز نماید، در پی سد شناور استفاده می شود.



شکل ۲-۱۳-برای بررسی خستگی ایجاد شده در پی

۲-۶- گالری ها و تونل ها

۲-۶-۱- مقدمه

گالری یک راه بازدید از درون سد است که دسترسی به نقاط مختلف سد را ممکن می سازد. یک گالری ممکن است به صورت عرضی یا طولی، شیب دار و یا افقی اجرا گردد. از گالری ها برای راه ارتباطی بین گالری ها و یا راهی برای واحد های تولید نیرو، نصب آسانسورها و اطاق پمپ، استفاده می شود. به گالری گاهی راه دسترسی هم گفته می شود. وقتی گالری عریض باشد و امکان نصب تجهیزاتی داخل آن فراهم گردد، به آن اطاق قوسی هم می گویند.[۲]

۲-۶-۲-هدف

نیاز به ساختن گالری ها از سدی تا سد دیگر متفاوت میباشد. برخی از موارد استفاده بسیار متـداول آن به شرح زیر است:[۲]

(۱) ایجاد زهکش برای آب های نفوذی از وجه بالادست و فونداسیون سد.

(۲) فراهم نمودن فضا و محلی برای مته کاری و تزریق ملاط سیمان در بخش های فونداسیون.

(۳) ایجاد محل هایی برای تجهیزات مصنوعی برای خنک کردن بتن و پر کردن اتصال ها بـا تزریـق سیمان.

(۴) مهیا نمودن امکان دسترسی به فضای داخلی سازه سد به منظور مشاهده رفتار سد بعد از اتمـام عملیات ساختمانی.

(۵) برقراری امکان دسترسی و ایجاد فضای لازم برای نصب تجهیـزات مکـانیکی و الکتریکـی بـرای دریچه های سرریز و خروجی آب سد.

(۶) ایجاد راه دسترسی به درون سد برای کنترل کابل ها و یا کابل هایی که برای تولید نیروی فشار قوی مورد استفاده قرار گرفته است.

(۷) ایجاد راه برای بازدید کنندگان.

گالری های دیگری به منظورهای مختلف بـا تجهیـزات مخـصوص دیگـری هـم سـاخته مـی شـود. گالری ها با توجه به نوع کاربردشان و محل واقع شدن و نوع استفاده از آن ها اسم گذاری می شوند. به عنوان مثال می توان به گالری فونداسیون که در امتداد فونداسیون سد قرار می گیرد و یا گـالری دریچه ها که برای کار روی دریچه های خروجـی آب سـاخته مـی شـود، اشـاره نمـود. معمـولترین گالری ها در شکل های ۲-۱۵و۲-۱۶و۲-۱۷ نشان داده شده است.

۲-۶-۳-محل و ابعاد گالری

محل و ابعاد گالری ها با توجه به نحوه استفاده از آن ها و یا به عبارت دیگـر کـاربرد آن هـا تعیـین می گردد. برخی از گالری های متداول به شرح زیرند:[۲]

(الف)گالری فونداسیون: این گالری ها معمولا در طول سد و نزدیک سنگ کف قـرار مـی گیرنـد بـه صورتی که هم شکل و هما هنگ با مقطع عرضی دره محل سد و نزدیک به جبهه بالادست و تقریبـا موازی محور سد می باشند. در این گالری سوراخ هایی به منظور زهکشی آب نشت کـرده بـه درون

فونداسیون تعبیه شده است. ابعاد آن ها معمولا ۱/۵ متر عرض و ۲/۳ متر ارتفاع است که برای انواع خدمات و مته کاری مناسب می باشد. بین سنگ فونداسیون و کف گالری حداقل باید به ضخامت ۱/۵ متر بتن باشد.

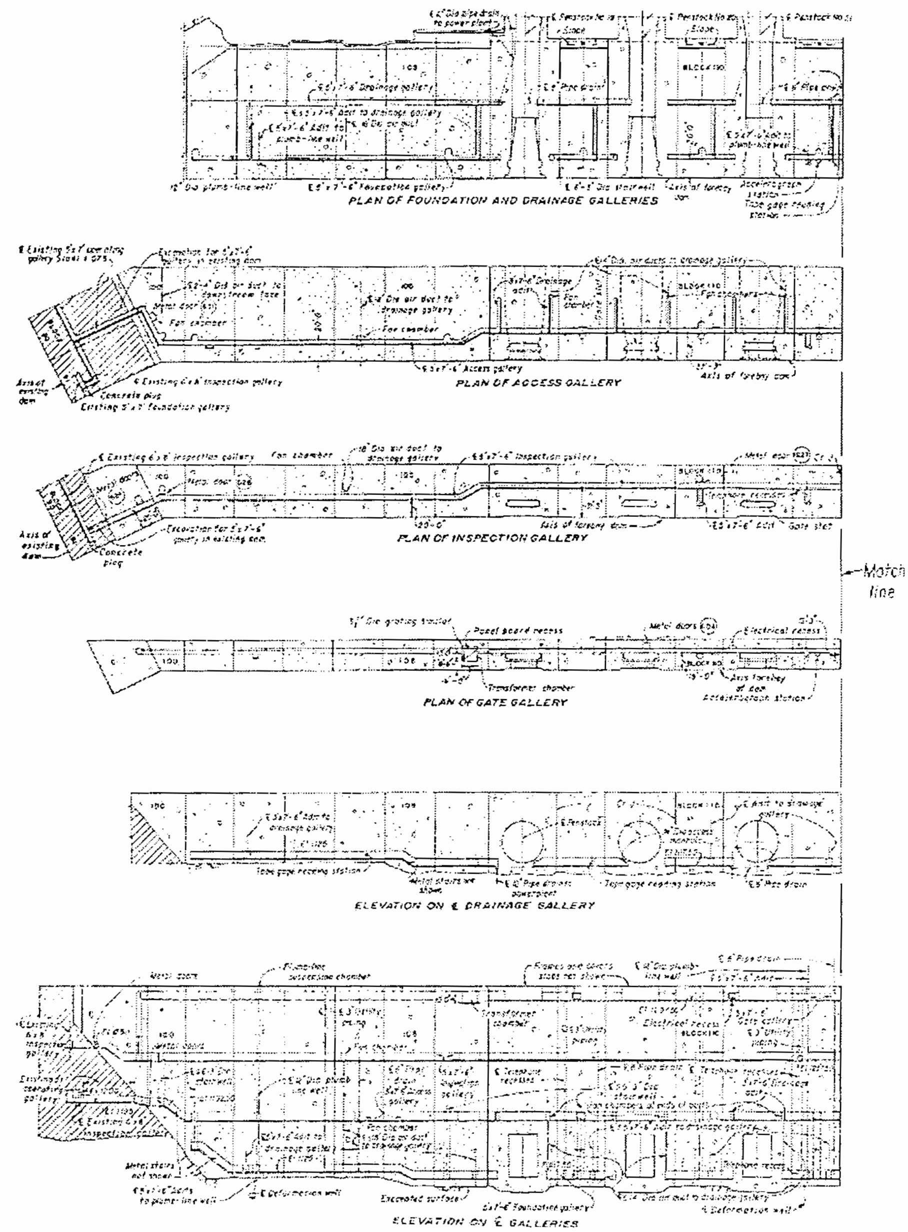
(ب)گالری زهکشی: در سدهای بلند یک گالری زهکشی تکمیلی اغلب در پایین ترین قسمت سد، حدود دوسوم عرض بستر از وجه بالا دست، تعبیه می شود که به منظور زهکشی آب نشت کرده به فونداسیون مورد استفاده قرار می گیرد. این گالری معمولا تا عمیق ترین بخش سد ادامه می یابد. سوراخ هایی برای زهکشی در این گالری پیش بینی می شود. اندزه ۱/۵ در ۲/۳ متر معمولا برای آنها اتخاذ میشود.

(ج) گالری دریچه ها یا اطاق ها: گالری دریچه ها یا اطاق ها در سد به منظور دسترسی به تجهیزات مکانیکی و الکتریکی مربوط در دریچه های خروجی آب، لوله های تحت فشار و سرریزها ساخته می شود.

(د)گالریهای دوغابریزی: اگر دوغابریزی به اتصالات از بیرون سد غیرعملی باشد، سیستم لوله های تزریق باید طوری تعبیه گردد که برای عملیات مناسب باشد. آسانسورها و چاله های جمع کننده آب در این گالری قرار دارند. سیستم لوله های خنک کردن مصنوعی بلوک های بتنی در این گالری ها قرار می گیرد. این گالری ها فضای لازم برای سفت شدن بتن تزریقی فونداسیون را فراهم می کنند.

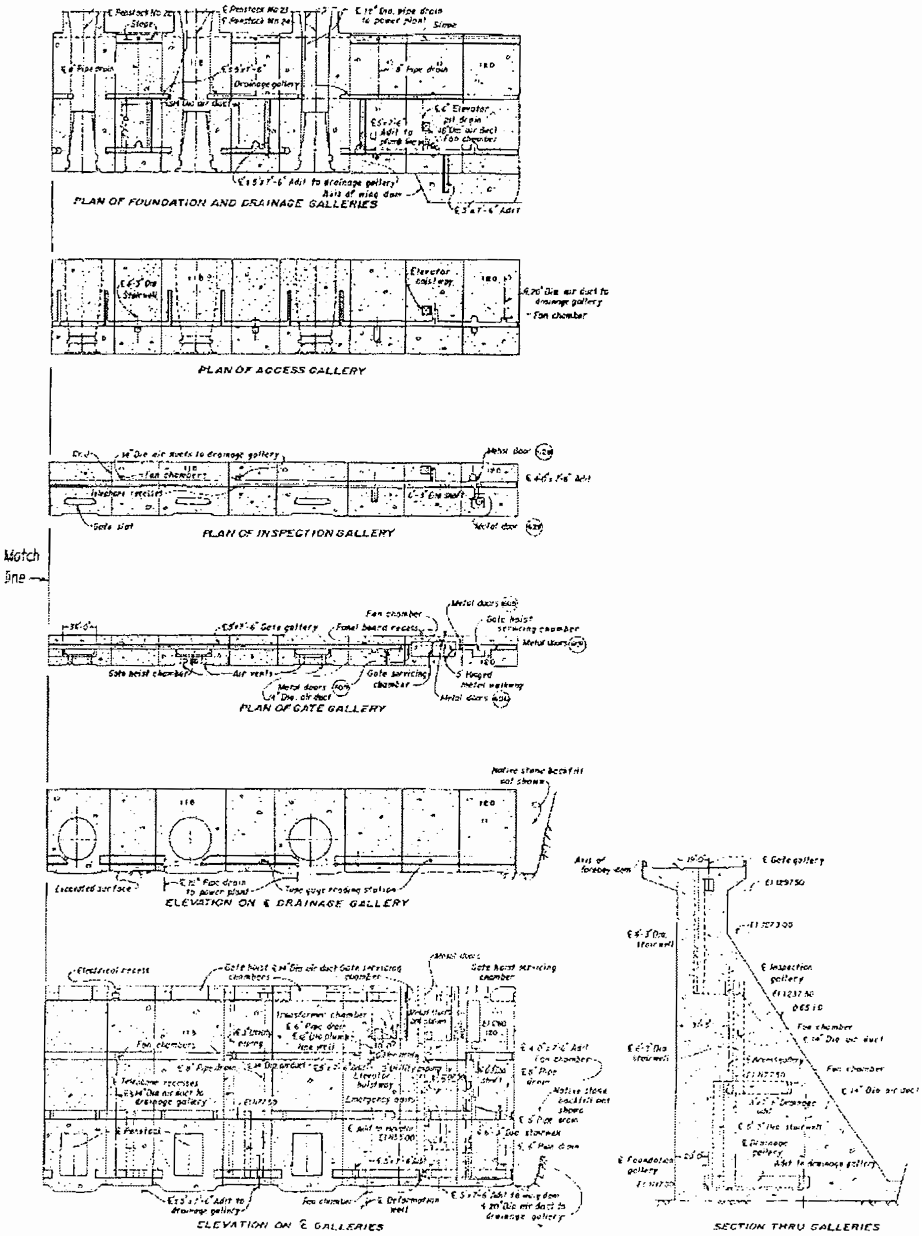
(ه)گالری بازدیدکنندگان: این گالری امکان می دهد که بازدید کنندگان نقاط مورد علاقه خود را در درون بدنه سد تماشا کنند. به عنوان مثال بتوانند واحدهای تولید نیرو را حین کار مشاهده نمایند. ابعاد این گالری بستگی به تعداد بازدید کنندگان دارد.

(و) گالری کابل ها: این گالری ها در اتصال با تونل ها مورد استفاده قرار می گیرد و راهی برای حمل کابل ها، کنترل تجهیزات برقی و کابل های انتقال نیرو می باشد. اندازه و ابعاد آن بستگی به مقدار کابل ها و تجهیزات وابسته به آن دارد.



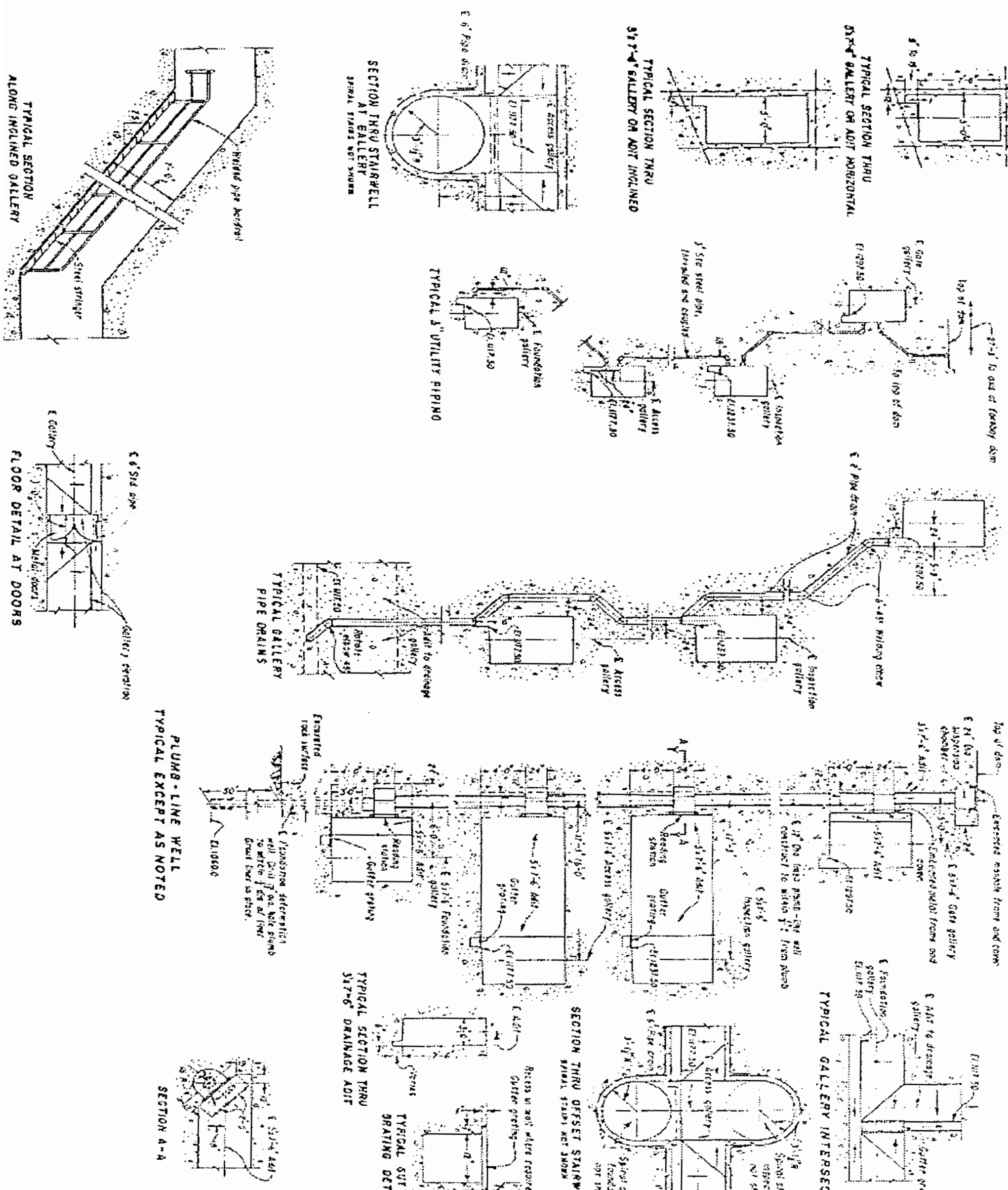
شکل ۲-۱۵-گالری ها و بدنه در سد وزنی

پلان ها، نماها و برش ها



شکل ۲-۱۶-گالری ها و بدنه در سد وزنی

پلان ها، نماها و برش ها



شکل ۲-۱۷- گالری ها و بدنه در سد وزنی ،

برش ها

(g)گالری بازرسی: گالری بازرسی در سد برای ساختن راه دسترسی به نقاط مختلف سد و انجام اندازه گیری های مخصوص مانند کنترل عکس العمل های ساختمان سد در مقابل انواع فشارها و عوامل مختلف هنگام بهره برداری از سد ساخته می شود. گالری های نام برده بالا هر کدام مثل یک گالری بازرسی عمل می کنند.

همانطوری که قبلا اشاره شد گالری ها بیشتر به صورت مستطیل به عرض۱/۵۲ متر و ارتفاع ۲/۳ متر ساخته می شوند. در سراسر مسیر گالری، راه آبی برای جمع آوری آب های نشت کرده به عرض حدود ۳۰ سانتی متر ساخته می شود. عرض ۱/۳ متر و ارتفاع ۲/۳ متر برای راه رفتن و جابجایی مصالح مناسب است. تجارب نشان داده که این ابعاد گالری فضای مناسبی برای انواع خدمات و دست یابی به تجهیزات در یک حالت معمولی می باشد. جایی که نیاز به نصب تجهیزات خاصی مانند اطاقک دریچه ها باشد از گالری های باریک ۶۰ سانتی متری هم استفاده شده است. هر چند حداقل توصیه شده حدود یک متر است.[۲]

۲-۶-۴-جمع آوری آب های زهکشی شده

همه گالری ها باید آبرویی برای جمع کردن آب های نشت کرده داشته باشند. این آبروهای افقی به عرض ۲۳ تا ۳۸ سانتی متر با شیب ملایمی آب را در چاهک هایی جمع آوری نموده به طور ثقلی با پمپ از چاهک ها به پایاب سد تخلیه می کنند.

۲-۶-۵-زهکش های شکل دار

زهکشهایی به قطر حدود ۱۳ سانتیمتر در درون توده های بتن ساخته شده، که نشت آب بتن یا اتصال ها را به داخل خود می کشد. فشار هیدرواستاتیک روی میزان نشت موثر می باشد. ضمنا این زهکش ها از نم زدن و کثیف و بد منظره شدن روی بتن جلوگیری می نمایند.[۲]

زهکشها معمولا حدود ۳ متر از وجه بالادست فاصله دارند و موازی محور سد هستند. زهکش ها به گالری ها و چاله های جمع کننده آب راه دارند و با لوله هایی به قطر حدود ۴ سانتی متر نیز به تاج

سد راه می یابند تا در صورت لزوم، تمیز و شستشو گردند. این لوله ها تا ارتفاع معمـولی سـطح آب در مخزن ادامه دارند.[۲]

۲-۶-۶-آرماتور

آرماتور معمولا در اطراف سد فقط در جایی که فشارهای کششی بالا ایجاد میشود مانند بازشـوهای بزرگ و بازشوهایی که ترکیب آنها باعث ایجاد تمرکـز فـشار کشـشی میـشود و بازشـوهایی کـه در فضاهایی قرار دارند که بتنهای اطراف آنها به علت بارهای روی سـد یـا حـرارت یـا افـت، درکـشش هستند، مورد نیاز میباشد. در شرایطی که یک شکاف در گالری ایجاد مـی شـود و از درون سـد بـه مخزن گسترش می یابد نیز آرماتور مورد استفاده قرار می گیرد.[۲]

فشارهای اطراف بازشوها ما را در استفاده از روش المان هـای محـدود بـرای فرضـهای بارگـذاریهای مختلف مثل فشارهای سد و حرارت و بارهای افت مصمم می کند. اگـر فـشارهای کشـشی در بـتن اطراف بازشوها کمتر از ۵ درصد نیروی فشاری بتن بود آرماتورمورد نیاز نمـی باشـد. اگـر فـشارهای کششی بالای ۵ درصد نیروی فشاری بتن بود آرماتور باید برای محدود کردن ترکهـا در ایـن فـضاها قرار بگیرد. هر گالری باید به طور جداگانه با استفاده از بارها و برش صحیح سد مـورد بررسـی قـرار گیرد. درمحوطه های با فشار بالا یا جایی که فشارها چنین است که یک شکاف ایجاد شده میتوانـد گسترش یابد، آرماتور باید مورد استفاده قرار گیرد. اگر آرماتور گذاری نشود چنین شکافی به طـرف سطح بیرونی سد گسترش می یابد که ظاهر بدی دارد و باعث ورود آب به داخل گالری ها می شود. همچنین ممکن است که امنیت سازه را نیـز تهدیـد کنـد. فـشارهای تعیـین شـده توسـط تحلیـل المان های محدود برای تعیین میزان آرماتور مورد نیاز در اطراف باز شوها برای کنترل شکاف ها نیز می تواند مورد استفاده قرار گیرد.

در بعضی حالتها تغییر شکل دادن و جابجا کردن گالری میتواند فشارهای کششی را کاهش دهد یـا رفع کند.

۲-۶-۷-خدمات و کاربردها

خطوط خدماتی میتوانند برای سهولت در اجرا و مراقبتهای بعـد از تکمیـل سـد در گـالری هـا کـار گذاشته شوند. برای آماده کردن این خطها، لوله مطلوب باید به صورت عمودی بـین گـالری هـا و از بالای گالری به بالای سد تعبیه شود. این لوله بالای سد باعث می شود تا برای مثـال بـه کمپرسـور

هوا(دستگاه تراکم هوا) وصل شود و هوای متراکم شده را بـه هـر گـالری بفرسـتد. تعـداد و انـدازه لوله های مطلوب به کاربرد مورد نظر آن بستگی دارد.

گالری ها باید روشنایی و تهویه کافی داشته باشند تا خطری بـرای کـسانی کـه در گـالری هـا کـار می کنند وجود نداشته باشد. سیستم تهویه باید برای جلوگیری از انباشـتگی هـوای مانـده طراحـی شود.

تلفنها باید برای استفاده در مواقع ضروری و برای استفاده پرسنل نگهداری و عملیاتی درمکان هـای مناسب در گالری قرار گیرد.

درجه حرارت هوا در گالری باید به منظور به حداقل رساندن فشارهای حرارتی حدودا مشابه بـا بـتن اطراف باشد. ایـن کـار نیازمنـد گـرم سـازی هـوای تـازه ورودی مخـصوصا در آب و هـوای سـردتر می باشد. گالری هایی که برای کابلهای نیروی ولتاژ بالا مورد استفاده قرار می گیـرد بـه علـت پـس دادن گرمای قابل توجه توسط کابلها، به خنکسازی نیاز دارند.

۲-۶-۸- جزییات مختلف

اجراهای افقی گالری ها در جاهای قابل اجرا به علت آسانی در ساخت و ساز توصیه می شود. رفـت وآمد در گالری های شیب دار باید به راحتی انجام شود. چنانچه لازم باشد از پلکـان اسـتفاده شـود. شیب ۷/۵ تا ۹ درجه برای راه پله مناسب است. شیب ها باید در جاهـایی کـه تغییـرات تـدریجی و کوچک در ارتفاع مورد نیاز است مورد استفاده قرار گیرند. شیبها باید کمتر از ۱۰ درجه باشند.

پله های مارپیچ در محورهای عمودی جایی که امکان ایجاد شیب وجود نـدارد بایـد اسـتفاده شـود. این پلکان های عمودی به قطر ۱۸۰ سانتی متر هستند که نـوع آهنـی آن هـا در بـازار تجـاری بـه فروش می رسد.

برای به حداقل رساندن امکان شکاف ایجاد شده در بین وجه بالا دست رود خانه و یـک گـالری کـه امکان نفوذ آب در آن وجود دارد، گالری ها معمولا در فاصـله ۵ متـری لولـه اصـلی مخـزن از وجـه بالا دست رودخانه قرار می گیرند. یک فاصله حداقل ۱/۵ متر بین گالری ها و درزهای انقباض مورد استفاده قرار می گیرد تـا فـضایی بـرای جابجـایی بـتن ایجـاد کنـد و تمرکـز فـشار را بـه حـداقل برساند. [۲]

فصل سوم: بهینه سازی توپولوژیک سازه ها به روش معیار بهینگی و بهینه سازی شکل سازه ها به روش CA

بسیارمشکل می باشد مرحله دوم مرحله طرح مقدماتی است که این مرحله شکل سازه ومشخصات هندسی آن تعیین می شود. مرحله سوم مرحله طرح جزئیات سازه می باشد.
اولین بار تحقیقات بهینه سازی سازه ها برروی بهینه سازی ابعادی[1] متمرکز شد. دراین مسائل فضای طراحی ثابت است ودر خلال بهینه سازی تغییرنمی کند. بطور کلی برای طراحی یک سازه ازبهینه سازی ابعادی میتوان در مرحله طرح جزئیات بهره گرفت.[۵]
محققین با تحقیقات بیشتر در زمینه بهینه سازی سازه ها سعی در یافتن مرزهای بهینه یک سازه نمودند. پیداکردن مرزهای بهینه سازی که با استفاده ازفرضیات تنش مسطح مدل شده ویا پیداکردن محل بهینه اتصلات اسکلت یک سازه قاب یا خرپا نمونه های ازاین نوع بهینه سازی میباشند. این نوع بهینه سازی درتقسیم بندی مسائل بهینه سازی سازه ها به بهینه سازی شکل[2] معروف است. در این مسائل مرزهای فضای طراحی ثابت نیستند اما توپولوژی فضای طراحی ثابت است. بهینه سازی شکل را میتوان در مرحله طرح مقدماتی از مراحل طراحی یک سازه بکار برد. برای طرح یک سازه بهینه، استفاده ازروشهای بهینه سازی ابعادی وشکل کافی نبوده ولازم است که توپولوژی بهینه فضای طراحی معلوم باشد. برای غلبه بر این مشکل میتوان از بهینه سازی توپولوژیک[3] استفاده نمود. بعنوان نمونه در بهینه سازی توپولوژیک سازههای دوبعدی وسه بعدی درمحیطهای پیوسته هدف، محاسبه شکل وتعداد سوراخها ومحل قرارگیری آنهاست. بهینه سازی توپولوژیک درمرحله تصمیم گیری درمورد سیستم سازه ای از مراحل طراحی یک سازه مورد استفاده قرار گیرد.[۱]

بدین ترتیب برای بدست آوردن یک طرح مهندسی بهینه می بایست ابتدا توپولوژی سازه بااستفاده از بهینه سازی توپولوژیک مشخص گرددوسپس با استفاده از بهینه سازی ابعادی وشکل مشخصات هندسی دقیق وبهینه آن تعیین شود.[۱] به این منظور دو روش در این رساله به کار رفته است. روش معیار بهینگی[4] برای بهینه سازی توپولوژیک و روش CA[5] برای بهینه سازی شکل می باشد.

---

[1]Size optimization
[2]Shape optimization
[3]Topology optimization
[4]Optimality criteria
[5]Cellular automata

۳-۲- بهینه سازی توپولوژیک سازه ها به روش معیار بهینگی

۳-۲-۱-مقدمه

بهینه سازی توپولوژیک برای طراح وسیله ای است که به اوامکان میدهـد بـا جابجـاکردن ویـاپخش مواد در فضای طراحی توپولوژی مناسب برای سازه اولیه را انتخاب کنـد. بهینـه سـازی توپولوژیـک سازه ها ترکیب پیچیده ای از مسائل بهینه سازی شکل وابعادی میباشد. بنابرین سـعی بـرای تغییـر دادن توپولوژی سازه در حین بهینه سازی شکل سبب پیچیده شدن مسئله میشود.[۱]

روشهای یافتن توپولوژی بهینه به دودسته تقسیم میشوند. دسته اول روشهایی هستند کـه بـر پایـه واساس ریاضی استوارند ودسته دوم روشهایی میباشند که برمبنای تجربـه ودرک مهندسـی بدسـت آمده اند.[۱] از دسته اول میتوان به روشهایی که بر پایه تئوری همگن سازی استوارند اشاره نمـود و از دسته دوم میتوان روشهای حذف کامل وباحذف تدریجی را نام بـرد. در ایـن پایـان نامـه از روش معیار بهینگی با استفاده از شرایط کان تاکر وبکارگیری مدل مواد مصنوعی، برای بهینه سازی سـازه های دوبعدی تنش وکرنش مسطح استفاده می شود. به این روش، روش SIMP اطلاق می شود.

۳-۲-۲- کلیات

برای حل مسائل بهینه سازی توپولوژیک سازه می تـوان از روشـهای برنامـه ریـزی ریاضـی خطـی[1] استفاده نمود. این روشها را می توان برای حل هر مساله بهینه سازی از جمله بهینه یـابی سـازه هـا بکار برد. زمانیکه از این روشها در بهینه سازی استفاده می شود معمولاً به محاسباتی نظیر محاسـبه تابع هدف [2] ، توابع قیدی [3] و مشتقات آنها نیز می باشـد. از ایـن رو زمـان مـورد نیـاز بـرای انجـام محاسبات در روشهای برنامه ریزی ریاضی وابستگی زیادی به تعداد متغیرهـای طراحـی [4] در مـساله دارد.[۱] بنابر این زمانی که تعداد متغیرهای طراحی زیاد باشد این روشها بسیار زمان بر و پر هزینـه می باشند.

در مسائل بهینه سازی توپولوژیک سازه ها تعداد متغیرهای طراحی وابسته به تعداد المانهای تقسیم کننده فضای طراحی می باشد. از آنجاییکه غالباً تعداد المانها در یک مساله بهینه سازی توپولوژیـک

---

[1] non-linear mathematical programming
[2] objective function
[3] constraint function
[4] design variables

زیاد است بنابر این استفاده از روشهای برنامه ریزی ریاضی در مسائل بهینه سازی توپولوژیک سازه ها غیر عملی است. برای فائق آمدن بر این مشکل روشهای معیار بهینگی[1] پیشنهاد شده اند.

ایده روشهای بهینگی در سال ۱۹۰۲ توسط میشل[2] معرفی شد و در سالهای ۱۹۶۰ به بعد این روشها در کنار روشهای برنامه ریزی برای حل مسائل بهینه سازی سازه ها توسعه یافتند. روشهای معیار بهینگی بر خلاف روشهای برنامه ریزی که بطور مستقیم تابع هدف را بهینه می کنند، بصورت غیر مستقیم برای اقناع مجموعه ای از معیارهای مرتبط با رفتار سازه تلاش می کنند. که این معیارها یا به صورت درکی و یا با پایه و اساس ریاضی استخراج می شوند. روشهای " طرح بر اساس تنش یکنواخت شده[3] " و " طرح بر اساس مدهای خرابی همزمان[4] " مثالهایی از روشهای معیار بهینگی درکی می باشند.[۱] روشهای معیار بهینگی که مبنای ریاضی دارند اغلب بر پایه شرط های بهینگی کان-تاکر[5] استوار می باشند که در این فصل به این روشها پرداخته می شود.

روشهای معیار بهینگی در بهینه سازی سازه ها بوسیله دو گروه از محققین مورد استفاده قرار گرفته است. دسته اول محققانی هستند که از این روشها در حل آنالیتیک بهره گرفته اند و دسته دوم این روشها را در حل عددی مساله بهینه سازی سازه ها بکار بردند.[۱] با توسعه تحقیقات روش معیار بهینگی گسسته-پیوسته که دارای مزایای بیشتری نسبت به دو روش فوق و کاربردی تر از روشهای معیار بهینگی پیوسته می باشد، معرفی شدند. برای کسب اطلاعات بیشتر میتوان به مرجع [۱] مراجعه کرد.

با افزایش سریع حجم محاسبات در کامپیوتر های مدرن و نیاز به گسسته سازی در بیشتر مسائل علمی، روشهای معیار بهینگی گسسته-پیوسته توسط رزوانی[6] و همکارانش ارتقاء یافتند. در این فصل بکار گیری روش معیار بهینگی گسسته-پیوسته بر اساس شرایط بهینگی کان-تاکر برای حل مسائل بهینه سازی توپولوژیک دو بعدی سازه ها در محیط های پیوسته مورد توجه قرار گرفته است. برای ایجاد پیوستگی بین مطالب این فصل در بخش۳-۲-۴ شرایط بهینگی کان-تاکر در حالت کلی از مرجع [۱] گزارش می شود .

---

[1] optimality criteria
[2] Michel
[3] Fully stressed design
[4] Simultaneous failure design
[5] Kuhn-Tucker
[6] Rozvani

۳-۲-۳-مدلهای مواد

بهینه سازی توپولوژیک سازه ها ترکیب پیچیده ای از بهینه سازی ابعاد و شکل میباشد. یکی از مشکلاتی که در بهینه سازی سازه ها بوسیله تغییرات مرزی وجود دارد این است که در طرح نهایی، توپولوژی جسم نسبت به جسم اولیه تغییر نمیکند. بعبارت دیگر برای بهینه یابی کامل یک سازه بایستی توپولوژی آن مشخص باشد.[۱]

بطور معمول استفاده از تکنیک های بهینه یابی شکل با روش تغییرات مرزی به چندین بار تغییر مش در حین بهینه سازی نیاز مند است. بنابر این اعمال تغییرات توپولوژی جسم با استفاده از این روش بسیار پیچیده می نماید. در بهینه سازی توپولوژی سازه ها می بایستی بتوانیم سوراخهایی در جسم بوجود آوریم که انجام آن با روش تغییرات مرزی شدنی نیست. مضاف بر اینکه بر خلاف روشهای بهینه سازی شکل که در آنها مرز های طراحی میتوانند بوسیله مجموعه ای از قسمتهای هندسی ساده (مثل خطوط ، سهمی ها و ...) تعریف شوند، در مساله بهینه سازی توپولوژیک این کار با استفاده از تعداد محدودی از پارامتر ها انجام پذیر نمی باشد.

معرفی کردن یک تابع برای مشخص ساختن چگالی مواد در جسم با در نظر گرفتن مواد مرکب مشتمل بر تعداد نامحدودی از سوراخهای ریز که به صورت پریودیک در این جسم پخش شده اند ، مساله بهینه سازی توپولوژیک سازه ها را به یک مساله بهینه سازی ابعادی تبدیل می کند و پیچیدگی این مسائل تا حدودی بر طرف می شود. در واقع استفاده از ایده بکارگیری جسم سلولی با ریز سازه های پریودیک، طبیعی بودن یا نبودن مواد در توپولوژی جسم را از مقیاس ماکروسکوپی رهنمون شده و باعث پایداری حل می گردد.[۱]

راه های زیادی برای معرفی ریز سازه های فوق وجود دارد که آنها رامی توان به دو دسته تقسیم نمود. دسته اول ریز سازه های مرکب لایه ای[1] و دسته دوم میکرو سلول ها با حفره های داخلی میباشند. تئوری همگن سازی[2] برای محاسبه خواص مکانیکی ماکروسکوپی این مواد بکار می رود. در مورد مواد لایه ای معادله همگن سازی می تواند بصورت آنالیتیک حل شود و برای میکروسلولهای حفره دار این معادله معمولاً بوسیله روشهای عددی مثل روش اجزاء محدود حل می شود.

---

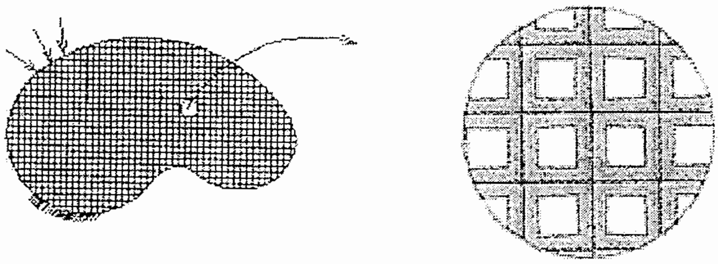
[1]Ranked layered materials
[2]Homogenization theory

در عمل پس از انتخاب فضای مرجع و تقسیم بندی آن به المانهای محدود، فرض می شود که هر المان شامل مواد سلولی با ساختار خاص خود می باشد. پارامتر های هندسی این ریزسازه ها را بعنوان متغیرهای طراحی مساله بهینه سازی مورد استفاده قرار گیرند. بایستی توجه کرد که مساله در یک فضای ثابت حل می شود و بنابر این در تحلیل به روش المان محدود، مدل المان محدود در حین الگوریتم بهینه سازی تغییر نمی کند.[۱]

راه حل دیگری نیز برای مدل کردن مواد در مسائل بهینه سازی توپولوژیک گسسته وجود دارد. در این روش بودن یا نبودن مواد با استفاده از تابع تقریب مناسبی بدست می آیدکه تابع چگالی مصنوعی نامیده می شود. با استفاده از این مواد می توان خواص مکانیکی ماکروسکوپی مواد را بدون استفاده از معادلات همگن سازی بدست آورد. لیکن این کار دقت کمتری نسبت به خواص مکانیکی بدست آمده از معادلات همگن سازی را نتیجه می دهد.

با استفاده از مدلهای مواد فوق الذکر مصالح بکار رفته بصورت توده ای از مواد خلل و فرج دار مدل می شود. در مساله مدل سازی بهینه شده با این روش پارامتر های هندسی حفره های متغییر های طراحی مساله می باشند. در صورتیکه در قسمتی از جسم تنها حفره های این ریز سازه ها بوجود آید، در توپولوژی جسم حفره ای ایجاد خواهد شد و در صورتیکه در این ریز سازه ها حفره بوجود نیاید در آن محل توپولوژی جسم حاوی مواد جامد است. با توجه به اینکه در این فصل از مواد مصنوعی با میکرو سلول های حفره دار استفاده می شود، ابتدا میکرو سلول ها با حفره های داخلی و سپس مواد مصنوعی در ادامه بحث میشوند.[۱]

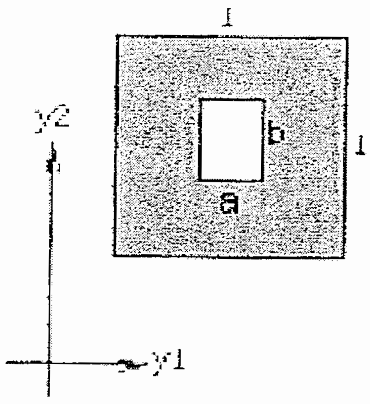
حفره های ریز مقیاس مستطیلی – در انتخاب ریز سازه ها، شکل ریز سازه یکی از مهمترین مسائلی است که بایستی به آن توجه کرد. شکل انتخاب شده بایستی به گونه ای باشد که چگالی مواد در ریز سازه بتواند کل مقدار ۰ تا ۱ را پوشش دهد. برای مثال استفاده از حفره های دایروی (و یا کروی در حالت سه بعدی) مانع از آن خواهد شد که سلول مستطیل شکل (و یا مکعب مستطیل در حالت سه بعدی) بطور کامل بصورت حفره درآید. از طرف دیگر شکل حفره بایستی با کمترین تعداد پارامتر تعریف شود تا میزان متغیرهای طراحی در مساله بهینه سازی به حداقل برسد. مربعی با حفره های مستطیل شکل در مرکز آنها ساده ترین شکل برای این منظور می باشند (شکل۳-۱). در فضای سه بعدی میکروسلولهای مکعب شکل با حفره های مکعب مستطیل شکل در مرکز آنها مورد استفاده قرار می گیرند.[۱]



شکل ۳-۱- میکرو سلول ها با حفره های مستطیلی

اگر بعد سلول مکعبی که با ε که مقدار مثبت و بسیار کوچک است نشان داده شود آنگاه اندازه سوراخ با εa و εb مشخص می گردد. شکل ۳-۲ سلول واحد را در دستگاه مختصات میکروسکوپی نشان می دهد. با استفاده از این مدل سطح اشغال شده توسط مواد جامد بصورت زیر محاسبه می شود.

$$\Omega_S = \int_{\Omega}(1-ab)d\Omega \qquad (۳-۱)$$



شکل ۳-۲-سلول واحد با حفره مستطیلی در مختصات میکروسکپی

که در این رابطه $0 \le a \le 1$ و $0 \le b \le 1$ و Ω فضای طراحی و Ω_S قسمت جامد فضای طراحی را نشان می دهد.

در حالت کلی سوراخهای ریز مقیاس در جسم سلولی می توانند نسبت به محورهای مختصات بصورت زاویه دار در نظر گرفته شوند که این انحراف زاویه θ بر ماتریس الاستیسیته تاثیر می گذارد. بنابر این در محاسبات زاویه θ بعنوان یک متغیر طراحی در نظر گرفته می شود. با توجه به نکات فوق هر نقطه $x \in \Omega$ دارای مقادیر a و b و θ میباشد که متغیرهای طراحی مساله بهینه سازی می باشند.[۱]

$$a = a(X) \;,\; b = b(X) \;, \theta = \theta(X) \tag{۳-۲}$$

در عمل این توابع بوسیله توابع ثابتی در هر المان از فضای طراحی گسسته سازی شده، تقریب زده میشوند و بنابر این ابعاد و زاویه یک ریز سازه در هر المان ثابت فرض می شود. در نتیجه ماتریس الاستیسیته همگن شده نیز برای هر المان ثابت خواهد بود. بنابر این در فضای دو بعدی اگر دامنه به N المان محدود تقسیم شود 3×N متغیر طراحی در مساله بهینه سازی توپولوژیک سازه وجود دارد.

قسمت جامد ریز سازه ها از نوع مواد ایزوتروپیک فرض می شود زیرا سوراخ مستطیل شکل در جسم سلولی حالت ارتوتروپیک را بوجود می آورد. در مسائل الاستیسیته دو بعدی (مسائل تنش مسطح) قانون هوک بصورت زیر بر قرار است.

$$\begin{Bmatrix} \sigma 11 \\ \sigma 22 \\ \sigma 12 \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} c11 & c12 & 0 \\ c12 & c22 & 0 \\ 0 & 0 & c33 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \varepsilon 11 \\ \varepsilon 22 \\ 2\varepsilon 12 \end{Bmatrix} \tag{۳-۳}$$

که در رابطه $(i,j=1,2)\sigma_{ij}$ تنشها ، ε_{ij} کرنشها و c_{ij} اعضاء ماتریس سختی کاهش یافته مواد میباشند. توجه شود که برای مواد با ساختمان سلولی اعضاء ماتریس الاستیسیته C تابعی از a و b و θ می باشند.

$$C = C(a,b,\theta) \tag{۳-۴}$$

وابستگی C به a و b بوسیله تئوری همگن سازی محاسبه میشود و تاثیر θ در مسائل دو بعدی با استفاده از قاعده چرخش بصورت زیر اعمال می شود.

$$C(a,b,\theta) = R^T(\theta).C(a,b).R(\theta) \tag{۳-۵}$$

که در این رابطه R ماتریس چرخش است. تاثیر پارامتر هـای طراحـی بـر مـاتریس الاستیـسیته در بخشهای بعدی مفصلاً بحث می شود. به این نکته نیز بایستی توجه کـرد کـه در مـسائل دو بعـدی برای سلول واحد تابع چگالی، تابعی از a و b است.

$$\rho = \rho(a,b) = (1 - ab)\rho_S \qquad (۳-۶)$$

که در این رابطه ρ_s چگالی مواد جامد می باشد .

مواد مصنوعی- در صورتیکه شکل و توپولوژی یـک سـازه را بـصورت مـوادی کـه در یـک فـضای طراحی توزیع می شوند در نظر بگیریم سازه را می توان بوسیله تابع χ توصیف کرد که این تـابع در هر نقطه x بصورت زیر تعریف می شود.

$$\chi(x) = \begin{cases} 1 & if \quad x \in \Omega_s \qquad material \\ 0 & if \quad x \in \Omega \setminus \Omega_s \quad no \quad material \end{cases} \qquad (۳-۷)$$

با فرض اینکه ایزوتروپی برای جامد وجود دارد بنابراین می توان نوشت:

$$\rho(x) = \chi(x)\rho^0 \qquad (۳-۸)$$

$$C(x) = \chi(x)C^0$$

که در این رابطه ρ^0 و C^0 به ترتیب چگالی و ماتریس الاستیسیته قسمت جامد همگن می باشند. در حل عددی مساله بهینه سازی تابع $\chi(x)$ گسسته سازی میشود و بنابر این در هر المان از فضای طراحی مساله میباشند. اما این فرمولبندی بسیار پرهزینه است و پیشنهاد نمی شود. ساده تـرین راه برای رفع این مشکل جایگزین کردن تابع پیوسته $\xi(x)$ بجای تابع گسسته $\chi(x)$ بنابر این:

$$\rho(x) = \xi(x)\rho^0 \qquad (۳-۹)$$

$$C(x) = \xi(x)C^0 \qquad (۳-۱۰)$$

که در این رابطه $0 \le \xi(x) \le 1$ و $x \in \Omega$ میباشند. توجه شود که مطابق رابطه (۳-۱۰) حجـم مواد V بصورت زیر بدست می آید:

$$V = \int_\Omega \xi(x) d\Omega \qquad (۳-۱۱)$$

اگر چه روابط (۳-۹) و (۳-۱۰) سبب ساده شدن الگوریتم بهینه سازی می شوند اما در این حالـت جواب سازه بهینه شده دارای نواحی خلل و فرج دار زیادی است. از نقطه نظر مهندسـی حلـی کـه منجر به وجود فقط قسمت جامد و یا فقط حفره شود عملی تر است. از این رو بهتر است که نـواحی

خلل و فرج دار با استفاده از جریمه ای که با $\xi(x)$ تعلق می گیرد حذف شوند. این ایده بوسیله رزوانی مطرح گردید. بنابراین رابطه (۳-۱۰) بصورت زیر تغییر می یابد:

$$C(x) = \xi(x)^{\mu} C^{0} \tag{۳-۱۲}$$

که در این رابطه μ عامل جریمه و بزرگتر از ۱ (معمولاً بین ۳ و ۹) می باشد.

تابع چگالی مصنوعی ξ برای ساختن ریز سازه های مصنوعی بابعضی پارامتر های هندسی در ارتباط است. بعنوان مثال برای ساختن جسم سلولی شامل سلولهای واحد با حفره های مستطیل شکل، $\xi(x)$بصورت زیر در نظر گرفته می شود:

$$\xi(x) = 1 - a(x)b(x) \tag{۳-۱۳}$$

همانطور که اشاره شد در مدل بکار رفته فرض میشود که مصالح حاوی تعداد زیادی سلولهای مربع شکل با حفره های مستطیلی بوده و پارامتر های a(x) و b(x) در هر المان ثابت می باشد. با فرض ایزوتروپیک بودن مصالح، ماتریس الاستیسیته مدل مواد مصنوعی بصورت زیر است:

$$C = \frac{E(1-ab)^{\mu}}{(1-\nu)^2}\begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{(1-\nu)}{2} \end{bmatrix} \tag{۳-۱۴}$$

برای مسائل سه بعدی در محیطهای پیوسته با فرض مواد ایزوتروپیک الاستیسته مصنوعی بصورت زیر میباشد:

$$C = \frac{E(1-abc)^{\mu}}{(1+\nu)(1-2\nu)}\begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ & & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ & & & (1-\nu)/2 & 0 & 0 \\ & sym & & & (1-\nu)/2 & 0 \\ & & & & & (1-2\nu)/2 \end{bmatrix} \tag{۳-۱۵}$$

که در این رابطه c بعد حفره در جهت z در سلول مکعب شکل می باشد.

۳-۲-۴- شرایط بهینه سازی کان-تاکر

یک مساله بهینه سازی را می توان بصورت کلی زیر بیان کرد:

$$\begin{aligned} &\text{Minimize} \quad f(x) \\ &\text{Such that} \quad h_j(x)=0 \quad j=1,2,\dots,n_h \\ &g_k(x)\le 0 \quad k=1,2,\dots,n_g \end{aligned} \tag{۱۶-۳}$$

در این رابطه $x=[x_1,x_2,\dots,x_n]$ متغیرهای طراحی و n_h و n_g به ترتیب تعداد قیدهای مساوی و نامساوی می باشند. قیدهای نامساوی را می توان با اضافه کردن یک متغیر اضافی بصورت قیدهای مساوی نوشت.[۱]

$$g_k(x)+S_k^2=0 \qquad k=1,2,\dots,n_g \tag{۱۷-۳}$$

شرایط لازم برای مینیمم کردن یک تابع تحت قیدهای مساوی را میتوان با استفاده از تکنیکهای کلاسیک ضرایب لاگرانژ بدست آورد. در مساله کلی (۳-۱۶) تابع لاگرانژ بصورت زیر نوشته می شود:

$$\ell(x,s,\lambda,v)=f(x)+\sum_{j=1}^{nh}\lambda_j h_j+\sum_{k=1}^{ng}v_k(g_k(x)+s_k^2) \tag{۱۸-۳}$$

که در این رابطه λ_j و v_k ضرایب لاگرانژ می باشند. شرایط ایستایی[1] برای تابع لاگرانژین فوق بصورت زیر میباشد.

$\frac{\partial\ell}{\partial x_i}=\frac{\partial f}{\partial x_i}+\sum_{j=1}^{nh}\lambda_j\frac{\partial h_j}{\partial x_i}+\sum_{k=1}^{ng}v_k\frac{\partial g_k}{\partial x_i}=0$	$i=1,\dots,n$	(۱۹-۳)
$\frac{\partial\ell}{\partial\lambda_j}=h_j=0$	$j=1,\dots,n_h$	(۲۰-۳)
$\frac{\partial\ell}{\partial v_k}=g_k+s_k^2=0$	$k=1,\dots,n_g$	(۲۱-۳)
$\frac{\partial\ell}{\partial s_k}=2v_k s_k=0$	$k=1,\dots,n_g$	(۲۲-۳)

در واقع معادلات (۳-۲۰) و (۳-۲۱) به ترتیب قید های تساوی و قیدهای نا مساوی (۳-۱۶) می باشند. روابط (۳-۲۲) که به شرایط سوئیچینگ معروفند نشان میدهند که یا v_k و یا s_k (یا هر

[1] station conditions

دو آنها) صفر می باشند. حالت $s_k=0$ بدین معنی است کـه قیـدهای g_k فعـال میباشـند. زمانیکـه $s_k\neq0$ و $v_k=0$ باشد بدین معنی است که قید های g_k غیر فعال و در نتیجه میتوان تاثیر آنها را بـر حل حذف نمود. اگر هر دو $s_k=0$ و $v_k=0$ باشد بدین معنی است کـه سـطح $g_k=0$ همـواره نقطـه بهینه را اقناع میکند و این نقطه را بایستی با استفاده از تابع هدف و دیگر قیدها بدست آورد.

از روابط (۳-۲۱) و (۳-۲۲) میتوان نتیجه گرفت که:

$$g_k \leq 0 \quad ,v_k g_k = 0 \qquad (۲۳-۳)$$

چنین به نظر می رسد که با جایگزینی روابط فوق بجای روابـط (۳-۲۱) و (۳-۲۲) قیـدی از مـساله حذف نشود.

معادله (۳-۲۳) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\nabla f + \sum_{j=1}^{nh} \lambda_j \nabla h_j + \sum_{k=1}^{nga} v_k \nabla g_k = 0 \qquad (۲۴-۳)$$

که در این رابطه n_{ga} تعداد قیدهای فعال میباشد ($n_{ga}\leq n_g$). از روابط فوق چنین بر مـی آیـد کـه ∇f در فضای ایجاد شده بوسیله ∇h_j و ∇g_k که فعال می باشـند قـرار دارد. بعبـارت دیگـر ∇f بایستی بصورت ترکیب خطی از عمودهای سطوح $h_j=0$ و g_k در حالت فعال بیان شود.

تا کنون با استفاده از تئوری ضرایب لاگرانژ که سبب ایجاد مجموعـه ای از اعـداد حقیقـی λ_j و v_k می شود، به یک سیستم معادلات غیر خطـی (۳-۱۹) – (۳-۲۲) دسـت یـافتیم کـه بایـستی ایـن دستگاه معادلات را حل کنیم. روابط (۳-۱۹) – (۳-۲۲) در این دستگاه معادلات شـرایط لازم بـرای یک نقطه ایستا می باشند.[۱]

اکنون شرایط کان-تاکر را مورد بحث قرار می دهیم. در سال ۱۹۵۱ تئوری کان-تاکر با اضافه کردن یک دسته شرط اضافی به شرایط فوق معرفی شد. البتـه ایـن شـرط هـای اضـافی کـه شـرط هـای کان-تاکر نامیده می شوند فقط برای مسائل با قیدهای نامساوی معتبر می باشند. لازم به ذکر اسـت که مساله کلی (۳-۱۶) را میتوان با قیدهای نامساوی نوشت. برای مثال $h=0$ را میتوان بـصورت دو رابطه نامساوی $h\leq0$ و $-h\geq0$ نوشت. روش دیگری که عملی تر نیز مـی باشـد ایـن اسـت کـه بـا استفاده از تکنیکهای ضرایب لاگرانژ، تابع هدف جدید با قیـدهای مـساوی در مـساله بـصورت فـرم

لاگرانژی نوشته شود که در این صورت شکل کلی مساله بصورت قیدهای نا مساوی خواهد شد. بنابر این برای راحتی کار شکل کلی مساله بهینه سازی بصورت زیر میشود:

$$\text{Minimize} \quad f(x) \tag{۳-۲۵}$$

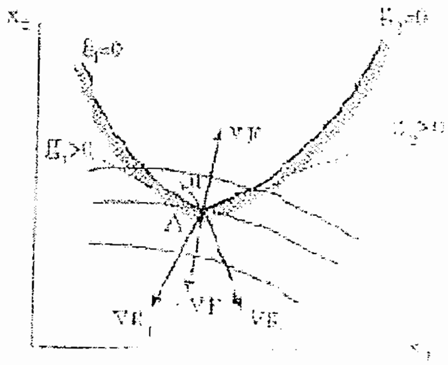
$$\text{Subject to} \quad g_k(x) \le 0 \quad k=1,2,\dots,n_g$$

مطابق تئوری کان-تاکر اگر x یک مینیمم موضعی از $F(x)$ که قیدها را اقناع میکند باشد آنگاه ضرایب v_k وجود دارند که:

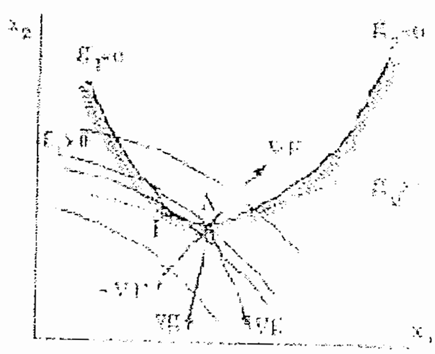
$$\nabla F(x) + \sum_{k=1}^{ng} v_k \nabla g_k(x) = 0 \tag{۳-۲۶}$$

$$v_k \ge 0 \qquad k=1,2,\dots,n_g \qquad\qquad v_k g_k = 0 \qquad k=1,2,\dots,n_g$$

نامساوی و دو تساوی رابطه (۳-۲۶) شرایط کان-تاکر نامیده می شوند. تفاوت بین شرایط کان-تاکر و آنچه که از تئوری ضرایب لاگرانژ بدست می آوریم همواره مثبت بودن v_k است. بعبارت دیگر در تئوری ضرایب لاگرانژ از علامت v_k سخنی به میان نیامد و این شرط یک شرط اضافی است که کان و تاکر آنرا معرفی کردند. برای اثبات این شرط اضافی دو تفسیر هندسی دوبعدی در شکل ۳-۳ نشان داده شده است.[۱]



(أ)



(ب)

شکل۳-۳ - بررسی شرایط بهینگی کان-تاکر

(أ) شرایط کان-تاکر اقناع میشوند و نقطه A ، نقطه بهینه است

(ب) شرایط کان-تاکر اقناع نمیشوند و نقطه A ، نقطه بهینه نیست

سعی بر آن است که بدانیم آیا نقطه A در شکلهای ۳-۳ نقطه مینیمم است یا خیر. اگر نقطه A مینیمم محلی نباشد آنگاه میتوان یک بردار جابجایی u در داخل فضای شدنی پیدا نمود که با

حرکت کردن در امتداد آن تابع هدف کاهش یابد. برای این بردار جابجایی در فضای شدنی میتـوان نوشت:

$$u^T \nabla g_k < 0 \tag{۳-۲۷}$$

u در صورتی قابل استفاده است که مقدار تابع F در امتداد آن کاهش یابد بدین معنی که:

$$u^T(-\nabla F) > 0 \tag{۳-۲۸}$$

با جایگزینی $-\nabla F$ از رابطه (۳-۲۶) در روابط فوق میتوان نوشت:

$$u^T(\sum_{k=1}^{nga} \nu_k \nabla g_k) > 0 \tag{۳-۲۹}$$

که در این صورت می توان نوشت:

$$\sum_{k=1}^{nga} \nu_k (u^T \nabla g_k) > 0 \tag{۳-۳۰}$$

بنابر این با توجه به روابط (۳-۲۷) و (۳-۳۰) نتیجه می شود که شرط اینکـه نقطـه A یـک نقطـه بهینه باشد آنست که $\nu_k \geq 0$ (که در اینصورت رابطه (۳-۳۰) غیر ممکن خواهد شد).[۱]

با استفاده از شرایط کان-تاکر میتوان آزمایش نمود که آیا نقطه کاندید شده، نقطه مینیمم است یـا خیر و از این روش بجای حل مجموعه معادلات غیر خطی استفاده کرد.

بنابراین به طور کلی شرایط بهینگی لازم برای مساله بهینه سازی با فرم کلـی (۳-۱۶) بـصورت زیـر خلاصه می شود:

(۳-۳۱)

$\frac{\partial \ell}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} + \sum_{j=1}^{nh} \lambda_j \frac{\partial h_j}{\partial x_i} + \sum_{k=1}^{ng} \nu_k \frac{\partial g_k}{\partial x_i} = 0$	$i=1,\ldots,n$
$h_j = 0$	$j=1,\ldots,n_h$
$g_k \leq 0$	$k=1,\ldots,n_g$
$\nu_k g_k = 0$	$k=1,\ldots,n_g$
$\nu_k \geq 0$	$k=1,\ldots,n_g$

توجه شود که با عوض شدن مساله بهینه سازی از صورت کمینه سازی به صورت بیشینه سازی یا عوض کردن علامت ترمهای قیدی در تابع لاگرانژین (۳-۱۸) و نیز عوض کردن جهات قیدهای نا مساوی، علامت ضرایب v_k در شرایط کان-تاکر (۳-۲۶) عوض میشود.

۳-۲-۵- مدل ریاضی برای مسائل بهینه سازی توپولوژیکی سازه ها

یک مساله کلی الاستیسیته خطی تحت اثر نیروهای حجمی بکار برده شده در دامنه Ω و نیروهای سطحی در Γ_t را در نظر می گیریم. سطح دامنه Ω دارای مرز Γ شامل Γ_d که تغییر مکانها در آن تعریف شده اند و Γ_t که بارهای سطحی در آن بکار برده شده اند میباشند. همچنین فرض می شود که:

$$\Gamma_t \cap \Gamma_d = 0 \qquad (۳-۳۲)$$

$$\Gamma_t \cup \Gamma_d = \Gamma$$

با بکار گیری روش تغییر مکان مجازی ، معادلات تعادل با مساوی قرار دادن کار مجازی داخلی و خارجی بدست آورده می شوند. با فرض اینکه u میدان تغییر مکان که تعادل سازه الاستیک را تعریف می کند باشد و v میدان تغییر مکان مجازی مجاز سینماتیکی باشد میتوان نوشت:

$$v \in V \quad where \quad V=\{v \mid v \in (H^1(\Omega))^3 \, and \quad v=0 \quad on \quad \Gamma_d \qquad (۳-۳۳)$$

با بهره گیری از تحلیل حساب تغییراتی و تابع نماها و استفاده از فرم انرژی دو خطی برای کار داخلی و فرم بار خطی برای کار خارجی رابطه (۳-۳۴) را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$a(u,v) = \ell(v), \quad \forall v \in V \qquad (۳-۳۴)$$

که در این رابطه:

$$a(u,v) = \int_{\Omega} \varepsilon^T(v).(C\varepsilon(u))d\Omega \qquad (۳-۳۵)$$

$$\ell(v) = \int_{\Omega} f.vd\Omega + \int_{\Gamma t} t.vd\Gamma \qquad (۳-۳۶)$$

هدف از مساله بهینه سازی سازه ها که در این فصل مورد بحث قرار گرفته این است که سخت ترین سازه ممکن را با استفاده از یک مقدار مصالح معین بیابیم .مینیمم بودن مقدار کار خارجی با میدان تغییر مکان حقیقی و یا مینیمم بودن $\ell(u)$، ماکزیمم بودن سختی عمومی یک سازه را فراهم می کند. بنابر این مساله بهینه سازی سازه ها با قرار دادن $\ell(u)$ بعنوان تابع هدف بصورت زیر ساخته می شود.

$$\begin{aligned} &Minimize \quad \ell(u) \\ &Subjectto \quad a(u,v)=\ell(u) \quad \forall v \in V \\ &and \quad design \quad restrictions \end{aligned} \tag{۳۷-۳}$$

که در این رابطه محدودیتهای طراحی، $a(u,v)$ و $\ell(u)$ تـوابعی از متغیرهـای طراحـی مـی باشـند. چنانکه قبلاً دیدیم متغیرهای طراحی مساله بهینه سازی توپولوژیک پـارامتر هـای هندسـی سـوراخ ریز مقیاس مصالح فرض شده برای مساله می باشد (برای مثال پـارامتر هـای a و b و θ در مـصالح شامل سلولهای مربعی با سوراخهای مستطیل شکل).

با جایگزین کردن $u \in V$ بجای v در رابطه (۳-۳۴) معادله زیر بدست می آید:

$$a(u,u)=\ell(u) \tag{۳۸-۳}$$

یاد آوری میشود که $\frac{1}{2}a(u,u)$ نشان دهنده انرژی کرنشی است بنایر این نتیجه گرفته می شود که مینیمم کردن $\ell(u)$ معادل مینیمم کردن انرژی کرنشی است. از سوی دیگر انرژی پتانسیل کـل را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$\prod(u)=\frac{1}{2}a(u,u)-\ell(u) \tag{۳۹-۳}$$

با جایگزین کردن رابطه (۳-۳۸) در رابطه فوق می توان نوشت:

$$\prod(u)=-\frac{1}{2}\ell(u) \tag{۴۰-۳}$$

از رابطه فوق چنین نتیجه می شود که مینیمم کردن $\ell(u)$ معادل ماکزیمم کردن انرژی پتانسیل کل می باشد. بنابراین مساله کلی بهینه سازی (۳-۳۸) را میتوان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} &Maximize \quad \prod(u) \\ &Subject \quad to \quad a(u,v)=\ell(v) \quad \forall v \in V \\ &and \quad design \quad restrictions \end{aligned} \tag{۴۱-۳}$$

با استفاده از اصل مینیمم کردن انرژی پتانسیل رابطه(۳-۲۲) را می توان بصورت زیر نوشت:

$$\begin{aligned} &\max \quad \min \quad \prod(u) \\ &design \quad v \in V \\ &subject \quad to \quad design \quad restrictions \end{aligned} \tag{۴۲-۳}$$

دلیل ساختن مساله بهینه سازی بر اساس انرژی پتانسیل کل آنست که این روش کلی است و همیشه مساله بهینه سازی را برای سخت ترین سازه تعریف می کند. حال آنکه در مورد مساله ای با تغییر مکانهای مرزی از قبل تعریف شده غیر صفر و در غیاب نیروهای حجمی و سطحی، سخت ترین سازه در حالت انرژی کرنشی ماکزیمم رخ می دهد ولی در بیشتر موارد دیگر انرژی کرنشی می بایست مینیمم شود. بنابراین نمیتوان از انرژی کرنشی و یا $\ell(u)$ با اطمینان در همه مسائل بعنوان تابع هدف بهره گرفت.[۱]

۳-۲-۶-معیار بهینگی برای بهینه سازی توپولوژیک سازه ها

۳-۲-۶-۱-شرایط بهینگی

در این بخش شرایط بهینگی برای مسائل دو بعدی در محیطهای پیوسته مورد بحث قرار می گیرند. برای مدل کردن مواد در مسائل دو بعدی از ریزسازه های مربع با حفره های مستطیل شکل به ابعاد a و b استفاده می شود. قابل توجه است که در حالت سه بعدی زاویه برای مشخص ساختن انحراف ریز سازه ها بایستی در نظر گرفت بنابر این متغیر های طراحی در مساله a و b و θ_1 و θ_2 خواهند بود.

مساله بهینه سازی (۳-۲۶) را میتوان بصورت زیر تعمیم داد:

$$\max_{a^e, b^e, \theta_1^e, \theta_2^e} \quad \Pi(u) \qquad (۳-۴۳)$$

$$\text{subject to} \quad V_s \le \bar{V}_s$$

$$\text{and} \quad 0 \le a, b \le 1$$

که در این رابطه V_s حجم مصالح جامد و $\bar{V}_s$ حد بالای حجم مصالح در مسائل دو بعدی می باشند. رابطه فوق در حالت گسسته بصورت زیر نوشته می شود:

$$\max \quad \Pi(u)$$

$$a^e, b^e, \theta_1^e, \theta_2^e \qquad (e = 1, \dots, N)$$

$$\text{subject to} \quad \sum_{e=1}^{N} (1 - a^e b^e) V^e - \bar{V}_s \le 0 \qquad (۳-۴۴)$$

$$\text{and} \quad a^e - 1 \le 0, \quad -a^e \le 0, \quad e = 1, \dots, N$$

$$b^e - 1 \le 0, \quad -b^e \le 0, \quad e = 1,\dots N$$

که در این رابطه N تعداد المانها بوده و $\Pi(u)$ در فضای گسسته بصورت زیر می باشد:

$$\Pi(u) = \frac{1}{2}\sum_{e=1}^{N}\int_{v^e}\varepsilon^T(u)C^e\varepsilon(u)dv - \sum_{e=1}^{N}\int_{v^e}u^T f dv - \sum_{e=1}^{N}\int_{\Omega_1^e}u^T t d\Omega \tag{۴۵-۳}$$

اکنون با معرفی ضرایب لاگرانژ λ_{ao}^e و λ_{a1}^e و λ_{b0}^e و λ_{b1}^e و λ_{c0}^e و λ_{c1}^e و Δ، تابع لاگرانـژ در مساله (۳-۴۵) بصورت زیر ساخته می شود:

$$\ell = \Pi(u) - \Delta\left[\sum_{e=1}^{N}(1-a^e b^e)V^e - \bar{V}_s\right] - \sum_{e=1}^{N}\lambda_{a0}^e(-a^e) - \sum_{e=1}^{N}\lambda_{a1}^e(a^e-1) - \sum_{e=1}^{N}\lambda_{b0}^e(-b^e) - \sum_{e=1}^{N}\lambda_{b1}^e(b^e-1) \tag{۴۶-۳}$$

شرط ایستایی ℓ نسبت به a عبارتست از:

$$\frac{\partial\Pi(u)}{\partial a^e} + \Delta b^e V^e + \lambda_{ao}^e - \lambda_{a1}^e = 0, \qquad e = 1,\dots,N \tag{۴۷-۳}$$

با جایگزینی $\Pi(u)$ از رابطه (۳-۴۵)، رابطه فوق را می توان بصورت زیر بازنویسی کرد:

$$\frac{1}{2}\int_{v^e}\varepsilon^T(u)\frac{\partial C^e}{\partial a^e}\varepsilon(u)dv - \int_{v^e}u^T\frac{\partial f}{\partial a^e}dv + \Delta b^e V^e + \lambda_{a0}^e - \lambda_{a1}^e = 0 \tag{۴۸-۳}$$

بطور مشابهی، شرط ایستایی تابع لاگرانژ نسبت به $\theta_2^e, \theta_1^e, b^e$ بصورت زیر خواهد بود:

$$\frac{1}{2}\int_{v^e}\varepsilon^T(u)\frac{\partial C^e}{\partial b^e}\varepsilon(u)dv - \int_{v^e}u^T\frac{\partial f}{\partial b^e}dv + \Delta b^e V^e + \lambda_{b0}^e - \lambda_{b1}^e = 0 \tag{۴۹-۳}$$

$$\frac{1}{2}\int_{v^e}\varepsilon^T(u)\frac{\partial C^e}{\partial \theta_1^e}\varepsilon(u)dv = 0 \tag{۵۰-۳}$$

$$\frac{1}{2}\int_{v^e}\varepsilon^T(u)\frac{\partial C^e}{\partial \theta_2^e}\varepsilon(u)dv = 0 \tag{۵۱-۳}$$

اکنون با استفاده از شرایط کان-تاکر مشابه رابطه (۳-۳۱)، شرایط سوئیچینگ بـصورت زیـر بدسـت می آیند:

$$\sum_{e=1}^{N}(1-a^e b^e)V^e - \bar{V}_s \le 0 \quad ; \quad \Delta\left[\sum_{e=1}^{N}(1-a^e b^e)V^e - \bar{V}_s\right] = 0 \quad ; \quad \Delta \ge 0 \tag{۵۲-۳}$$

$$a^e - 1 \le 0; \quad \lambda_{a1}^e(a^e-1) = 0; \quad \lambda_{a1}^e \ge 0; \quad e = 1,\dots,N \tag{۵۳-۳}$$

$$-a^e \le 0; \quad \lambda_{a0}^e(-a^e) = 0; \quad \lambda_{a0}^e \ge 0; \quad e = 1,\dots,N \tag{۵۴-۳}$$

$$b^e - 1 \le 0; \quad \lambda_{b1}^e(b^e - 1) = 0; \quad \lambda_{b1}^e \ge 0; \quad e = 1,\dots,N \tag{۵۵-۳}$$

$$-b^e \le 0; \quad \lambda_{bo}^e(-a^e) = 0; \quad \lambda_{b0}^e \ge 0; \quad e = 1,\dots,N \tag{۵۶-۳}$$

حل معادلات (۳-۴۸)تا (۳-۵۶) منجر به پیدا شدن نقطه ای در فضای طراحی می گردد که شرایط لازم برای بهینگی را اقناع میکند. اما حل این معادلات کار چندان ساده ای نیست از این رو سعی می شود تا بکار گیری یک الگوریتم معیار بهینگی را حل کنیم.[۱] این معیارها بر اساس یک روش بهبود تدریجی پایه گذاری می شوند بطوریکه با شروع از یک نقطه شدنی در فضای طراحی، در هر مرحله متغیرهای طراحی ارتقاء داده می شوند. به این ترتیب حل به تدریج به سمت نقطه بهینه حرکت می کند. روشی که بوسیله این مفهوم پایه گذاری شود به لحاظ محاسباتی روشی بسیار کاراست، اگر چه این روش نمیتواند همواره همگرایی حل را تضمین کند.[۱]

۳-۲-۶-۲-روش بهبود تدریجی

با بکار گیری روند بهبود تدریجی در روش معیار بهینگی در هر مرحله از بهینه سازی متغیرهای طراحی جدید (بعنوان مثال a^e , b^e) ساخته می شوند. برای استخراج روش ارتقاء دهی از اثر متقابل متغیرهای طراحی بر یکدیگر و همچنین اثر یک المان بر المان دیگر صرفنظر می شود.[۱] بعبارت دیگر در هر مرحله از بهینه سازی، متغیرهای طراحی بصورت مستقل بهبود می یابند. در روش بهبود تدریجی متغیرهای طراحی a^e , b^e در جهت بهینه شدن تغییر داده وبهینه می شوند.

اگر E_a^e بصورت زیر تعریف شود:

$$E_a^e = \frac{\frac{1}{2}\int_{v^e} \varepsilon^T(u)\left(\frac{\partial C}{\partial a^e}\right)\varepsilon(u)dV - \int_{v^e} u^T\left(\frac{\partial f}{\partial a^e}\right)dV}{-\Delta b^e V^e} \tag{۵۷-۳}$$

آنگاه رابطه (۳-۴۸) بصورت زیر بازنویسی می شود.

$$E_a^e = 1 + \frac{\lambda_{a0}^e}{\Delta b^e V^e} - \frac{\lambda_{a1}^e}{\Delta b^e V^e} \qquad (۵۸-۳)$$

به این نکته توجه شود که اگر فرض شود حدود پایین و بالای قیدهای a^eفعال نباشند (یعنی $0 < a^e < 1$) آنگاه $\lambda_{a0}^e = \lambda_{a1}^e = 0$ و در نتیجه (۳-۵۸) بصورت $E_a^1 = 1$ خواهد شد.

اکنون تصور می کنیم که در مرحله k ام متغیر a_k^e کاهش یافته و در جهت نقطه بهینه حرکت می کند. بنابر این $a_k^e < 1$ یعنی قید حد بالای آن غیر فعال است که در اینصورت $\lambda_{a1}^e = 0$ خواهد بود. از طرفی با توجه به اینکه $\Delta b^e V^e$ یک عدد مثبت حقیقی و $\lambda_{a0}^e \geq 0$ است بنابراین از رابطه (۳-۵۸) چنین نتیجه می شود که $E_a^e > 1$. از طرف دیگر به ازای زیاد شدن a_k^e نتیجه می گیریم که $E_a^e \leq 1$. با الهام گرفتن از این بحث میتوان گفت که اگر $E_a^e > 1$ باشد آنگاه بایستی a_k^e را با استفاده از یک مقدار جزئی ς کاهش داد (یعنی $a_{k+1}^e = a_k^e(1-\varsigma)$) تا حل به نقطه بهینه نزدیک گردد همچنین زمانیکه $E_a^e < 1$است برای حرکت در جهت نقطه بهینه بایستی $a_{k+1}^e = a_k^e(1+\varsigma)$ باشد. بر پایه این نتیجه گیری و در نظر گرفتن حدود a^e ($0 \leq a^e \leq 1$) بندسو روش تغییر ابعاد زیر را پیشنهاد کرد [۱]:

$$a_{k+1}^e = \begin{cases} \min\{(1+\varsigma)a_k^e, 1\} & if \quad a_k^e(E_a^e)_k \leq \max\{(1-\varsigma)a_k^e, 0\} \\ a_k^e\left[(E_a^e)_k\right]^\eta & if \quad \max\{(1-\varsigma)a_k^e, 0\} < a_k^e(E_a^e)_k < \min\{(1+\varsigma)a_k^e, 1\} \\ \max\{(1-\varsigma)a_k^e, 0\} & if \quad \min\{(1+\varsigma)a_k^e, 1\} \leq a_k^e(E_a^e)_k \end{cases} \qquad (۵۹-۳)$$

و با تعریف E_b^eبصورت زیر:

$$E_b^e = \frac{\frac{1}{2}\int_{V^e} \varepsilon^T(u)(\frac{\partial C}{\partial b^e})\varepsilon(u)dv - \int_{V^e} u^T(\frac{\partial f}{\partial b^e})dv}{-\Delta a^e V^e} \qquad (۶۰-۳)$$

آنگاه b^e بهبود یافته زیر می باشد.

$$b_{k+1}^e = \begin{cases} \min\{(1+\varsigma)b_k^e, 1\} & if \quad b_k^e(E_b^e)_k \leq \max\{(1-\varsigma)b_k^e, 0\} \\ b_k^e\left[(E_b^e)_k\right]^\eta & if \quad \max\{(1-\varsigma)_k^e, 0\} < b_k^e(E_b^e)_k < \min\{(1+\varsigma)b_k^e, 1\} \\ \max\{(1-\varsigma)b_k^e, 0\} & if \quad \min\{(1+\varsigma)b_k^e, 1\} \leq b_k^e(E_b^e)_k \end{cases} \qquad (۶۱-۳)$$

در این روابط η ضریب میرایی و اندیس k نشان دهنده شماره مرحله بهینه سازی می باشد. برای در نظر گرفتن ضریب میرایی مناسب در مساله میتوان به مرجع ۱ مراجعه نمود.

نکته مهمی که بایستی به آن توجه داشت اینکه $(E_a^e)_k$ و $(E_b^e)_k$ وابسته به مقدار دقیـق Δ_k (ضریب لاگرانژ قید فعال حجم) می باشند که بایستی در هر لوپ مشخص باشد. برای ایـن منظـور روشهایی نظیر روش نیوتن-رافسون و یا روش نصف نمودن فاصله را میتـوان بکـار بـرد. در اینجـا از روش نصف نمودن فاصله برای این کار استفاده می شود. این روش، محاسبه Δ در مراحل زیر انجام می شود.[۱]

۱- یافتن Δ^0_{max} و Δ^0_{min} با شرایط روبرو: $V_s(\Delta^0_{max}) < \bar{V}s \quad , \quad V_s(\Delta^0_{min}) > \bar{V}_s$

۲- محاسبه Δ^m بصورت روبرو: $\Delta^m = \frac{1}{2}(\Delta^m_{min} + \Delta^m_{max})$

۳- محاسبه $V_s(\Delta^m)$ و جایگزین کردن Δ^mیا بجای Δ_{min} و Δ_{max} بصورت زیر:

$$\begin{cases} if \quad V_s < \bar{V}_s \quad then \quad \Delta^{m+1}_{max} = \Delta^m \\ if \quad V_s > \bar{V}_s \quad then \quad \Delta^{m+1}_{min} = \Delta^m \end{cases}$$

۴- تکرار ۲ و ۳ تا زمانیکه: $\left|V_s - \bar{V}_s\right| \le \delta$

در مراحل فوق δ نشان دهنده تلورانس قابل قبول برای قید حجم می باشد. توجـه شـود کـه بـرای پایداری الگوریتم، بعد جابجایی ς و تلورانس برای قید δ بایستی متناسب انتخـاب گردنـد. بعنـوان یک قاعده کلی زمانیکه بعد جابجایی ς بزرگ است بایستی حجم آزادی بیشتری داشته باشد یعنی δ بزرگتر انتخاب شود.

۳-۲-۶-۳-روش بهبود تدریجی ارتقاء یافته

در روش بهبود تدریجی که در بخش قبل توضیح داده شد تفاوت بـین مقـادیر پـارامتر هـای ابعـاد سلول (متغیر های طراحی) در دو مرحله متوالی (مـثلاً a_k^e و a_{k+1}^e) بـه بزرگـی ایـن پـارامتر هـا وابسته است بدین معنی که برای مقادیر بزرگ متغیرهای طراحی تغییر سـریعتر انجـام مـی شـود و سرعت بهبودیابی برای مقادیر کوچک این متغیرها بسیار کم است. درواقع تعداد نامحدودی مرحلـه لازم است تا متغیر های طراحی به صفر (حالت حفره کامل) برسند.

برای داشتن یک الگوریتم پایدار مطابق الگوریتم بخش قبل و همچنین رفع مشکل فوق، یـک روش بهبود تدریجی توسط دکتر بهروز حسنی [۱] بصورت زیر پیشنهاد شده است:

$$a_{k+1}^e = \begin{cases} \min\left\{(1+\frac{\varsigma}{\left|a_k^e-\varsigma\right|})a_k^e, 1)\right\} & if \quad a_k^e(E_a^e)_k \le \max\left\{(1-\varsigma)a_k^e, 0\right\} \\ a_k^e\left[(E_a^e)_k\right]^{-1/a_k^e} & if \quad \max\left\{(1-\varsigma)a_k^e, 0\right\} < a_k^e(E_a^e)_k < \min\left\{(1+\varsigma)a_k^e, 1\right\} \\ \max\left\{(1-\frac{\varsigma}{\left|a_k^e-\varsigma\right|})a_k^e, 0\right\} & if \quad \min\left\{(1+\varsigma)a_k^e, 1\right\} \le a_k^e(E_a^e)_k \end{cases} \quad (۶۲\text{-}۳)$$

و

$$b_{k+1}^e = \begin{cases} \min\left\{(1+\frac{\varsigma}{\left|a_k^e-\varsigma\right|})a_k^e, 1)\right\} & if \quad b_k^e(E_b^e)_k \le \max\left\{(1-\varsigma)b_k^e, 0\right\} \\ b_k^e\left[(E_b^e)_k\right]^{-1/b_k^e} & if \quad \max\left\{(1-\varsigma)b_k^e, 0\right\} < a_k^e(E_b^e)_k < \min\left\{(1+\varsigma)b_k^e, 1\right\} \\ \max\left\{(1-\frac{\varsigma}{\left|b_k^e-\varsigma\right|})b_k^e, 0\right\} & if \quad \min\left\{(1+\varsigma)b_k^e, 1\right\} \le b_k^e(E_b^e)_k \end{cases} \quad (۶۳\text{-}۳)$$

اگر یک مساله با شرایط یکسان و اندازه جابجایی برابر را با استفاده از دو روش بهبود تدریجی ذکر شده حل نمائیم روش فوق سریعتر به جواب می رسد.

۳-۳- بهینه سازی شکل به روش CA

۳-۳-۱- مقدمه

تحلیل سازه ای و بهینه سازی طراحی قسمت مهم هر صنعتی را تشکیل می دهد. سطوح کاربردی آن از کاربردهای ساده ای همچون آزمایش و بهینه سازی تیر تکیه گاه تا کاربردهای پیچیده ای همچون بهینه سازی سازه برای مقاومت آن می باشد. اجرای مراحل طراحی به صورت دستی وقت گیر است، بنابراین تعداد بارزی از تحقیقات بر روی ایجاد روش های کارآمد به جهت نرم افزاری کردن روند طراحی کار می کنند.[۱۲]

روش های قدیمی برای طراحی نرم افزاری شامل انجام شبیه سازی ها بر اساس پردازنده های مخصوص می باشد. در این روش ها محاسبات باید با دقت بالا انجام شود. موازی سازی محاسبات، در هر جایی که ممکن باشد انجام می شود، نه با ابر رایانه های گران قیمت دارای صدها پردازنده.

CA یک ابزار قدرتمند برای مدل کردن پدیده های فیزیکی می باشد. مدل های CA رفتار سیستم های پیچیده ای همچون جریان هوا در اطراف بال و ازدحام عابرین را به طور موفقیت آمیزی پیش

بینی می کند. اخیرا تئوری CA به تحلیل سازه ای وبهینه سازی سازه نیز کشیده شده است. [۱۳]

در این تحقیق روش HCA[1] برای تسهیل بهینه سازی شکل سازه، شرح داده شده است. روش شناسی[2] HCA برای اجرا در سازه های پیوسته تهیه شده است. تهیه این روش شناسی، از روند زیست شناختی رشد لایه ای استخوان الهام گرفته است که به صورت مدل سازی دوباره لایه های استخوان می باشد و فقط المانهایی که روی سطح ترکیب سخت شده قرار گرفته اند می توانند اصلاح شوند.[۱۲] در روش شناسی HCA که در این رساله اجرا شده است فقط چگالی عناصر سطحی است که می تواند در طول روند ساخت سازه عوض شود. روش HCA قوانین طراحی بر پایه الگوهای CA و تحلیل المان محدود را با هم ترکیب می کند. کنترل حلقه محیطی برای اصلاح توزیع جرم روی سطح خارجی و داخلی دامنه طراحی برای بدست آوردن یک سازه بهینه مورد استفاده قرار می گیرد. کنترل محلی، تعادل بین جرم و جسم صلب را حفظ می کند. روش شناسی جدید، بهینه سازی شکل را انجام می دهد.

۳-۳-۲-تاریخچه

ایده تئوری CA قادر به مدل کردن سیستم هایی که دارای اجزای مختلفی هستند می باشد. سیستم ها به واحد های مجزا یا سلول ها تقسیم می شوند که به صورت هماهنگ عمل می کنند. و تعداد وضعیت های مختلف مسئله را حل می کنند. الام[3] که به طور کل با اولین عملکردش در CA معروف شد، در اصل به چنین فضای سلولی یا شبکه های نرم افزاری بر می گردد. جان ون نیومان[4] کار الام را بسط داد و CA را به عنوان یک روش برای مدل کردن سیستم های زیست شناختی تولید شونده منظور کرد. کار الام و نیومان یک روش رسمی برای شبیه سازی سیستم های پیچیده ایجاد می کند. تحقیق آنها و بیشتر تحقیق های موجود در زمینه CA بر مدل کردن سیستم های دینامیکی متمرکز است که در هر مکان و زمان مجزا باشند. محاسبه وضعیت بعد از تمام سلول های درون یک سیستم، بیانگر یک مرحله از روش CA می باشد. یک مثال خوب از اینگونه مدل CA

[1] Hybrid cellular automata
[2] Methodology
[3] Ulam
[4] John von neuman

"بازی زندگی کانوی"[1] در سلول هایی که می توانند در یک یا دو وضعیت زنده یا مرده باشند، می باشد که بهنگام کردن هر یک از وضعیت های کلی یک نسل جدید از ارگانیسم ها را بیان می کند.[۱۴]

در کار کردن بر روی شبکه های نقطه ای دو بعدی که در همسایگی سلولی مشترک وجود دارند، اولین همسایگی ون نیومان است که در آن هر سلول فقط با چهار سلول مجاور خود ارتباط دارد و دومی همسایگی مور[2] است که در آن هر سلول با هشت سلول احاطه کننده خود ارتباط دارد همسایگی ام ون ان[3] از نه سلول (سلول مرکز) در همسایگی مور و چهار سلول که با یک خانه فاصله از آن قرار دارند تشکیل شده است.[۱۴]

مدل هایی که در آنها ارتباط و قوانین جدید وجود دارد، هماهنگ نامیده می شود. با این که در خیلی از کارهای انجام شده در زمینه CA از مدل های هماهنگ استفاده می شود، استفاده از قوانین نا هماهنگ الزاما از کارایی روش CA کم نمی کند.

شبکه نقطه گذاری برای مدلCA می تواند محدود یا نامحدود باشد. در این کار ون نیو مان شبکه های نقطه ای نامحدود را به عنوان یک روش برای ساختن یک محاسبه گر جهانی مورد آزمایش قرار می دهد. با اینکه کار ون نیومان روی شبکه های نقطه گذاری محدود تئوری بود، اما روش هایی نیز برای بیان و محاسبه مدل های CA بر اساس شبکه های نقطه گذاری نا محدود نیز ایجاد شده است. شبکه های نقطه گذاری محدود برای اجرا و پردازش در موازی سازی خیلی ساده تر هستند، زیرا اندازه حداکثر محدوده فعال قبل از شروع پردازش شناخته شده است.

بعضی از جدیدترین تحقیقات در CA در زمینه آنالیز و طراحی سازه ای قرار دارد. اولین کار در این محدوده ایجاد روش هایی برای بهینه سازی محدوده های متقاطع و زاویه دار خرپاها در یک سازه ثابت می باشد. این روش ها درشبیه سازی تحلیل و طراحی دریک مدل CA به صورت موفقیت آمیزی تهیه شده است و امکانات محاسبات قدرتمندی را به ما نشان می دهد.این موفقیت به علت بسط تئوریCA برای ایجاد مدل هایی برای دیگر مسائل طراحی سازه ای، کار بیشتری را می طلبد .

---

[1]Conway 's game of life
[2]Moor
[3]M Von N

بهینه سازی شکل شامل تعیین شکل بهینه یا مرز سازه می باشد. دو دستاورد مشترک بـرای بهینـه سازی شکل عبارتند از: بردار پایه[1] و آشفتگی شـبکه [2]. دسـتاورد بـردار پایـه بـه تعریـف طرحهـای آزمایشی مختلف که بردار پایه نامیده می شوند نیـاز دارد. متغیرهـای طراحـی ، پارامترهـای وزنـی هستند که مشارکت هر بردار پایه را در روند طراحی مشخص مـی کننـد. از طـرف دیگـر دسـتاورد آشفتگی شبکه به مشخص کردن آشفتگی نیاز دارد. این بردارهـا مـرز دامنـه طراحـی را دسـتخوش تغییر قرار می دهند. متغیرهای طراحی در این روش مقادیری هستند که میزان آشفتگی را در طول روند بهینه سازی تعیین می کنند.

بهینه سازی توپولوژی برای دستیابی به توزیع بهینه مصالح در یک مقدار محدود (دامنـه طراحـی) تلاش می کند. که المانهای مکانیکی مشخصی را تحت محدودیت مشخص به حداکثر مـی رسـاند. در یک سازه پیوسته، دامنه طراحی به تعداد زیادی از عناصـر کـه بیـان کننـده قـسمتهای محـدود مصالح هستند تقسیم شده است. الگوریتم بهینه سازی توپولوژی، این المانهـا را بـرای دسـتیابی بـه المان بهینه به طور مشخص جابه جا و جاگذاری می کند. روشهای محـدودی کـه در بیـشتر بـسته های نرم افزاری[3] موجـود اسـت مـشکل توزیـع مـصالح را توسـط پـارامتری کـردن مجموعـه ای از متغیرهای طراحی پیوسته حل می کند. متغیرهای طراحی بـه نـوع مـدل مـصالح بـه کـار رفتـه در الگوریتم بهینه سازی بستگی دارد. خصوصیات طبیعـی مـصالح، دسـتاوردهای متفـاوتی را از بهینـه سازی توپولوژی به دست می آورد. معمول ترین دستاوردهای مبنا (مبدأ) دستاورد یکجورسـازی و دستاورد SIMP (مصالح دارای خواص فیزیکی مشابه جامد با جریمه) می باشـد.[۱۵] بـه عنـوان نمونه مثال رزوانی و الهوف[4] و شنایر[5] را ببینید.[۸] در دستاورد SIMP، خواص مصالح در هر المان ثابت به نظر می آید. معمولاً یک چگالی وابسته پیوسته به عنوان یک متغیر طراحی مـورد اسـتفاده قرار می گیرد. هر المان E_i، به عنوان یک عملگرد چگالی وابسته X_i، با استفاده از قانون نیرو مـدل شده استفاده که اینگونه است:

$$E_i(X_i) = x_i^p E_0 \qquad (p \geq 1) \tag{۶۴-۳}$$

$$\rho_i(X_i) = x_i^p \rho_0 \qquad (0 \leq x_i \leq 1)$$

---

[1] Basis vector
[2] Grid perturbation
[3] Commercial package
[4] Olhof
[5] Eschenauer

در حالی که ρ_0 چگالی پایه مصالح است، ρ_i چگالی متغیر می باشد و p یک نیروی جریمه می باشد. این نیرو برای جریمه چگالی های متوسط که به طور کلی به یک سازه سیاه و سفید منجر می شود مورد استفاده قرار می گیرد. به عنوان یک نگاه کلی به این روش مثال بندسو[1] و سیگموند[2] را ببینید.[۹]

در بهینه سازی توپولوژی تعداد المانها و همچنین تعداد متغیرهای طراحی به اندازه دامنه طراحی بستگی دارد. حتی طراحی یک ترکیب مکانیکی کوچک باید شامل هزاران متغیر طراحی باشد. بعلاوه میزان تابع با تعداد المانها افزایش نیابد. این کار اجرای روش های عددی مشخص شده کارآمد را بر می انگیزد. بعضی از معمول ترین روش ها شامل تکنیک های تقریبی [3]، روشهای خط مجانب متحرک یا (MMA)[4] و معیار بهینه می باشند.[۱۰]

ناپایداری های عددی مثل چکر بورد[5] و وابستگی مش به طور معمول در بهینه سازی توپولوژی یافت می شود. چکربورد به محدوده هایی که اجزاء توپر (سیاه) و بازشدگی ها (سفید) که در نهایت یک الگوی چکربورد را انتخاب میکنند بر می گردد.

وابستگی مش به طور مساوی برای به بدست آوردن توپولوژیهای متفاوت برای اندازه های مختلف مش برمی گردد. معمولاً روشهای فیلترینگ عکس[6]، شیب ثابت[7] و روش های کنترل محیطی[8] در رابطه با این ناپایداری های عددی مورد استفاده قرار می گیرند. هدف این روشها کم کردن منغییرهای فضایی از متغیرهای طراحی برای اجتناب از ناپایداری ها می باشد. با این حال تاخیرهای همگرا و چگالی های متوسط با کاربرد این تکنیک ها همراه می باشد.

در مثال تووار[9] یک روش جدید برای بهینه سازی توپولوژی ایجاد شده است.این دستاورد ناپایداری عددی را با استفاده از یک اصل CA کاهش می دهد. این روش با قاعده کنترل محلی به روش HCA بر می گردد. در این روش دامنه طراحی در یک شبکه معمولی CA ها جدا سازی می شوند. هر CA متغیرهای طراحی را به طور محلی بر اساس قانون طراحی اصلاح می کند. این

---

[1] bendso
[2] Sigmond
[3] Approximation techniques
[4] Method of moving asymptotes
[5] Checker boarding
[6] Image filtering technique
[7] Gradient constraint
[8] Perimeter control strategy
[9] Lowar

قانون چگالی انرژی کرنشی محلی (SED) را با استفاده از یک استراتژی کنترل به یک SED هدف محلی می برد. این دستاورد در مدلهای کنترل پیشنهاد شده در شبیه سازی رشد لایه ای استخوان القاء شده است. در مثال تووار[1] ، روش قانون نیرو به عنوان مدل مصالح به کار می رود.[۱۱]

در این تحقیق روش شناسی HCA شامل هر دو جنبه بهینه سازی توپولوژی و بهینه سازی شکل شرح داده شده است. فقط المانهای سطحی روی سازه می توانند توسط الگوریتم HCA اصلاح شوند. این روش، به طور موثر از روش های بهینه سازی شروع شونده از یک طبقه (دسته) سازه ای شناخته شده پیروی می کند. این کار از روند زیست شناختی در رشد لایه ای استخوان در حالی که فقط اجزای سطحی تغییر وضع داده اند الهام گرفته شده است.

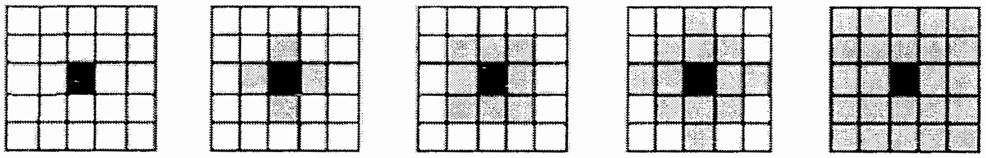
۳-۳-۳- الگوی HCA

ارزیابی زمانی کمیت های فیزیکی اغلب توسط معادلات دیفرانسیل جزئی غیر خطی کنترل شده است. در بیشتر حالت ها راه حل این سیستمهای دینامیکی می تواند خیلی پیچیده و نیز در برابر شرایط اولیه بسیار حساس باشند. CA ، یک روش نهایی را برای توصیف و شبیه‌سازی رفتارسیستم های پیچیده تامین می کند.

CA ها یک روش محاسبه ای هستند که برای شبیه سازی پدیده زیست شناختی به مدت بیش از ۶۰ سال مورد استفاده قرار می گرفتند. CA ها از سال ۱۹۴۶ توسط رزن بلانس[2] و وینر[3] برای انجام جراحی ماهیچه قلب مورد استفاده قرار می گرفتند. جان وان نیومان[4] نظریه CA را در پایان دهه سالهای ۱۹۴۰ فرمول سازی کرد. مدل های CA از یک شبکه سلول های معمولی تشکیل شده است. همسایگی CA یک بازه عملی دلخواه از قانون محلی می باشد. همسایگی هیچ محدودیتی از نظر اندازه یا جایگاه ندارد بجز اینکه برای تمام CA ها مشترک است. تا زمانی که محاسبات همسایگی ها محدود شود و قواعد محلی برای تمام شبکه مشابه باشد، CA ها برای داشتن قابلیت محاسباتی موازی اصلی ایجاد شده اند. در عمل اندازه همسایگی اغلب به روزنه های مجاور محدود می شوند، اما می توانند گسترش داده شوند.

---

[1] Tovar
[2] Rosenblunth
[3] Weiner
[4] John von neuman

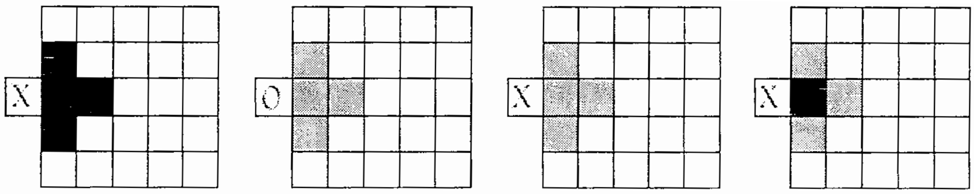


(a) (b) (c) (d) (e)

شکل ۳-۵-همسایگی های CA.(a) خالی(N=۰)،(b) وون نیومان(N=۴)، (c) مور (N=۸)، (d)ام ون ان (N=۱۲)، و (e) گسترده(N=۲۴)

شکل ۳-۵ بخشی از لایه های همسایگی مشترک را نشان می دهد. رایج ترین موارد بـه کـار رفتـه، لایه ون نیومان است که شامل چهار روزنه همسایه (N=4) و لایه مورکه شامل ۸ همسایگی N=8 است می باشد. یک لایه ممکن دیگر ام ون ان است که از ۱۲ سلول (N=12) تشکیل شده اسـت. همسایگی ها می توانند به منظور خالی کردن لایه (N=O) کاهش یابند یا به حدی که مـدل نیـاز دارد افزایش یابند. علاوه بر لایه های توصیف شده در بالا، این پروژه استفاده از یک همسایگی بـسط داده شده که شامل ۲۴ سلول است را ممکن می سازد. همسایگی ون نیومان در این تحقیق بـه جـز در جاهایی که مشخص شده است مورد استفاده قرار گرفته است.

برای تعریف قانون ارزیابی برای یک سلول قرار گرفته بـر روی مـرز دامنـه طراحـی، دامنـه طراحـی می تواند به روش های مختلفی گسترش یابد. شـکل ۳-۶ انـواع مختلفـی از شـرایط مرزهـایی کـه توسط بسط دامنه طراحی بدست آمده است را نمایش می دهد. یک مرز ثابت تعریـف مـی شـود تـا همسایگی با سلول های دارای وضعیت ثابت از پیش تعیین شده را تکمیل کند. یـک وضـعیت مـرز آدیاباتیک با مضاعف کردن مقدار روزنه در یک همسایگی واقعی اضافی بدسـت آورده مـی شـود. در یک مرز انعکاسی وضعیت همسایگی مخالف توسط سلول واقعی تکرار می شود. وضـعیت هـای مـرز دوره ای در زمانیکه به نظر می آید دامنه طراحی باید در یک شکل سـتون مانند پیچیده شـود مـورد استفاده قرار می گیرد. این کار استفاده از شرایط مرزی ثابت را در جایی که روزنه هـای اضـافی بـه عنوان فضاهای خالی بدون امکانات مکـانیکی یـا فیزیکـی مـورد بررسـی قـرار مـی گیرنـد، ممکـن می سازد.



(a) (b) (c) (d)

شکل ۳-۶- مرزهای CA (a) متناوب، (b) ثابت، (c)آدیاباتیک، و (d) انعکاسی

۳-۳-۴-روش CA

همانطور که در بخش های قبلی اشاره شد در روش CA همسایگی های یک سلول به منظور تغییر متغیر های طراحی یک سلول با یکدیگر همکاری می کنند. بنا بر این در گام اول همسایگی ها باید انتخاب گردند که در بالا به آنها اشاره شد.

همسایگی ها می توانند توسط شعاعی از یک دایره از مرکز سلول پیدا شوند که به ما اجازه می دهد تا تعداد همسایگی ها را بمنظور کنترل اندازه اعضای سازه ای بهینه شده کنترل کنیم و همچنین یک توپولوژی واحد برای یک پارچه سازی المانهای مش های متفاوت یک مسئله داشته باشیم.

همانطور که اشاره شد در روش CA تنها سلولهای مرزی می توانند معرفی شوند. المانهای مرزی ازدامنه طراحی آن المانهایی که رابطه زیر را ارضا نمایند می توانند بعنوان مرزها محسوب گردند.

$$x_i^{\min} \langle \frac{1}{N}\sum_{j=1}^{N} x_i \langle 1.0 \qquad (۳-۶۵)$$

که N تعداد همسایگی ها و x_j متغیر های طراحی می باشند.

در این قسمت بهینه سازی شکل و توپولوژی یک صفحه سازه ای با بکار گیری روش تنش یکنواخت شده [1] و اعمال CA توسط تووار مورد بررسی قرار می گیرد.

با توجه به قوانین روش تنش یکنواخت شده قواعد محلی می تواند بصورت زیر نوشته شود:

$$\begin{aligned} &\min \ x_i \\ &\overline{U}_i - U_i^* = 0 \\ &0 \le x_i^{\min} \le x_i \le 1.0. \end{aligned} \qquad (۳-۶۶)$$

[1] Fully stressed method

که در آن وزن سازه با مقایسه با یک انرژی کرنشی ثابت مینیمم می شود. U_i^* یک چگالی انرژی کرنشی هدف از پیش تعیین شده و $\overline{U}_i$ میانگین SED در همسایگی CA می باشد. که در آن:

$$\overline{U}_i = \frac{U_i + \sum_{j=1}^{N} U_j}{N+1}, \qquad (۶۷-۳)$$

در این روش بهنگام سازی می تواند با بکارگیری عبارت ($\overline{U}_i^{(t)} - U_i^*$) به منظور مینیمم کردن اختلاف بین SED هدف و SED میانگین تشکیل شود. که در آن:

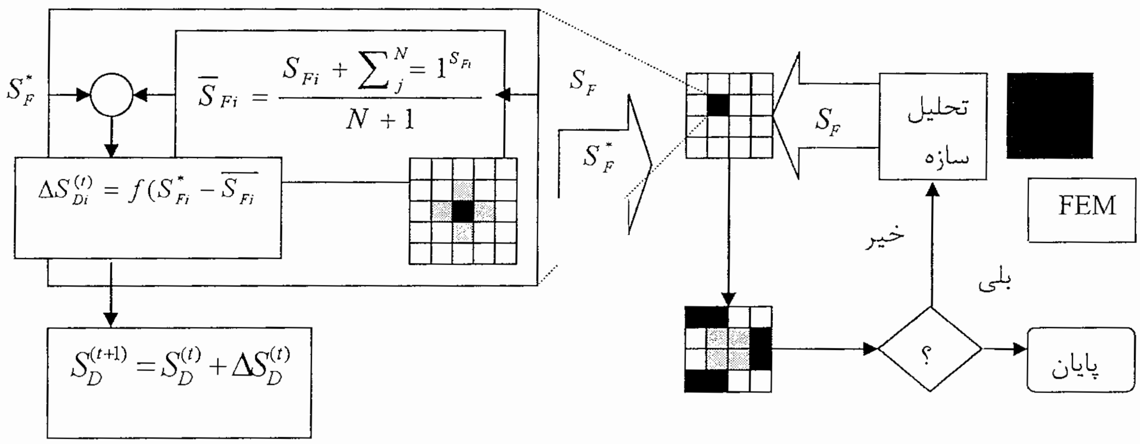
$$x_i^{(t+1)} = x_i^{(t)} + \Delta x_i^{(t)} \qquad (۶۸-۳)$$

$$\Delta x_i^{(t)} = k_f \operatorname{sgn}(\overline{U}_i^{(t)} - U_i^*), \qquad (۶۹-۳)$$

که

$$\operatorname{sgn}(\overline{U}_i^{(t)} - U_i^*) = \begin{cases} +1.0 & \text{اگر} \quad \overline{U}_i^{(t)} > U_i^* \\ -1.0 & \quad\quad \overline{U}_i^{(t)} < U_i^* \end{cases} \qquad (۷۰-۳)$$

که k_f محدوده حرکتی مثبت می باشد.



شکل ۳-۷- الگوریتم HCA با قانون طراحی محلی. روند تکرار شونده شامل تحلیل المان محدود ، کاربرد قانون طراحی محلی و یک آزمایش همگرایی می باشد. قانون المان محدود با استفاده از استراتژی کنترل ، معادله۳-۶۷ را اجرا می کند.

فصل چهارم: کاربرد بهینه سازی در تعیین شکل سدهای وزنی و محل گالری ها

۴-۱-مقدمه

در حل مسائل بهینه سازی، چگونگی انتخاب و تعریف متغیر های طراحی و تعداد آنها از مراحل بسیار مهم فرآیند بهینه سازی می باشد. اهمیت این انتخاب را می توان در این جمله خلاصه کرد که داشتن سرعت بالا در حل مسائل و امکان دستیابی به جواب بهینه، بدون انتخاب صحیح متغیر های طراحی امری دور از انتظار است. در این مرحله طراح بایستی تعیین کند که در چه نقاطی در سازه امکان ایجاد تغییرات و تعریف متغیر طراحی وجود دارد و همچنین با توجه به تعریف محل و جهت حرکت متغیر های طراحی، تغییرات ایجاد شده چگونه خواهد بود.

در مورد بهینه سازی توپولوژیک و شکل سازه ها در فصل قبل به تفصیل مطالبی گفته شد. اکنون به مرحله ای رسیده ایم که می توانیم مسائلی را در زمینه بهینه سازی توپولوژی و شکل حل کنیم. در این فصل مثال های متنوعی حل شده اند که نتایج قابل تأملی را در بر داشته اند.

در ابتدای فرآیند بهینه سازی بایستی هندسه اول سازه مورد نظر را مشخص و تعریف کنیم. این کار ممکن است با روشهای مختلفی صورت پذیرد. مثلا توسط یک برنامه کامپیوتری و یا توسط خروجی یک برنامه پردازشگر تصویر و یا روش دستی. ما در اینجا مشخصات هندسی سازه را به صورت دستی و در غالب یک فایل متنی ورودی تهیه می کنیم. علاوه بر مشخصات هندسی به کار رفته، متغیر های طراحی نیز بخشی از تعریف مدل اولیه سازه می باشند. نهایتا بایستی کلیه اطلاعات لازم برای حل مساله بهینه سازی را به همراه مدل هندسی اولیه سازه تعریف کنیم.

با استفاده از اطلاعات موجود بایستی بتوان از یک مدل هندسی سازه، یک مدل محاسباتی اجزای محدود تولید کرد. بنابراین از یک تولیدکننده فضای طراحی برای گسسته سازی دامنه یا همان فضای طراحی شکل سازه استفاده می کنیم. این فضای طراحی می تواند به هر شکلی باشد که ما برای حل مسائل از فضای طراحی مستطیل و ذوزنقه استفاده کرده ایم.

نتایج توپولوژی و شکل بعضی از مسائل در حالت دو بعدی دارای عضوهای نامطلوب و قسمت های اضافی می باشد که باید این اعضا را در روند بهینه سازی با روش های خاص خود حذف نمود، چون با حذف آنها در مرحله ساخت نمیتوان گفت که سازه ساخته شده بهینه است.

علاوه بر همه این موارد باید شرایط بارگذاری(نیروهای وارد بر سازه) و شرایط تکیه گاهی سازه را مشخص نمودکه در این رساله در تمام مثال های حل شده یکسان می باشد.

تکیه گاه ها همه از نوع ساده می باشند. نیروهای وارد بر سد در فصل دوم به تفصیل شرح داده شد. به دلیل تعدد نیروهای وارده، از نیروی غالب فشار هیدرواستاتیکی ناشی از آب پشت سد و نیروی زلزله استفاده شده است. از دیگر نیروها مانند نیروی رسوب پشت سد، نیروی فشار هیدرواستاتیکی آب در پایین دست سدو... در مقابل نیروی فشار هیدرو استاتیکی آب پشت سد صرفنظر شده است.

۴-۲-بهینه سازی توپولوژیک

در این بخش مثال های متنوعی را با استفاده از فضای طراحی مستطیلی و ذوزنقه ای از روش معیار بهینگی حل کرده ایم. شرایط تکیه کاهی و نیروهای وارد همانند آنچه در قسمت قبل ذکر شد می باشد و در همه مسائل مشخصات مواد با مدول الاستیسیته $E = 2.4e5 \, {Kg}/{cm^2}$ و ضریب پوآسون $\nu = 0.3$ در نظر گرفته شده است.

- پارامترهای موثر در روند بهینه سازی به قرار زیر می باشند:

zeta(move limit) = مقدار جزئی می باشد که باعث می شود حل به سمت نقطه بهینه نزدیک گردد. به بخش ۳-۲-۶-۲- روش بهبود تدریجی مراجعه شود.

delta(δ) = تلورانس قابل قبول برای قید حجم می باشد. به بخش ۳-۲-۶-۲- روش بهبود تدریجی مراجعه شود.

rmu(μ) = عامل جریمه و بزرگ تر از یک می باشد. به بخش۳-۲-۳-مدلهای مواد (مواد مصنوعی) مراجعه شود.

Volume Fraction = میزان درصد مصالح مورد استفاده در فرآیند بهینه سازی را تعیین می نماید.

Filter Window(r_{min}) = با استفاده از این پارامتر می توان حداقل ضخامت اعضای به دست آمده را محدود نمود.

تعریف پارامترهای مورد استفاده در مثال ها در پیوست پایان نامه آورده شده است. نتیجه نهایی بهینه سازی توپولوژیک دوبعدی درتصاویر وارد شده در هر قسمت آمده است.

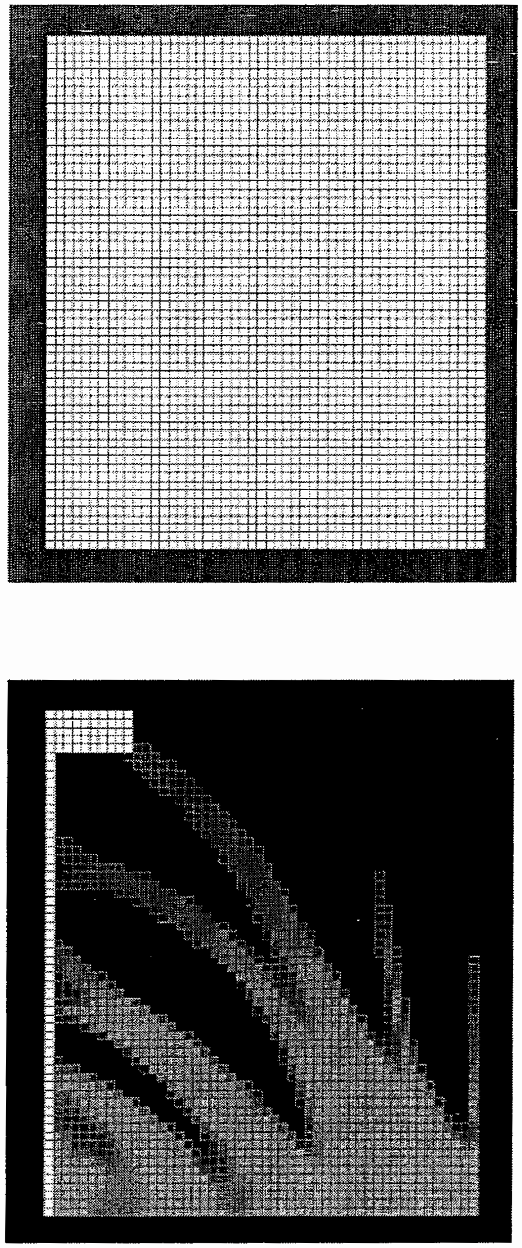
در روند حل شدن هر مسئله، انرژی کرنشی طی چندین مرحله به حداقل می رسد که در این مثال ها طی ۲۰۰ مرحله مینیمم می شود و بهینه سازی انجام می شود که تغییرات انرژی های کرنشی را ضمن مراحل بهینه سازی به صورت نمودارهایی در هر قسمت رسم شده است.

۴-۲-۱-مثال حل شده ۱

در این مثال از فضای طراحی مستطیلی استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد. مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده در این مثال به صورت زیر می باشد:

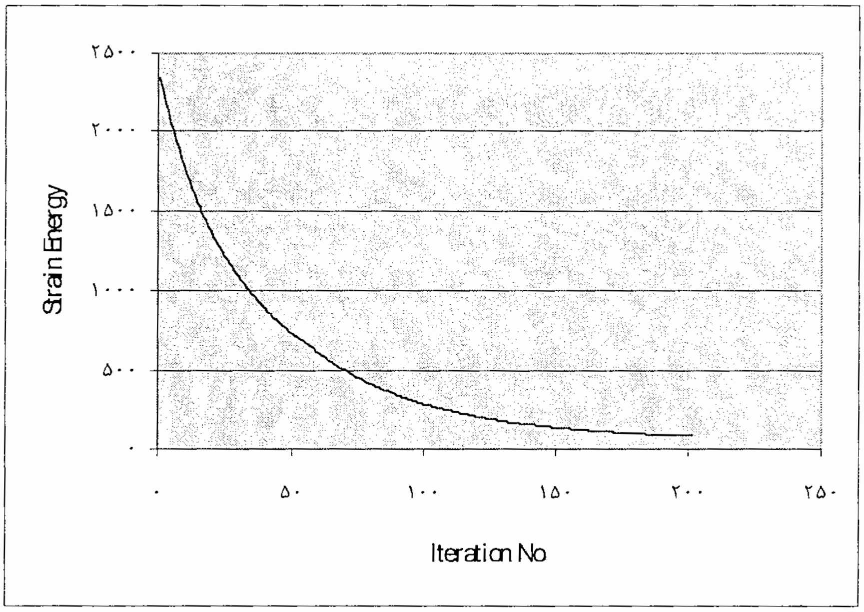
$zeta = 0.0015 \;, delta = 0.05 \;, rmu1 = 7 \;, drmu = -0.01 \;, rmu2 = 4 \;,$
$Volume\;\; Fraction = 50 \;, r_{\min} = 3$

تصویر نهایی در شکل ۴-۱ و نمودار انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله در نمودار۴-۲ آمده است.



شکل ۴-۱- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی توپولوژی

از روش معیار بهینگی با استفاده از فضای طراحی مستطیلی



شکل ۴-۲-نمودار تغییرات انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله

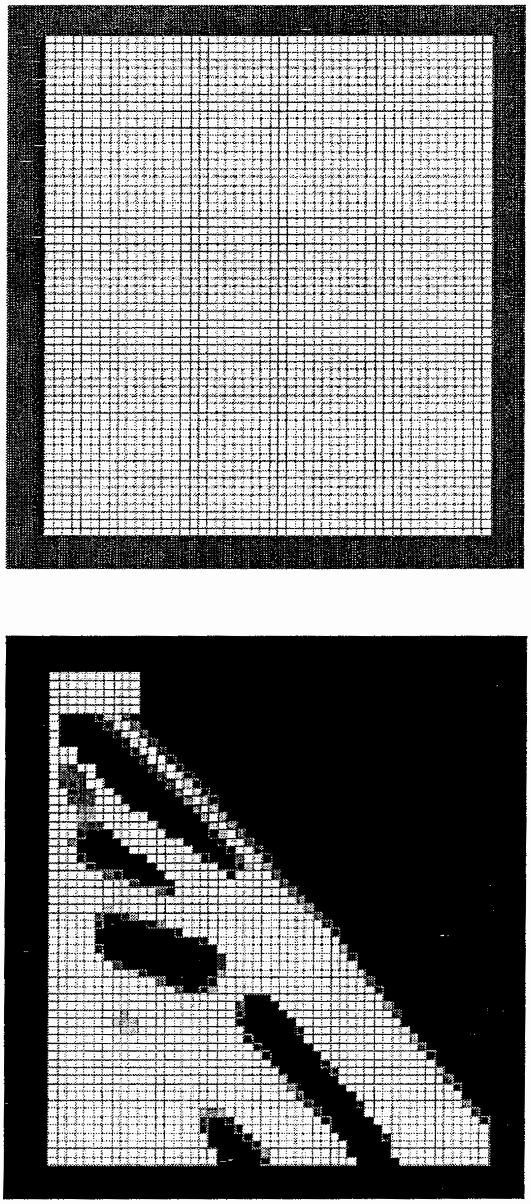
همانطور که در شکل ۴-۱ داریم با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت که گالری های دریچه و بازدید و دسترسی با توجه به ابعاد و محل دقیق گالری ها می تواند در سد تعبیه شود ولی گالری های فونداسیون و زهکشی با توجه به توپولوژی به دست آمده قابل تعبیه نمی باشند. لازم به ذکر می باشد که دو انحراف شکلی به وجود آمده در مصالح که در شکل ۴-۱ مشاهده می شود به علت نیروهای جسمی می باشد که در بارگذاری وارد بر سد لحاظ شده است.

۴-۲-۲-مثال حل شده ۲

در این مثال نیز از فضای طراحی مستطیلی استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد. از نیروهای حجمی صرفنظر شده است. مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده در این مثال به صورت زیر می باشد:

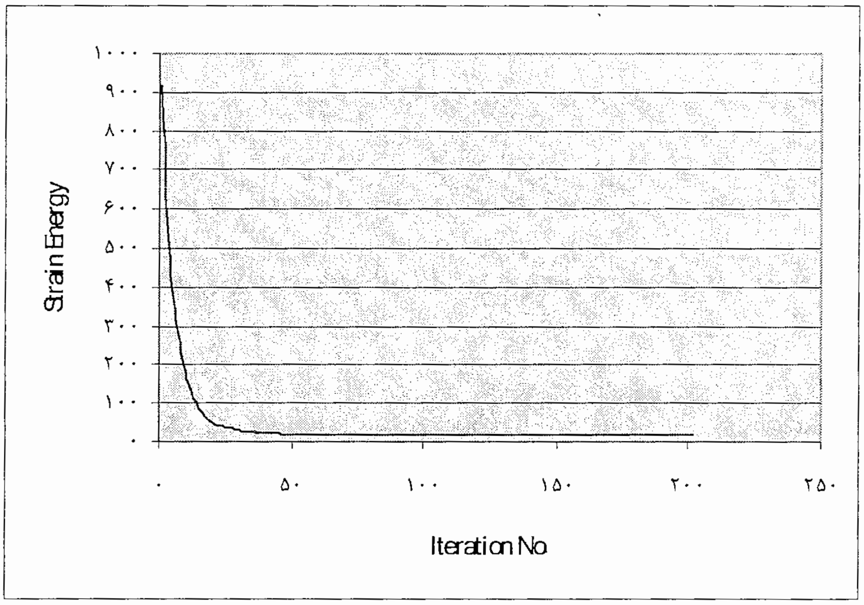
$$zeta = 0.015 \ , delta = 0.08 \ , rmu1 = 7 \ , drmu = -0.01 \ , rmu2 = 4 \ ,$$
$$Volume \ \ Fraction = 50 \ , r_{\min} = 3$$

تصویر نهایی در شکل ۴-۳ و نمودار انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار۴-۴ آمده است.



شکل ۴-۳- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی توپولوژی

از روش معیار بهینگی با استفاده از فضای طراحی مستطیلی



شکل ۴-۴-نمودار تغییرات انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله

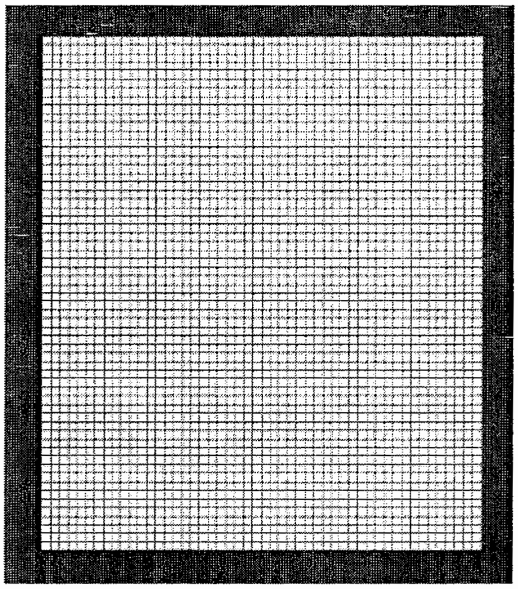
همانطور که در شکل ۴-۳ داریم با توجه به نتایج به دست آمده مـی تـوان گفـت کـه گـالری هـای دریچه، بازدید و دسترسی با توجه به ابعاد و محـل دقیـق گـالری هـا امکـان تعبیـه آنهـا در محـل دقیقشان نمی باشد ولی با جابجایی و تغییر ابعاد آنها می تـوان آنهـا را تعبیـه نمـود. امکـان تعبیـه گالری فونداسیون با توجه به توپولوژی به دست آمده وجود ندارد ولی گالری زهکشی را می توان بـا کمی تغییر ابعاد و مکان در سد تعبیه نمود.

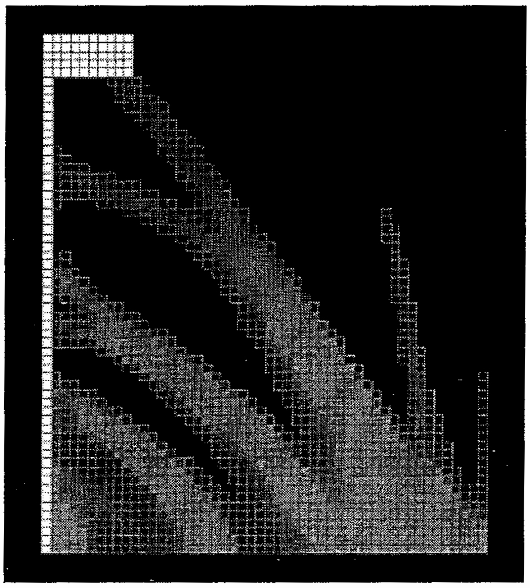
۴-۲-۳-مثال حل شده ۳

در این مثال نیز از فضای طراحی مستطیلی استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد. مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده در این مثال به صورت زیر می باشد:

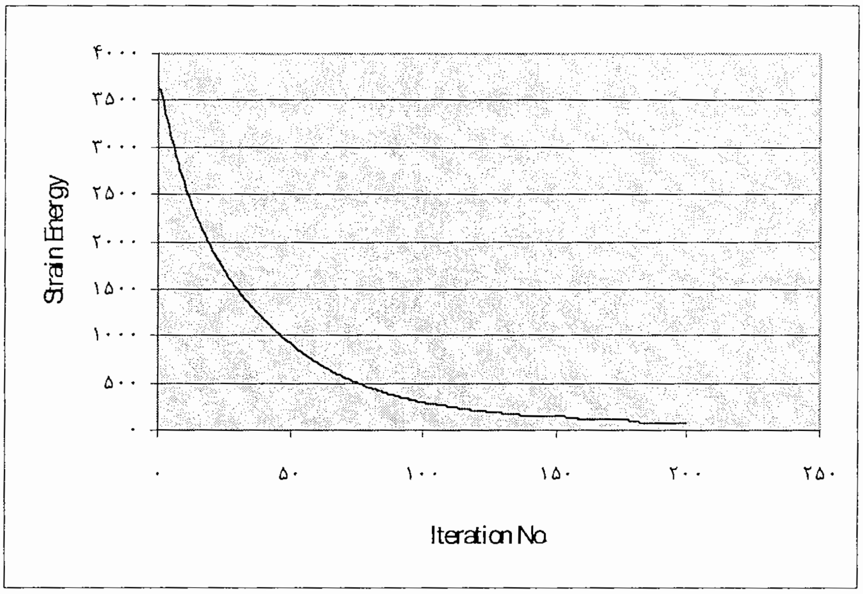
$$zeta = 0.0015 \ , delta = 0.05 \ , rmu1 = 6 \ , drmu = -0.01 \ , rmu2 = 4 \ ,$$
$$Volume \ \ Fraction = 40 \ , r_{\min} = 2.5$$

تصویر نهایی در شکل ۴-۵ و نمودار انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار۴-۶ آمده است.





شکل ۴-۵- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی توپولوژی
از روش معیار بهینگی با استفاده از فضای طراحی مستطیلی



شکل ۴-۶-نمودار تغییرات انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله

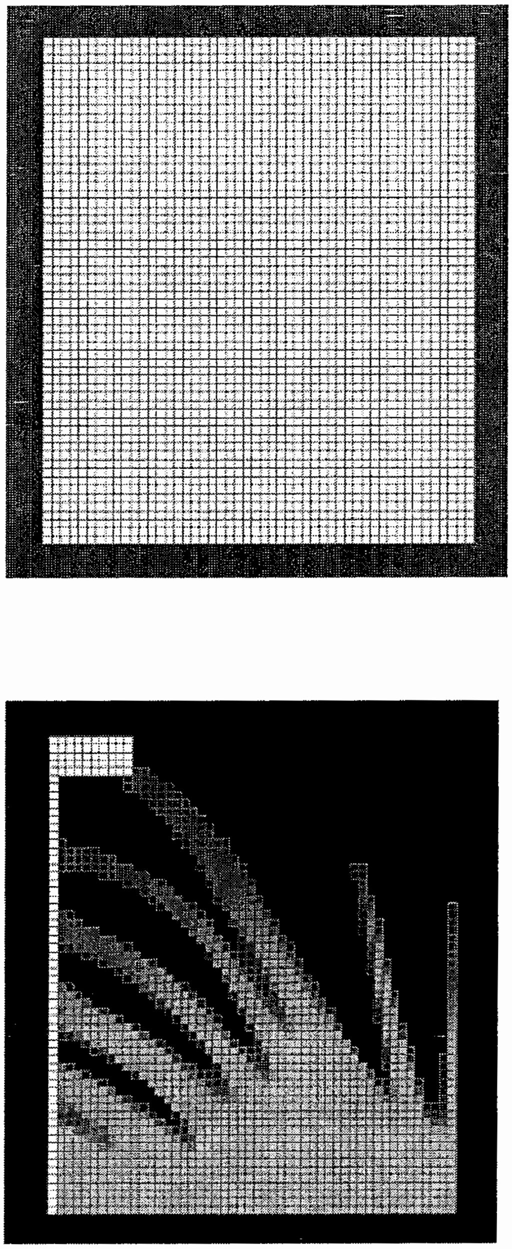
همانطور که در شکل ۴-۵ داریم با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت که گالری های دریچه و دسترسی را با توجه به ابعاد و محل دقیق گالری ها می توان در سد تعبیه نمود. گالری های بازدید، فونداسیون و زهکشی با توجه به توپولوژی به دست آمده امکان تعبیه شدن ندارند.

۴-۲-۴-مثال حل شده ۴

در این مثال نیز از فضای طراحی مستطیلی استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد. مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده در این مثال به صورت زیر می باشد:

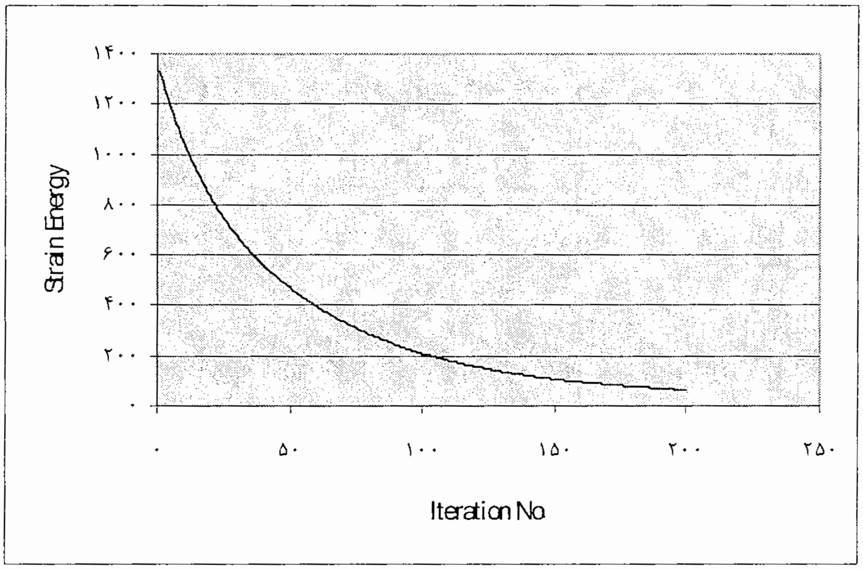
$$zeta = 0.0015 \;\; , delta = 0.05 \;\; , rmu1 = 7 \;\; , drmu = -0.01 \;\; , rmu2 = 4 \;\; ,$$
$$Volume\;\; Fraction = 55 \;\; , r_{min} = 2.5$$

تصویر نهایی در شکل ۴-۷ و نمودار انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار۴-۸ آمده است.



شکل ۴-۷- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی توپولوژی

از روش معیار بهینگی با استفاده از فضای طراحی مستطیلی



شکل ۴-۸-نمودار تغییرات انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله

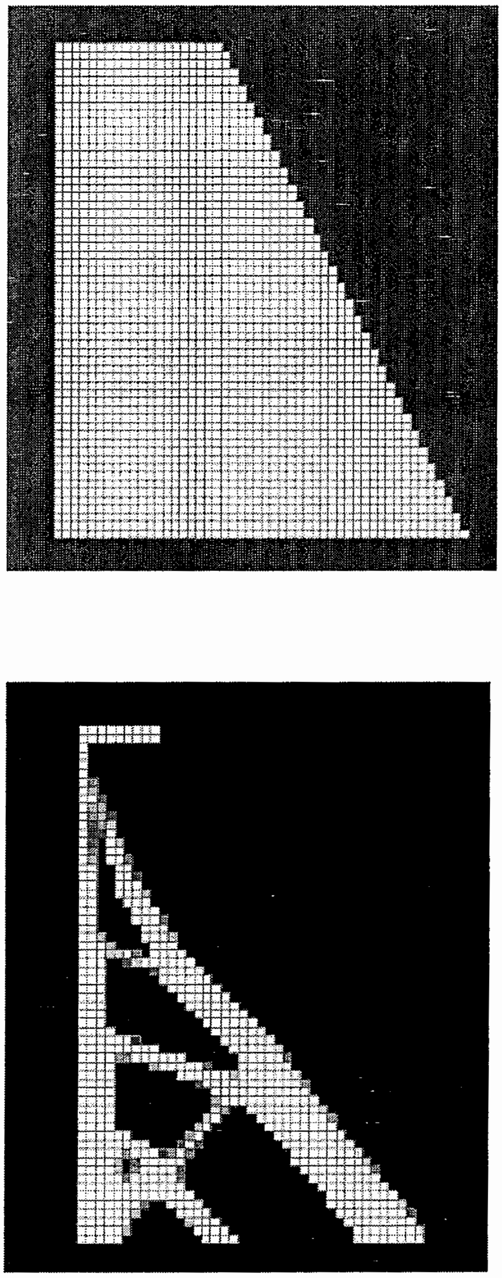
همانطور که در شکل ۴-۷ داریم با توجه به نتایج به دست آمده می توان گفت که گالری دریچـه را بدون تغییر ابعاد و محل آن می توان تعبیه نمود. همچنین امکان تعبیه گـالری دسترسـی بـا تغییـر ابعاد و محل آن وجود دارد ولی تعبیه گالری های بازدید، فونداسیون و زهکشی با توجه به توپولوژی به دست آمده امکان پذیر نمی باشد.

۴-۲-۵-مثال حل شده ۵

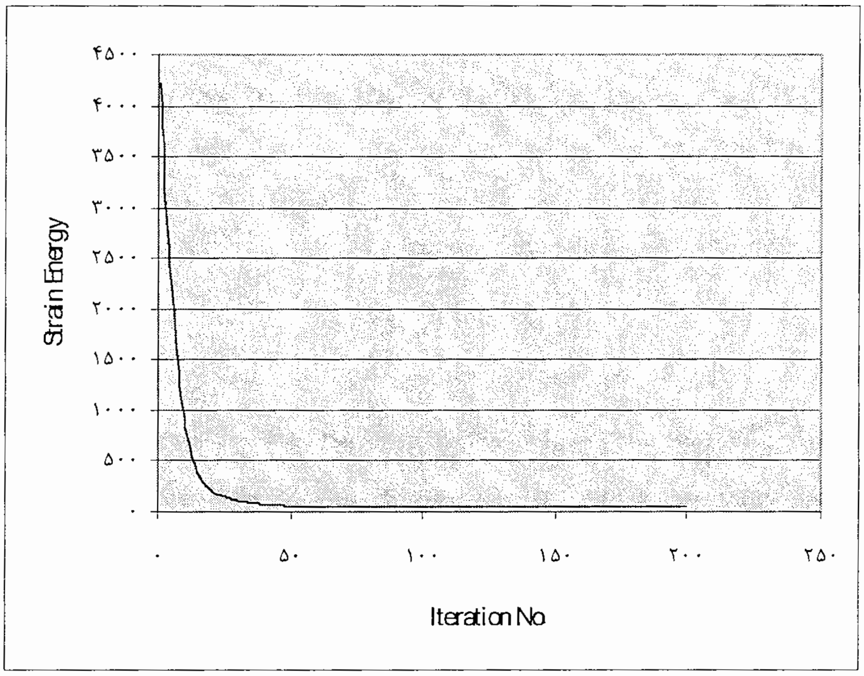
در این مثال از فضای طراحی ذوزنقه ای استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیـه گـاهی ماننـد آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد. از نیروهای حجمی صرفنظر شده است. مقـادیر عـددی پارامترهای مورد استفاده در این مثال به صورت زیر می باشد:

$zeta = 0.015$, $delta = 0.08$, $rmu1 = 7$, $drmu = -0.01$, $rmu2 = 4$,
$Volume\ \ Fraction = 40$, $r_{\min} = 2.5$

تصویر نهایی در شکل ۴-۹ و نمودار انرژی کرنشی بر حسب شـماره مرحلـه در شـکل نمـودار۴-۱۰ آمده است.



شکل ۴-۹- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی توپولوژی
از روش معیار بهینگی با استفاده از فضای طراحی ذوزنقه ای



شکل ۴-۱۰-نمودار تغییرات انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله

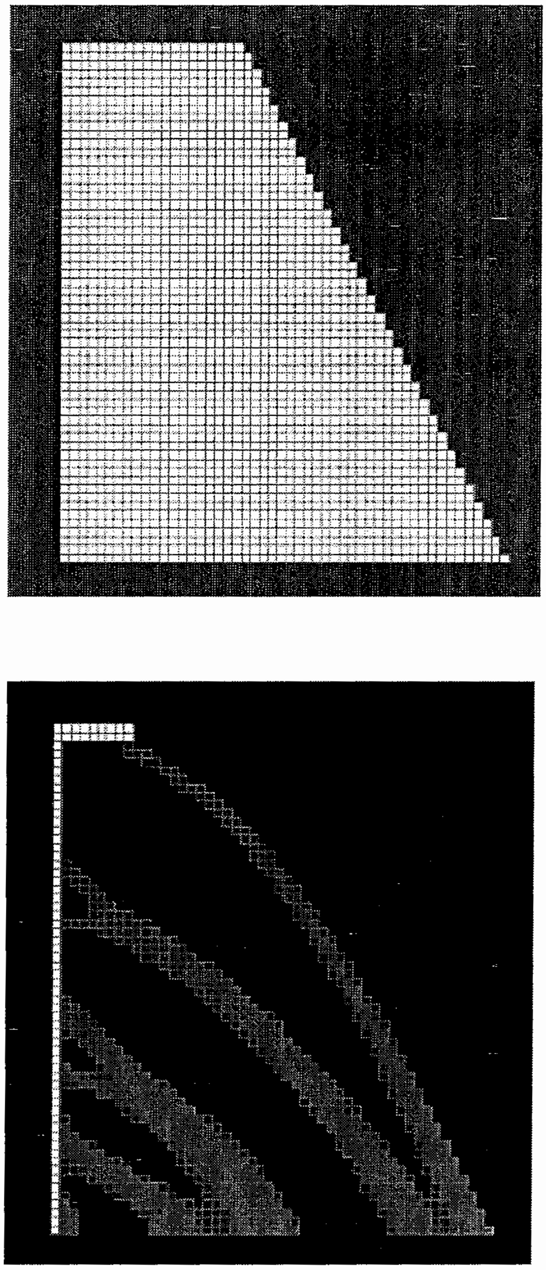
با توجه به شکل ۴-۹ امکان تعبیه گالری دریچه بدون تغییر در ابعاد و محل آن وجود دارد. ولی گالری دسترسی، فونداسیون و زهکشی را می توان بدون تغییر در ابعاد و با جابجایی محل آنها تعبیه نمود. گالری بازدید وجود ندارد.

۴-۲-۶-مثال حل شده ۶

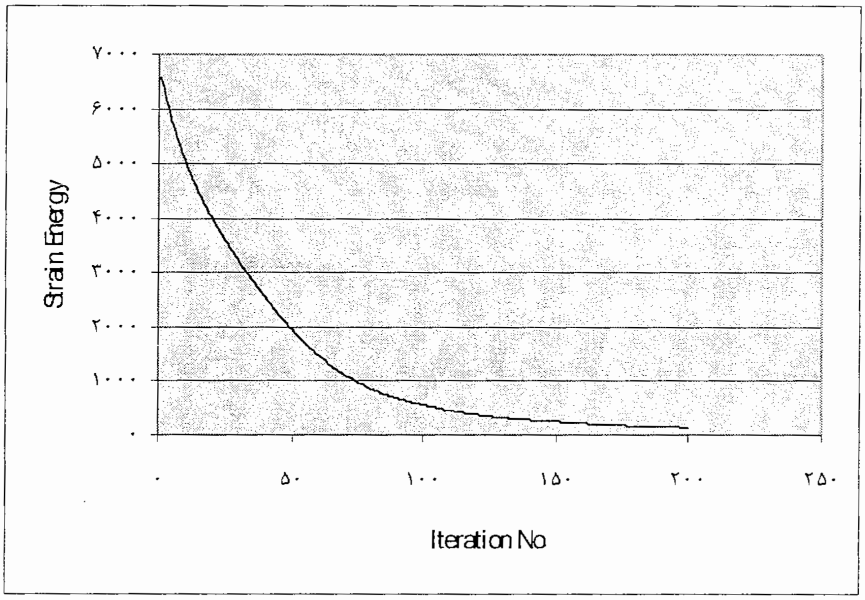
در این مثال از فضای طراحی ذوزنقه ای استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد. مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده در این مثال به صورت زیر می باشد:

$$zeta = 0.0015 \;, delta = 0.05 \;, rmu1 = 7 \;, drmu = -0.01 \;, rmu2 = 4 \;,$$
$$Volume\ \ Fraction = 40 \;, r_{\min} = 2.5$$

تصویر نهایی در شکل ۴-۱۱ و نمودار انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار۴-۱۲ آمده است.



شکل ۴-۱۱- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی توپولوژی
از روش معیار بهینگی با استفاده از فضای طراحی ذوزنقه ای



شکل ۴-۱۲-نمودار تغییرات انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله

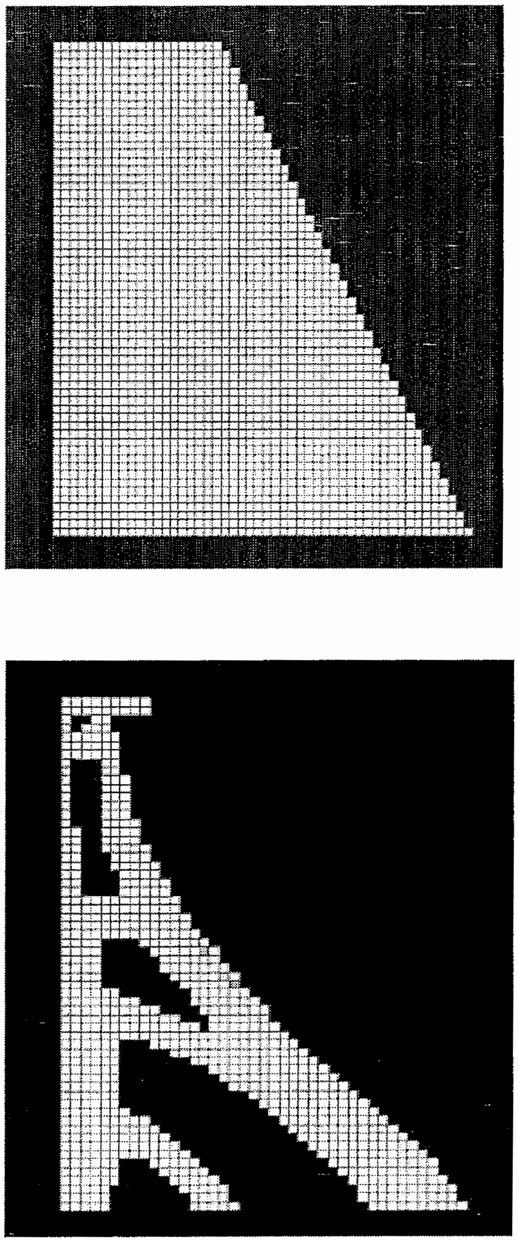
با توجه به شکل ۴-۱۱ امکان تعبیه دقیق گالری های دریچه، بازدید و دسترسی وجود دارد. ولی گالری های فونداسیون و زهکشی باید تغییر ابعاد و محل در آنها لحاظ شود تا امکان تعبیه آنها وجود داشته باشد.

۴-۲-۷-مثال حل شده ۷

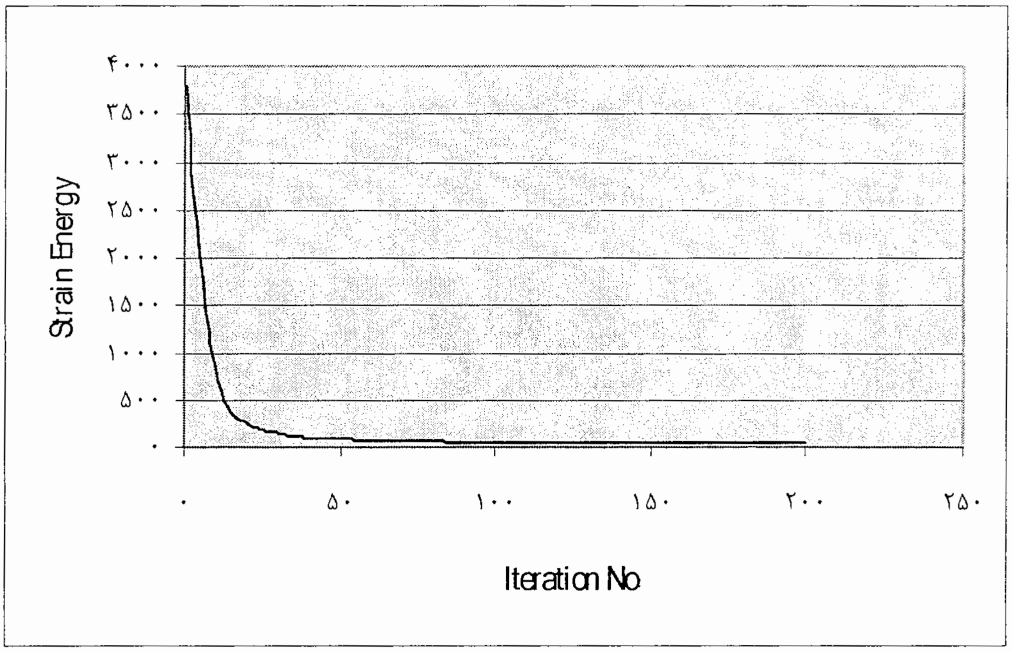
در این مثال از فضای طراحی ذوزنقه ای استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد. از نیروهای حجمی صرفنظر شده است. مقادیر عددی پارامترهای مورد استفاده در این مثال به صورت زیر می باشد:

$$zeta = 0.015 \ , delta = 0.08 \ , rmu1 = 6 \ , drmu = -0.01 \ , rmu2 = 4 \ ,$$
$$Volume \ \ Fraction = 35 \ , r_{\min} = 3$$

تصویر نهایی در شکل ۴-۱۳ و نمودار انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار۴-۱۴ آمده است.



شکل ۴-۱۳- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی توپولوژی
از روش معیار بهینگی با استفاده از فضای طراحی ذوزنقه ای



شکل ۴-۱۴-نمودار تغییرات انرژی کرنشی بر حسب شماره مرحله

با توجه به شکل ۴-۱۳ گالری های دریچه، دسترسی، فونداسیون و زهکشی با کمی تغییر در ابعاد و محل آنها، می توانند تعبیه شوند. ولی امکان تعبیه گالری بازدید وجود ندارد.

۴-۳-بهینه سازی شکل

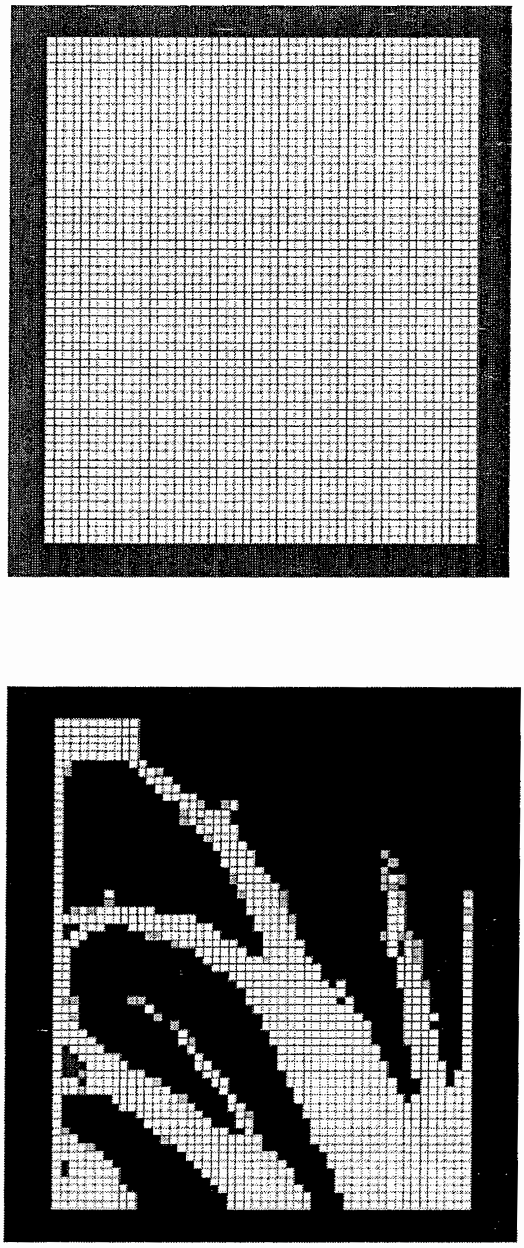
در این بخش مثال های متنوعی را با استفاده از فضای طراحی مستطیلی و ذوزنقـه ای از روش CA حل کرده ایم. شرایط تکیه کاهی و نیروهای وارد همانند آنچه در قسمت قبل ذکر شد مـی باشـد و در همه مسائل مدول الاستیسیته $E = 2.4e5 \, {}^{Kg}\!/_{cm}{}^{2}$ و ضریب پوآسـون $\nu = 0.3$ در نظـر گرفتـه شده است. کلیه پارامترهای موثر همانند مسایل نظیر در قسمت قبل (توپولوژی) مـی باشـد بـا ایـن تفاوت که در همه مثال ها نسبت حجـم مـواد بـه حجـم فـضای طراحـی (Volume Fraction) ۹۹ درصد می باشد. (بـه روش CA مراجعـه شـود). نتیجـه نهـایی بهینـه سـازی شـکل دوبعـدی، درتصاویر وارد شده در هر قسمت آمده است.

در روند بهینه سازی هر مسئله، چگالی مصالح طی چندین مرحله به حداقل میرسد کـه تعـداد ایـن مراحل متفاوت می باشد که در این جا طی ۲۰۰ مرحله مینیمم میشود. (با توجـه بـه حجـم بـالای اعداد چگالی ها در هر پنج مرحله میانگین گیری شده است). تغیرات چگالی در حـین انجـام بهینـه سازی را نیز بر حسب شماره مرحله به صورت نمودارهایی در هر قسمت آورده ایم.

۴-۳-۱-مثال حل شده ۱

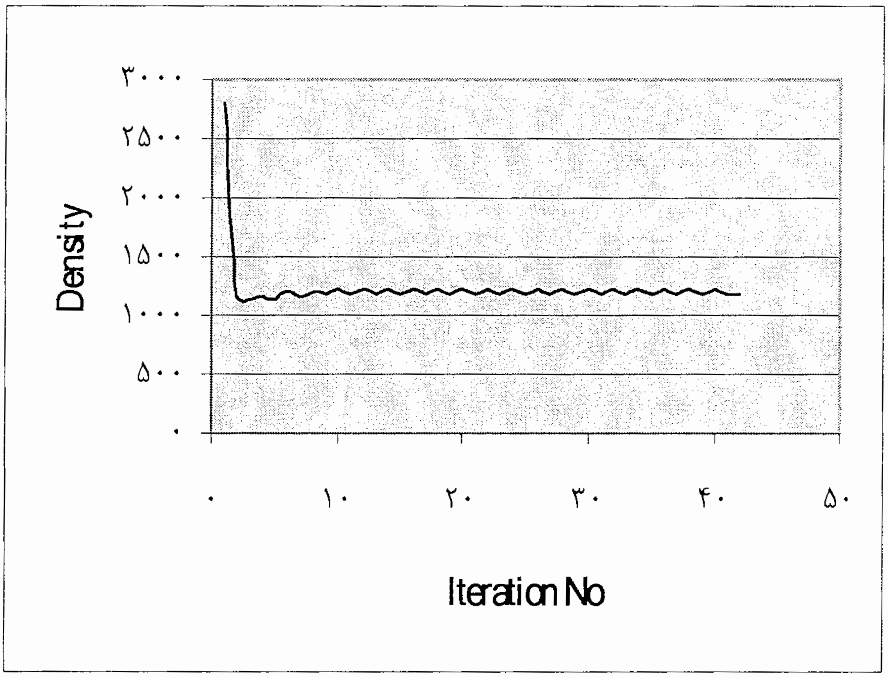
در این مثال از فضای طراحی مستطیلی استفاده شده است. شرایط بارگـذاری و تکیـه گـاهیماننـد آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد.

تصویر نهایی در شکل ۴-۱۵ و نمودار چگالی بر حسب شماره مرحلـه در شـکل نمـودار۴-۱۶ آمـده است.



شکل ۴-۱۵- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی شکل

از روش CAبا استفاده از فضای طراحی مستطیلی

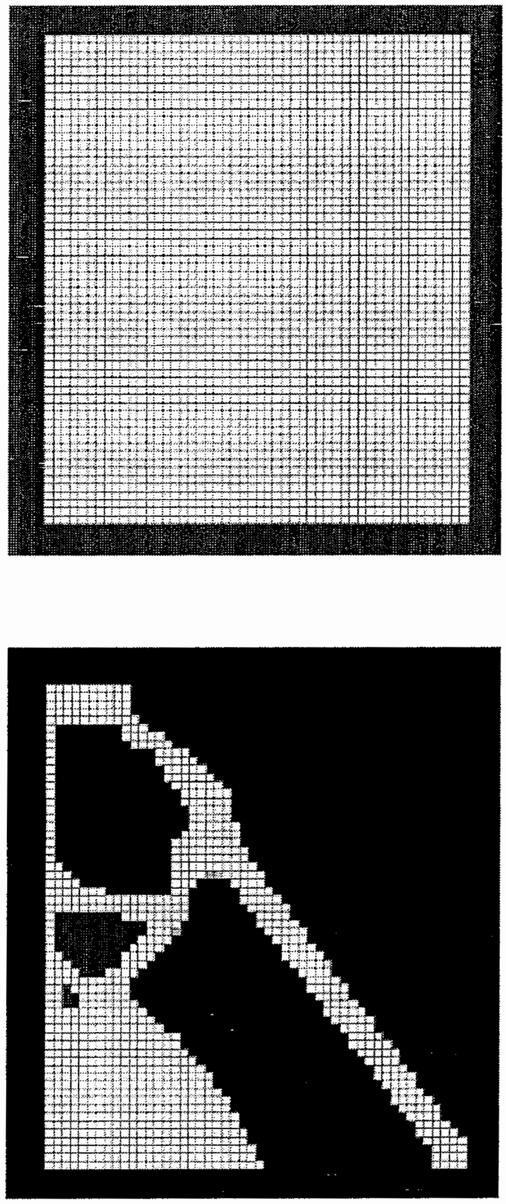


شکل ۴-۱۶-نمودار تغییرات چگالی بر حسب شماره مرحله

۴-۳-۲-مثال حل شده ۲

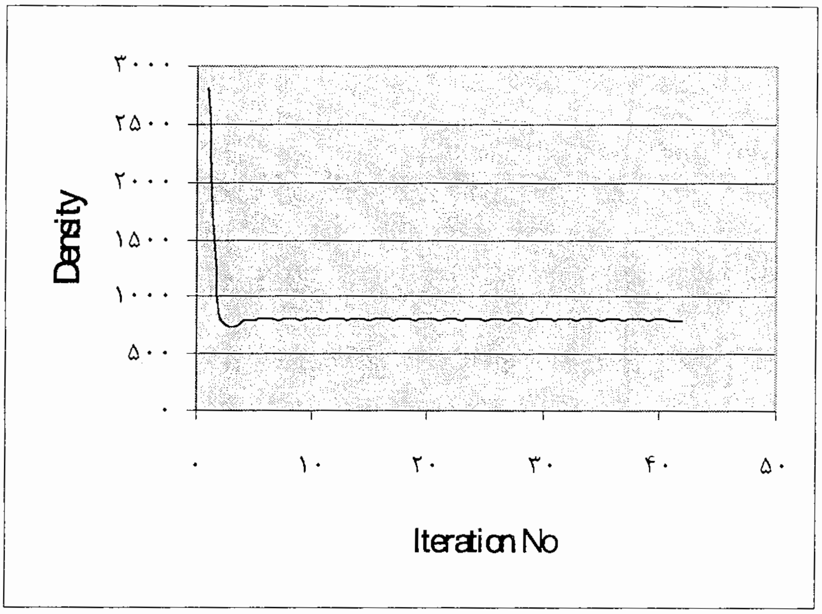
در این مثال از فضای طراحی مستطیلی استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد.

تصویر نهایی در شکل ۴-۱۷ و نمودار چگالی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار۴-۱۸ آمده است.



شکل ۴-۱۷- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی شکل

از روش CAبا استفاده از فضای طراحی مستطیلی

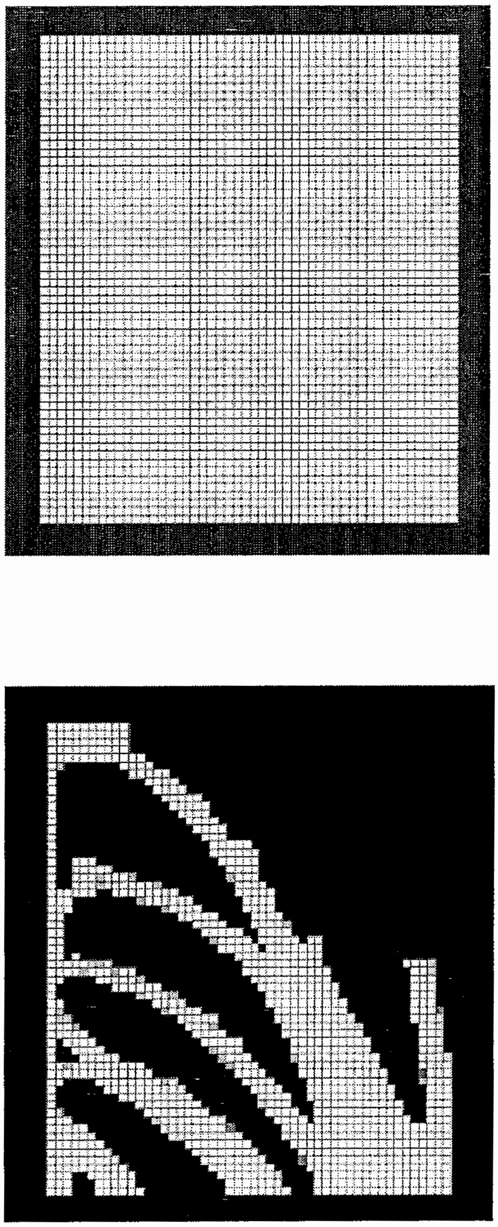


شکل ۴-۱۸-نمودار تغییرات چگالی بر حسب شماره مرحله

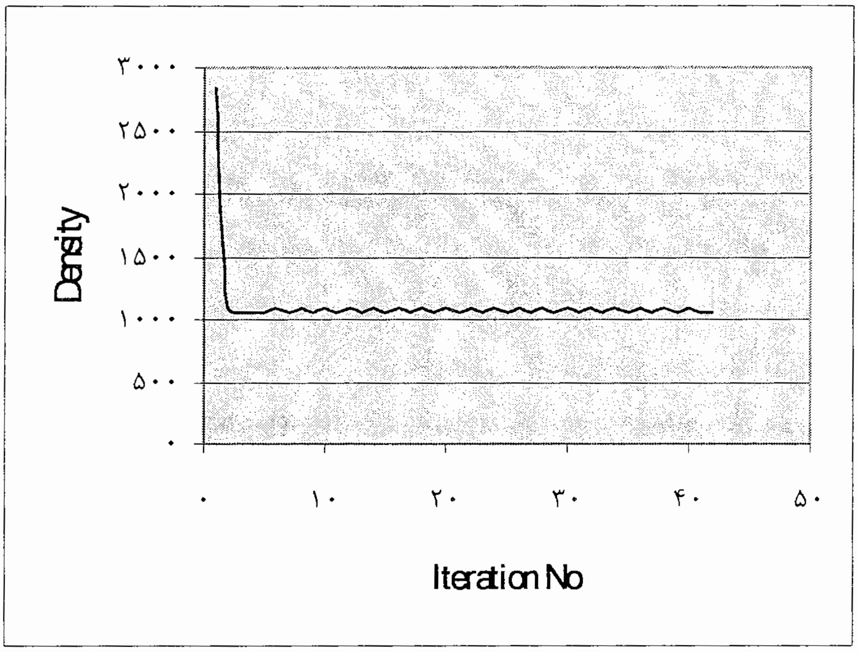
۴-۳-۳-مثال حل شده ۳

در این مثال از فضای طراحی مستطیلی استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد.

تصویر نهایی در شکل ۴-۱۹ و نمودار چگالی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار ۴-۲۰ آمده است.



شکل ۴-۱۹- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی شکل از روش CAبا استفاده از فضای طراحی مستطیلی

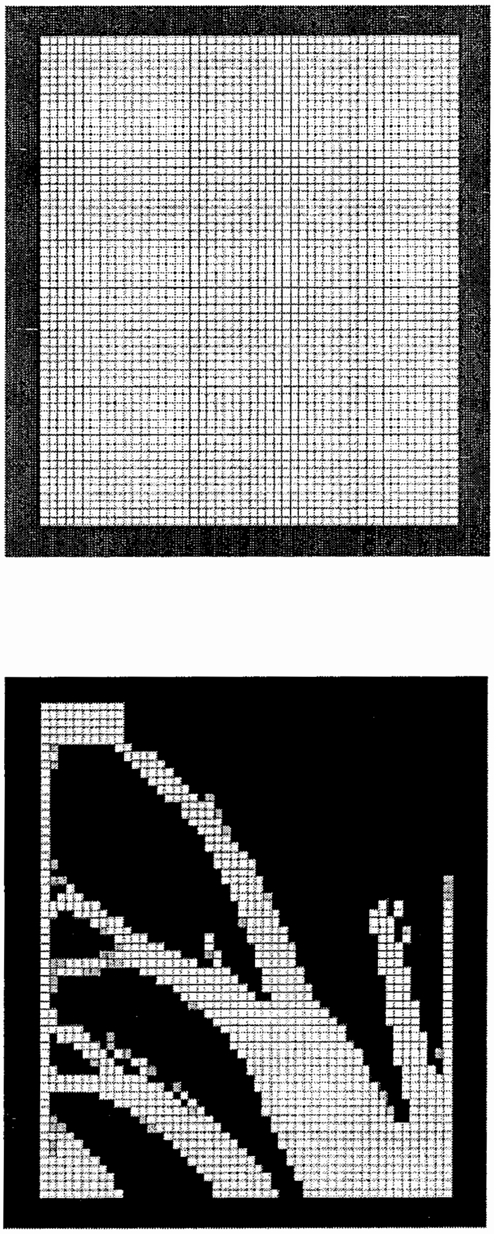


شکل ۴-۲۰-نمودار تغییرات چگالی بر حسب شماره مرحله

۴-۳-۴-مثال حل شده ۴

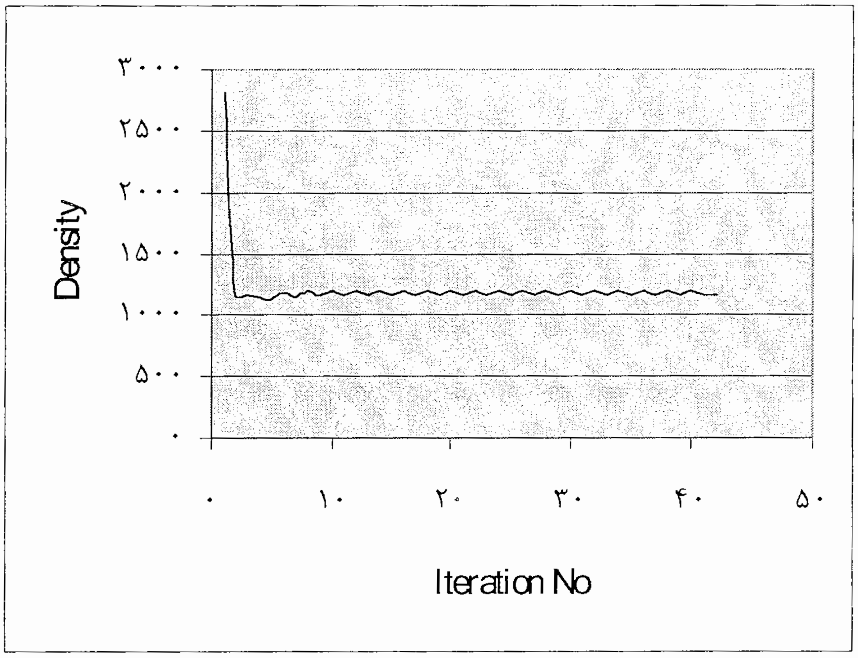
در این مثال از فضای طراحی مستطیلی استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد.

تصویر نهایی در شکل ۴-۲۱ و نمودار چگالی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار ۴-۲۲ آمده است.



شکل ۴-۲۱- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی شکل

از روش CAبا استفاده از فضای طراحی مستطیلی

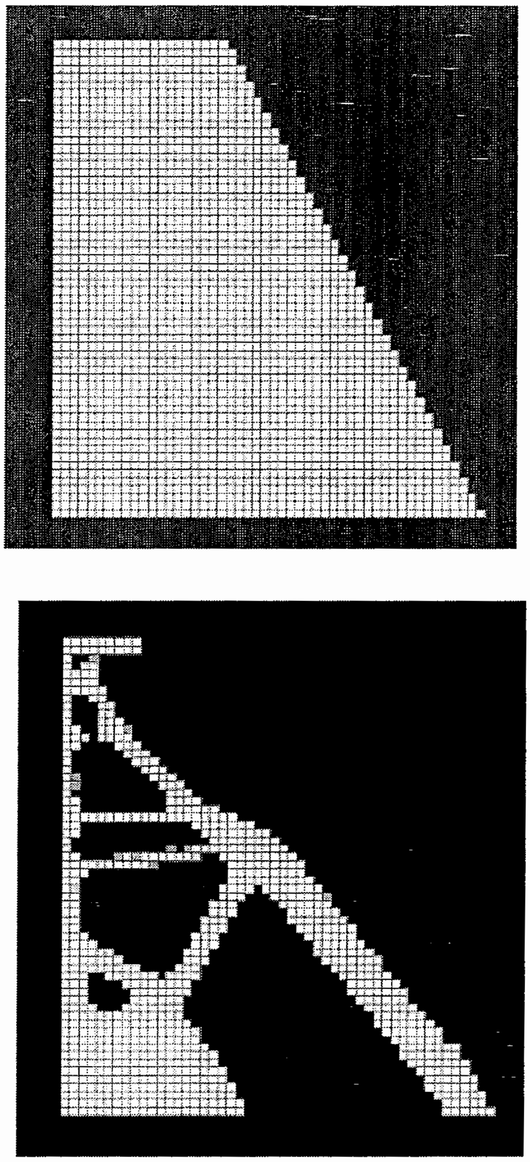


شکل ۴-۲۲-نمودار تغییرات چگالی بر حسب شماره مرحله

۴-۳-۵-مثال حل شده ۵

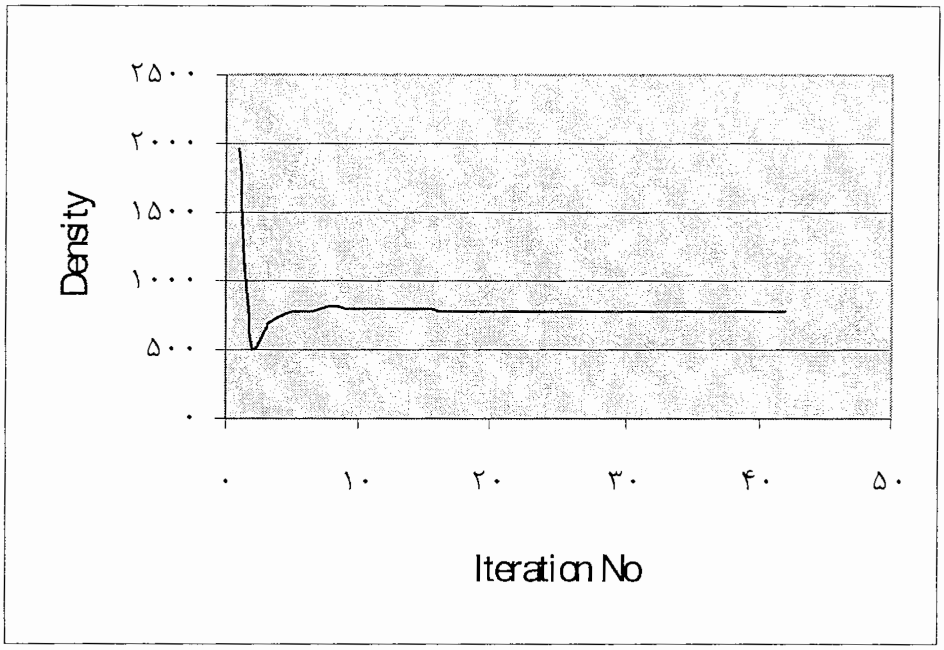
در این مثال از فضای طراحی ذوزنقه ای استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد.

تصویر نهایی در شکل ۴-۲۳ و نمودار چگالی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار۴-۲۴ آمده است.



شکل ۴-۲۳- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی شکل

از روش CAبا استفاده از فضای طراحی ذوزنقه ای

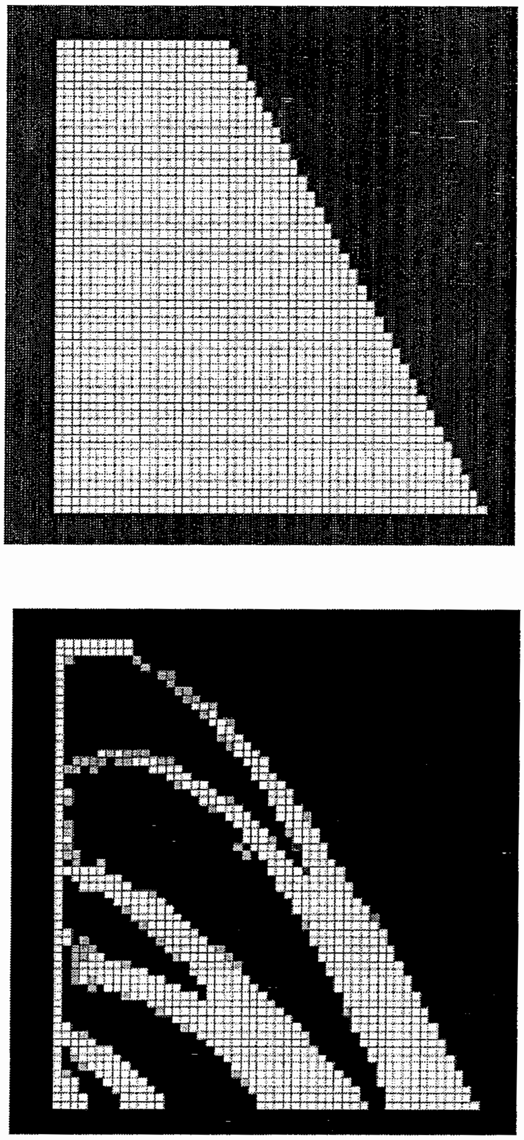


شکل ۴-۲۴-نمودار تغییرات چگالی بر حسب شماره مرحله

۴-۳-۶-مثال حل شده ۶

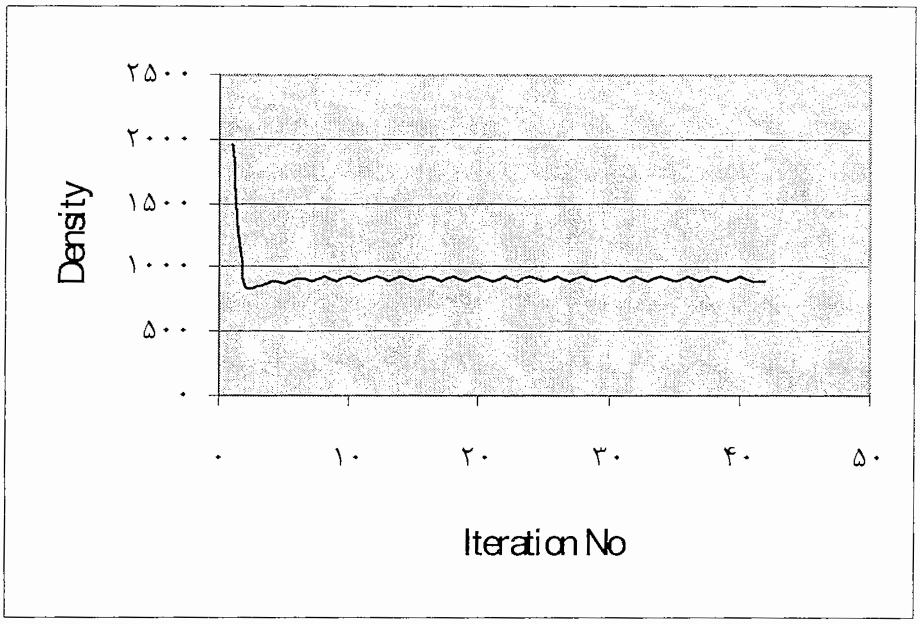
در این مثال از فضای طراحی ذوزنقه ای استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد.

تصویر نهایی در شکل ۴-۲۵ و نمودار چگالی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار۴-۲۶ آمده است.



شکل ۴-۲۵- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی شکل

از روش CAبا استفاده از فضای طراحی ذوزنقه ای

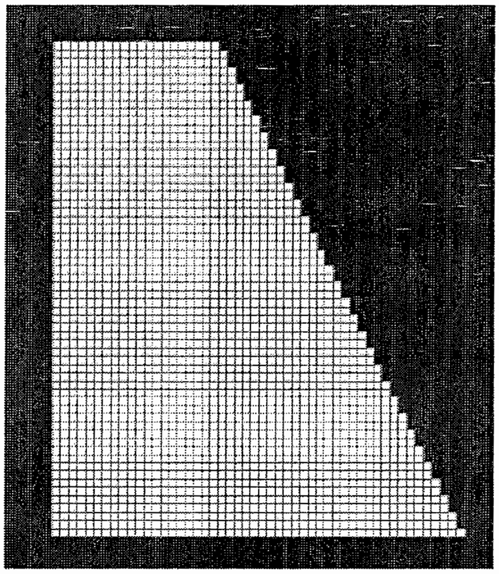


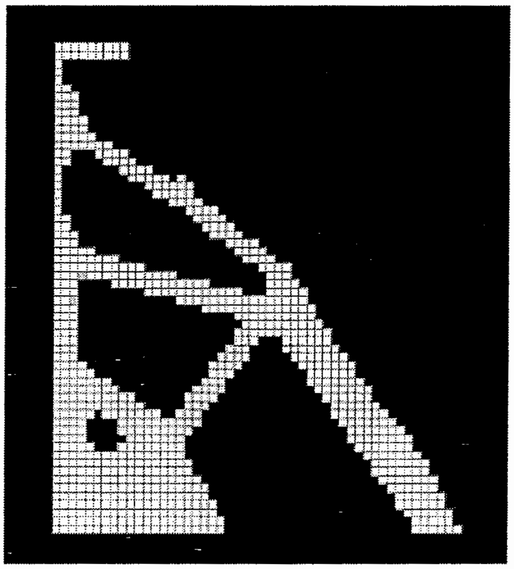
شکل ۴-۲۶-نمودار تغییرات چگالی بر حسب شماره مرحله

۴-۳-۷-مثال حل شده ۷

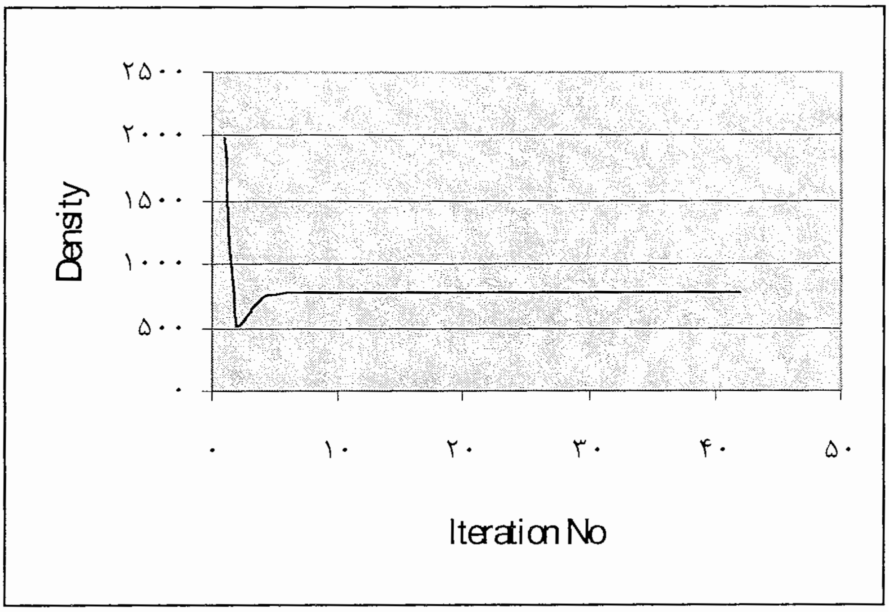
در این مثال از فضای طراحی ذوزنقه ای استفاده شده است. شرایط بارگذاری و تکیه گاهی مانند آنچه در قسمت های قبل ذکر شد می باشد.

تصویر نهایی در شکل ۴-۲۷ و نمودار چگالی بر حسب شماره مرحله در شکل نمودار۴-۲۸ آمده است.





شکل ۴-۲۷- تصویر دوبعدی نهایی بهینه سازی شکل از روش CAبا استفاده از فضای طراحی ذوزنقه ای

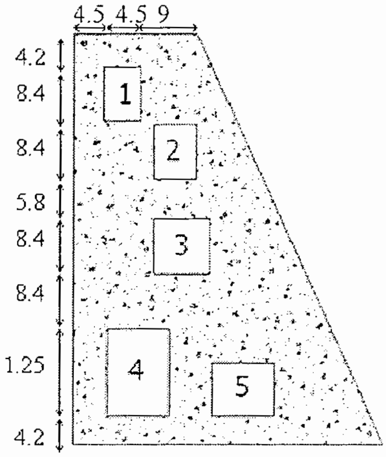


شکل ۴-۲۸-نمودار تغییرات چگالی بر حسب شماره مرحله

همانطوریکه در مثالهای بالا مشاهده کردید، توپولوژی ها و شکل های متفـاوتی بدسـت آمـد.وجـود ترکیبات بارگذاری متفاوت و حالات مختلف فاکتور های موجود، باعث به وجود آمدن توپولوژی های مختلف می باشد.

در شکل ۴-۲۹یک نمونه سد وزنی با محل دقیق قرارگیری گالری ها در مقطع آمده است. که این گالری ها به قرار زیرند [۲] :

- گالری دریچه (۱)
- گالری بازدید(۲)
- گالری دسترسی (۳)
- گالری فونداسیون (۴)
- گالری زهکشی (۵)



شکل ۴-۲۹-نمونه ای از سد وزنی و محل دقیق گالری ها

فصل پنجم:

نتیجه گیری

و

پیشنهادات

۵-۱-معرفی:

یکی از عوامل مهمی که بشدت باعث افزوده شدن زمان محاسبات و دشواری حل مسائل بهینه سازی می شود، تعداد متغیرهای طراحی می باشد. بدین ترتیب اگر بتوانیم تعداد متغیرهای طراحی را کاهش دهیم، با سرعت و احتمال بیشتری به سمت جواب بهینه همگرا خواهیم شد.
در این تحقیق به بهینه سازی توپولوژیک سازه ها پرداخته شده است که هدف اصلی از بهینه سازی توپولوژیک، تعیین محل گالری های سد می باشد که این کار با استفاده از روش معیار بهینگی با استفاده از شرایط کان_تاکر و به کار گیری مدل مواد مصنوعی انجام شده است. در ادامه بهینه سازی شکل با بکار گیری از روش CA صورت گرفته شده است که نتایج آن در بخش بعدی آورده شده است.

۵-۲-نتیجه گیری:

۱- با بررسی مثال های حل شده در این تحقیق و تطبیق تصاویر دو بعدی آن ها با شکل۴-۲۹ مشاهده گردید که مثال هایی که در آنها از فضای طراحی مستطیلی استفاده گردیده شده است، در ۹۲٪ آنها گالری بازدید و دریچه در ۷۵٪ آنها گالری دسترسی موجود میباشد ولی امکان تعبیه گالری های زهکشی و فونداسیون وجود ندارد، اما با بررسی مثال هایی که در آنها از فضای طراحی ذوزنقه ای استفاده شد مشاهده گردید که در ۴۰٪ آنها گالری بازدید، ۶۰٪ آنها گالری دریچه، ۷۵٪ آن ها گالری زهکشی، در ۴۰٪ آن ها گالری دسترسی و در ۳۷٪ آن ها گالری فونداسیون موجود می باشد و با توجه به اینکه فضای طراحی ذوزنقه ای به شکل واقعی سدهای وزنی نزدیکتر می باشد لذا همانطور که انتظار داشتیم جوابهای بهتری نسبت به فضای طراحی مستطیلی حاصل گردیده است.
۲- با توجه به در نظر گرفتن نیروی وزن سازه مشاهده گردید که اگر نیروی وزن سازه در نظر گرفته شود مشاهده میشود که در ۹۲٪ آنها گالری بازدید و دریچه، ۲۵٪ آن ها گالری زهکشی، در ۶۵٪ آن ها گالری دسترسی و در ۲۰٪ آن ها گالری فونداسیون موجود می باشد ولی اگر این نیرو در نظر گرفته نشود مشاهده میشود که در ۵۳٪ آنها گالری بازدید، ۶۶٪ آن ها گالری زهکشی، در ۶۶٪ آن ها گالری دسترسی و در ۲۷٪ آن ها گالری فونداسیون موجود می باشد که در حالت واقعی باید وزن سازه در نظر گرفته شود.
۳- با استفاده از روش CA که در این تحقیق بمنظور بهینه سازی شکل سدهای وزنی استفاده گردید، برای بکار گیری شکلهای بهینه در این نوع سدها، اشکال بدست آمده در محدوده مورد بررسی این تحقیق توصیه می گردد.

۵-۳-پیشنهادات:

۱- توصیه می گردد روش معیار بهینگی که در این تحقیق بر روی سد های وزنی به منظور بهینه سازی گالری ها استفاده گردید، بر روی دیگر پارامترهای موثر در انواع دیگر سدها نیز استفاده گردد.

۲- در این تحقیق از فضاهای طراحی مستطیلی و ذوزنقه ای استفاده شده است. پیشنهاد می گردد که از فضاهای طراحی نزدیک تر(مثلا با استفاده از نرم افزار ANSYS) به شکل واقعی این نوع سدها استفاده گردد.

۳-در این تحقیق از روش CA به منظور بهینه سازی شکل سدهای وزنی استفاده شده است. پیشنهاد می گردد از روش های دیگر نیز استفاده شده و نتایج آن با روش CA مقایسه گردد.

مراجع و منابع

1.B.Hassani,E.Hinton."Homogenization and Structural Topology Optimization". Springer.1999

2.UNITED STATES DEPARTMENT OF THE INTERIOR , BUREAU OF RECLAMATION ., "Disign of Gravity Dams" ., Denver , Colorado , 1976.

3.Huiskes,R.,Weinans,H.,Grootenboer,J.,Dalstra,M., Fudala,M., and Sloof, T . J ., "Adaptive Bone Remodelig Theory Applied to Prosthetic-Design Analysis." J. Biomech. Vol. 20, 1987.pp.1135-1150

4.Inou, N., Uesugi, T., Iwasaki, A., and Ujihashi, S., "Self-Organization of Mechanical Structure by Cellular Automata," Fracture and Strength of Solids, Vol. 145, No. 9, 1998, pp. 1115-1120.

5.Allaire, G., Shape Optimization by the Homogenization Method, Vol. 146 of Applied mathematical sciences, Springer, 2002.

6.Burks, A. W., Essays on Cellular Automata, chap. Von Neumann's self-reprodusing automata, University of Illinois Press, 1970, pp. 3-64.

7.Bendsoe, M. P., "Optimal Shape Design as a Material Distribution Problem," Struct. Optim., Vol. 1. 1989, pp. 193-200.

8.Rozvany, G. I. N., "Aims, Scope, Methods, History and Unified Terminology of Computer-Aided Topology Optmization in Structural Mechanics," Structural and Multidisciplinary Optimization, Vol. 21, No 2, 2001, pp. 90-108.

9.Sigmund, O. and Peterson, J., "Numerical Instabilities in Topology Optimization: A Survey on Procedure Dealing with

Checkerboreds, Mesh-Dependensies and Local Minima," Struct. Optim., Vol. 16, 1998, pp. 68-75.

10.Venkayya, V. B., "Optimality Criteria: A Basis for Multidisciplinary Design Optimization," Comp. Mech., Vol. 5, 1989, pp. 1-21.

11.Tovar, A., Niebur, G. L., Sen, M., and Renaud, J. E., "Bone Structure Adaptation as A Cellular Automaton Optimization Prosess," 45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics & Materials Conference, Palm Springs, California, April 2004.

12.Kita, E. and Toyoda, T., "Structural Design Using Cellular Automata," Struct. Multidisc. Optim., Vol. 19, 2000, pp. 64-73.

13.Abdalla, M. M. and Gurdal, Z., "Structural Design Using Cellular Automata for Eigenvalue Problems." Struct. Multidisc. Optim., Vol. 26, No. 3, 2004, pp. 200-208.

14.Patnaik, S. N. and Hopkins, D. A. "Optimality of A Fully Stress Design," Comput. Methods Appl. Mech. Engrg., Vol. 165, 1998, pp. 215-221.

15.Hart, R. T., "Bon Modeling and Remodeling: Theories and Computation," Bon Mechanics Handbook, Edited by S. C. Cowin, CRC Press, 2001.

۱۶. سیمافر شجاع الدین ، " محاسبه و اصول سد سازی " ، دانشگاه تبریز ، چاپ سوم ، زمستان ۱۳۷۹

۱۷. توکلی سید مهدی ، " تحلیل و بهینه سازی توپولوژیک دو بعدی و سه بعدی سازه ها در محیط های پیوسته با بکارگیری المان های محدود با دقت بالا و تکنیک های حذف نویز" ، پایان نامه کارشناسی ارشد ، دانشگاه صنعتی شاهرود ، آذر ۱۳۸۱ .

۱۸. ابریشمی جلیل ، وهاب رجایی ناصر ، " سدهای بتنی طرح و اجرا " ، انتشارات آستان قدس رضوی ، چاپ دوم ، ۱۳۸۴ ، صفحه ۹۳ تا ۱۵۵ .

۱۹. فهیمی فر احمد ، سروش حامد ، "اصول طراحی پی در سد سازی " ، انتشارات دانشگاه صنعتی امیر کبیر(پلی تکنیک تهران) ، چاپ اول ، ۱۳۸۴ ، صفحه ۵۲ تا ۶۲ .

۲۰. ارزیده فرشید ، " سد سازی یا مهار آبهای سطحی " انتشارات دهخدا ، چاپ اول ، ۱۳۶۲ ، صفحه ۱۸۰ تا ۱۹۴ .

پیوست

راهنمای TOPS(CA)

۱-مقدمه

برنامه TOPS(CA) یک برنامه کامپیوتری آکادمیک برای انجام بهینه سازی توپولوژیک و شکل سازه ها در محیط های پیوسته می باشد. این برنامه کاملا مستقل و وابسته به هیچ نرم افزار دیگری نیست و تمامی مراحل بهینه سازی از جمله تحلیل سازه های دو بعدی و سه بعدی را با دقت بسیار بالا در خود گنجانده است. با توجه به وجود امکانات متعدد در این برنامه کاربر از آزادی عمل زیادی برخوردار است تا اینکه بتواند توپولوژی و شکل بهینه و اجرایی مورد دلخواه خود را بیابد. در این برنامه سعی شده است فرمت فایل ورودی تا حد امکان شبیه نرم افزارهای معروف اجزا محدود باشد. در طی برنامه کامپیوتری TOPS(CA) سعی شده تا حتی الامکان از پیچیدگی برنامه با توجه به حجم نسبتا زیاد آن جلوگیری شود. در بخش های بعدی به ساختار، مشخصات و نحوه استفاده از این برنامه کامپیوتری پرداخته می شود.

۲-ساختار برنامه TOPS(CA)

همانگونه که میدانیم ایجاد یک ساختار مناسب برای پیاده سازی یک برنامه کامپیوتری بسیار حایز اهمیت است. در این باره تکنیک های پیشرفته ای در سال های اخیر معرفی شده اند که البته در اینجا مجال بررسی آنها نمی باشد. در طراحی ساختار TOPS(CA) سعی شده است با بکارگیری یکسری تکنیک های ساده و سلیقه ای به اهداف بزرگی همچون ارتقادهی آسان، مرور و خطا گیری راحت و جلوگیری از پیچیده شدن برنامه با زیاد شدن حجم آن دست یافت.

برنامه TOPS(CA) از پنج قسمت اصلی زیر تشکیل شده است:

Input-۱ Analysis-۲ Optimization-۳ Check Data-۴ Output-۵

که هر کدام از قسمت های فوق شامل بخشها و زیر بخش های دیگری می باشد.

- Input : در این قسمت کلیه اطلاعات مورد نیاز برنامه از یک فایل ورودی خوانده می شود و برای استفاده پردازش می گردد.
- Analysis : این قسمت وظیفه آنالیز مدل اجزا محدود را به عهده دارد. این قسمت شامل بخش های زیر می باشد:
  - Properties : در این بخش ماتریس الاستیسیته هر المان که در هر مرحله بهینه سازی متغیر است، محاسبه می شود.
  - Elements : در این بخش ماتریس سختی المان محاسبه می شود که شامل ۱۶ زیر بخش است. ۱۵ تا از این زیر بخش ها وظیفه محاسبه ماتریس سختی المان های مختلف را بر عهده دارند و زیر بخش شانزدهم مدیریت این بخش را برعهده دارد.
  - Loading : در این بخش محاسبات مربوط به بارگذاری که منجر به بدست آمدن ماتریس نیروها می شود، گنجانده شده است.
  - Stress : در این بخش تنش ها با توجه به نوع المان محاسبه می شوند. در این بخش همچنین تنش های اصلی و جهات آنها نیز محاسبه می شوند.
  - Solver : در این بخش معادله KU=F با استفاده از حل گرهای Frontal و یا Sky حل می شود.
  - Analysis Commander : این بخش اتاق فرمان قسمت Analysis می باشد و این قسمت را مدیریت می کند.

- Optimization : در این قسمت فرامین مربوط به بهینه سازی توپولوژیک و شکل سازه ها گنجانده شده است. این قسمت شامل بخش های زیر می باشد:
  - Main : این بخش بدنه اصلی الگوریتم بهینه سازی توپولوژیک و شکل را تشکیل می دهد.
  - Optimality Criteria : در این بخش روش های ارتقا دهی متغیر های طراحی و همچنین محاسبات مربوط به فرض اولیه این متغیر ها گنجانده شده است.
  - CA : در این بخش روش های ارتقا دهی متغیر های طراحی و همچنین محاسبات مربوط به فرض اولیه این متغیر ها گنجانده شده است.
  - Image Processing : این بخش به تکنیک های حذف نویز در دو حالت دو بعدی و سه بعدی اختصاص دارد.
- Check Data : در این بخش می توان داده های کاربر و همچنین اطلاعات مربوط به نتایج هر مرحله از بهینه سازی را کنترل نمود.
- Output : نتایج به دست آمده از برنامه TOPS(CA) از طریق این قسمت به فایل های خروجی منتقل می شود.

لازم به ذکر است که به عنوان مثال برای اضافه کردن یک المان جدید کرنش مسطح و تنها بخشی از قسمت Analysis بایستی مورد بررسی و تغییر قرار گیرد و نیاز نیست که حتی کد مربوط به قسمت های دیگر دیده شود. با ساختار فوق می توان به راحتی برنامه را مرور کرد و مشکلات آنرا به تدریج رفع کرد. عیب گیری از برنامه ای با ساختار فوق بسیار ساده است و می توان با توجه به نوع خطا به قسمت مربوطه رجوع کرده و آن را رفع نمود.

۳- مشخصات برنامه:

برنامه کامپیوتری TOPS به مدت هجده ماه توسط مهندس سید مهدی توکلی[۱۷] با راهنمایی استاد فرزانه دکتر بهروز حسنی تهیه شده که یک برنامه مستقل بهینه سازی توپولوژیک بود. در ادامه اضافه کردن زیر برنامه های لازم (به عنوان مثال Body Force و تغییر مساله از تنش مسطح به کرنش مسطح و . . .) و همچنین برنامه CA به صورت یک زیر برنامه برای برنامه TOPS با راهنمایی ایشان و استاد ارزشمند دکتر بهروز حسنی به منظور بهینه سازی شکل سازه ها بوجود آمد. همانطور که اشاره شد برنامه TOPS(CA) با زیر برنامه CA به منظور بهینه سازی توپولوژیک دو بعدی و سه بعدی سازه ها و بهینه سازی شکل سازه ها در محیط های پیوسته نوشته شده است. روش های به کار برده شده در این برنامه تماما در فصل سوم این پایان نامه به تفصیل بحث شده اند. این برنامه برای مهندسین ابزاری به شمار می رود تا توپولوژی و شکل بهینه و اجرایی سازه خود را بیابند. در ادامه برخی از مشخصات این برنامه ذکر می شود.

- در این برنامه برای تحلیل مدل اجزای محدود می توان از Frontal Solver و یا Sky Solver استفاده نمود.
- در این برنامه از روش معیار بهینگی برای بهینه سازی توپولوژیک سازه ها و روش CA برای بهینه سازی شکل سازه ها استفاده می شود.

راهنمای استفاده از برنامه TOPS(CA)

تنظیم فایل ورودی

بلوک اول: این بلوک شامل یک سطر است و برای نوشتن توضیحات درباره مساله به کار می رود.

بلوک دوم: سطر توضیحات.

بلوک سوم: این بلوک شامل یک سطر به صورت زیر می باشد:

zeta delta rmu1 drmu rmu2

که در این سطر:

zeta move limit (typically 0.01-0.1)

delta volume constraint tolerance (typically 0.01-0.1)

rmu1 initial exponenty/penalty of material (typically 2.0-5.0)

drum

rmu2

بلوک چهارم: سطر توضیحات

بلوک پنجم: شامل یک سطر با فرمت زیر می باشد:

upoin nelem nnode elenam ndime nvfix nmats nrsiz nsolv

که در این سطر:

npoin number of nodes in mesh

nelem number of elements in the mesh

nnode number of nodes per element

elenam name of finite element

ndime   dimension (2or3)

nvfix   number of fixed nodes

nmats   number of material sets

nrsiz   resizing scheme number (1or2)

nsolv   solver number (1or2)

بلوک ششم: سطر توضیحات.

بلوک هفتم: شامل nnods سطر می باشد. در این بلوک مختصات گره ها مشخص می شود.

node   number(n) X_n Y_n Z_n

بلوک هشتم: سطر توضیحات.

بلوک نهم: شامل nelem سطر می باشد. در این بلوک ماتریس همبندی (connectivity) مشخص می گردد.

شماره المان   گره ابتدا .. گره انتها

بلوک دهم: این بلوک شامل nvfix سطر می باشد. در هر سطر ابتدا شماره گره فیکس شده نوشته می شود و جلوی آن هر درجه آزادی که بسته شده با ۱ ودرجه آزادی آزاد با صفر مشخص می شود.

بلوک یازدهم: سطر توضیحات.

بلوک دوازدهم: شامل nmats سطر می باشد. در این بلوک مشخصات موارد به کار برده شده معرفی می شوند.

matn   E   ν   ρ

matn   material data set number

E   Young's Modulus

ν   Poisson's ratio

ρ   density

بلوک سیزدهم: سطر توضیحات.

بلوک چهاردهم: در این بلوک volume fraction معرفی می شود.

بلوک پانزدهم: سطر توضیحات.

بلوک شانزدهم: این بلوک شامل یک عدد $r_{\min}$ برای بکارگیری تکنیک های حذف نویز می باشد.

بلوک هفدهم: سطر توضیحات.

بلوک هجدهم: شامل یک عدد برای مشخص ساختن تعداد نیروهای گرهی می باشد.

بلوک نوزدهم: سطر توضیحات.

بلوک بیستم: در این بلوک نیروهای گرهی که تعداد آنها در قسمت قبل پرسیده شده، معرفی می شوند.

شماره گره F_x F_y F_z

نحوه اجرای برنامه

پس از تنظیم فایل ورودی برنامه را اجرا می کنیم. در ابتدا برنامه سوال می کند که آیا مایلید مقدار متغیر های طراحی اولیه در بهینه سازی با استفاده از پیش فرض قبلی باشد یا اینکه خود برنامه یک مقدار اولیه مناسب برای این متغیر ها بیابد. در صورتیکه پاسخ کاربر مثبت باشد کاربر بایستی اسم فایل ورودی را برای متغیر های طراحی اولیه معرفی کند و گرنه برنامه با توجه به یکسری محاسبات مقادیر

مناسبی برای متغیر های طراحی اولیه می یابد. در ادامه برنامه نام فایل ورودی را از کاربر درخواست می کند و سپس به ترتیب نام فایل های خروجی را سوال خواهد کرد.