طراحی بهینه دال‌های بتن مسلح یک طرفه

دکتر علیرضا حبیبی [۱]، محمد زاهدی [۲], مهدی ایزدپناه [۳]

۱- دانشیار دانشکده مهندسی دانشگاه کردستان alireza_habib@yahoo.com

۲-دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی عمران –سازه دانشگاه کردستان

۳- دانشگاه آزاد اسلامی, واحد کنگاور, دانشکده فنی مهندسی, گروه عمران, کنگاور, ایران

m.eazadpanah@yahoo.com

چکیده

در دنیای پر رقابت امروز دیگر کافی نیست سیستمی طراحی کنیم که عملکرد آن مطابق آنچه می‌خواستیم باشد، بلکه لازم است که آن سیستم بهترین باشد. بهترین یعنی سیستمی کارآمد، همه جانبه، منحصر به فرد و مقرون به صرفه. از آنجا که دال بتنی در انتقال بار در بام، کف‌های ساختمانی و پی‌ها به کار می‌رود، استفاده از روشی برای بهین کردن هزینه طراحی این نوع از عضوهای سازه‌ای، اهمیت پیدا می‌کند. هدف از این پژوهش، رسیدن به طرحی بهین با ارائه روشی جدید، سریع و کارآمد در طراحی دال بتنی یکطرفه است به طوری که کمترین هزینه را در مجموع هزینه‌های بتن ریزی و میلگردگذاری در برداشته باشد. در این راستا ابتدا به فرمول بندی مسئله طراحی پرداخته می‌شود. قیود طراحی شامل قید خمشی، قید برشی، قیود محدودیت کارایی و قید حداقل ارتفاع جهت کنترل تغییر شکل بوده که از آیین نامه بتن آمریکا ACI 318-05 استخراج می‌گردد. پس از به دست آوردن مدل بهینه سازی، از الگوریتم برنامه‌ریزی درجه دو متوالی (SQP) برای یافتن طرح بهین استفاده می‌گردد. سپس با ارائه یک مثال عددی، کارایی و تاثیر روش پیشنهادی در طراحی دال بتنی یکطرفه با شرایط تکیه‌گاهی متفاوت، نشان داده می‌شود.

واژه های کلیدی: طراحی دال بتنی یکطرفه، بهینه سازی، برنامه ریزی درجه دو، حداقل هزینه

۱ مقدمه

با پیشرفت روش‌های برنامه ریزی ریاضی و تکنولوژی رایانه، تلاش زیادی در زمینه طراحی بهینه سازه‌های مهندسی به وسیله روش‌های برنامه ریزی ریاضی انجام گرفته است. روش‌های طراحی معمول تنها نیازمندی‌های فنی طرح را برآورده می‌کند، لیکن در این روش طراحی، تنها قابل قبول بودن یک طرح مد نظر است. اما در بهینه سازی تنها قابل قبول بودن یک طرح مورد نظر نیست، بلکه تعیین بهترین طرح از میان طرح‌های موجود مورد توجه می‌باشد . منظور از بهینه سازی در مهندسی عمران یافتن طرحی برای سازه است که ضمن رعایت ضوابط فنی، حدقل هزینه را داشته باشد .

دال به یک عضو سازه‌ای با ضخامت کم اطلاق می‌شود که بارهای وارد بر آن با عملکرد خمشی به تکیه‌گاه ها منتقل می‌گردد. دال‌های بتن آرمه عناصر سازه‌ای بسیار مطلوبی برای پوشش کف یا بام محسوب می‌شوند به طوری که از ساختمان‌های مسکونی، تجاری، اداری و پارکینگ گرفته تا عرشه‌ی پل‌ها و ساختمان‌های خاص، از دال‌های بتن آرمه به طور وسیع برای پوشش کف استفاده می‌شود. دال‌ها ممکن است به صورت دال یکطرفه و یا دوطرفه وجود داشته باشند. دال یکطرفه از نظر سازه‌ای مشابه یک تیر عریض است که با عملکرد در یک جهت و با تحمل لنگرهای خمشی، بار را به تکیه‌گاه‌های دو طرف خود منتقل می‌کند. بدین ترتیب در دال یکطرفه، میلگردهای خمشی اصلی فقط در یک جهت قرار گرفته و در جهت عمود بر آن، از یک حداقل میلگرد افت و حرارت استفاده می‌شود[۲] . با استفاده از فرآیند طراحی کلاسیک دال‌های یکطرفه می‌توان به انواع طرح‌های قابل قبول که همه محدودیت‌های آیین نامه را ارضا می‌نماید، دست یافت. اما با توجه به قیمت بتن و فولاد، رسیدن به طرحی بهینه با کمترین هزینه، حائز اهمیت می‌باشد.

کارهای اولیه که در زمینه بهینه سازی دال بتنی مسلح انجام شده است، براساس فرضیات ساده شونده بسیاری بوده اند. به نظر می‌رسد تروم در سال ۱۹۶۳ اولین طرح بهینه سازی هزینه را در مورد دال‌های یکطرفه براساس آیین نامه (ACI-1956) و تنها تحت اثر ممان ارائه نمود. تروم هزینه دال را به صورت مجموع هزینه فولاد و بتن و تنها براساس نسبت آرماتور به عنوان متغیر طراحی فرمول بندی نمود[۴]. براون در سال ۱۹۷۵ با روشی مشابه به فرموله کردن مسئله، مانند یک مسئله تک متغیره برای پیدا کردن ضخامت بهینه دال‌های یکطرفه با تکیه‌گاه ساده در معرض بار یکنواخت و با در نظر گرفتن فقط تغییر شکل‌های خمشی پرداخت و سایر فرضیات ساده کننده را در نظر گرفت[۵]. براندون و نیلسون در سال ۱۹۸۵ روشی برای مینیمم کردن مقادیر میلگردها در پوسته‌های بتن مسلح، صفحات، دیوارها و دال‌ها با مینیمم کردن جمع نیروها در دو جهت عمود بر هم در میلگردهای فولادی ارائه دادند و یک مثال دانشگاهی بدون در نظر گرفتن قیود آیین نامه ACI ارائه دادند[۶]. هانا و سنوسی در سال۱۹۹۵ یک فرآیند تکرار شونده برای مینمم کردن هزینه همه فرم‌های دال‌های بتنی و چوبی با در نظر گرفتن ۴ متغیر ارائه دادند (نوع ضخامت و پوشش، اندازه و فاصله مفصل‌ها، اندازه و فاصله تیرهای افقی و نوع چوب) و از قاعده بهینه سازی منظمی استفاده نشد. پژوهش آنها حداکثر حدود ده درصد در مقایسه با روش‌های معمول براساس چارت‌ها و جداول کاهش هزینه داشت[۷]. طباطبایی و موسلام در سال ۲۰۰۱ نتایجی را در مورد ابعاد فولاد دال‌های یکطرفه که یک طرف آن دارای تکیه ساده و طرف دیگر آن گیردار بود ارائه دادند. آنها با تکمیل سه برنامه کامپیوتری به توضیح بهینه کردن میلگردها در تیرها و دال‌های یکطرفه پرداختند. یک برنامه تجاری برای آنالیز غیرخطی سازه‌ها، یک برنامه فاینت المنتی برای تشریح سازه‌های بتن آرمه و مینیمم کردن حجم میلگردهای آنها، و یک برنامه جهت تبادل اطلاعات دو برنامه قبل. فرمول بندی برای بهینه سازی ارائه نشد[۸]. احمد خانلو و عادلی در سال ۲۰۰۵ یک فرمول کلی برای بهینه سازی هزینه دال‌های بتنی مسلح یک و چند دهانه با شرایط انتهایی مختلف مطابق آیین نامه ACI ارائه دادند. متغیرهای طراحی شامل ضخامت دال، قطر میلگردهای فولادی و فاصله میلگردها بودند. آنها در مرحله ی اول از مدل دینامیکی عصبی با فرض کردن متغیرهای پیوسته استفاده کردند و در مرحله دوم با استفااده از تکنیک عدد گسسته، مساله را حل نمودند [۹].

هدف از پژوهش حاضر، ارائه یک روش بهینه سازی جدید و موثر برای طراحی دال‌های بتنی یکطرفه در معرض تمام قیود بر اساس ضوابط آیین نامه ACI 318-05 می‌باشد. به این منظور ابتدا فرمول بندی قیود طراحی بر مبنای ضوابط آیین نامه ارائه شد. متغیرهای طراحی شامل ارتفاع دال، قطر میلگردهای خمشی و فاصله میلگردهای خمشی بوده و هدف در این مدل کاهش مجموع هزینه‌های بتن ریزی و میلگردگذاری می‌باشد. سپس الگوریتم برنامه ریزی درجه دوم متوالی (SQP) برای حل مسئله بهینه سازی استفاده شد و کارایی این روش با ارائه یک مثال عددی نشان داده شد.

۲ فرمول بندی طرح بهینه

مسائل بهینه سازی را در حالت کلی می توان به دو گروه مقید و نامقید تقسیم کرد. در اکثر مسائل مهندسی عمران بدلیل وجود محدودیت‌های آیین نامه‌ای با قیود مختلف مواجه هستیم و لذا طراحی دال نیز جزء مسائل بهینه سازی مقید قرار می گیرد .

۲-۱ متغیرهای طراحی

به پارامترهایی که برای تشریح طراحی یک سیستم انتخاب می‌شوند متغیر های طراحی گفته می‌شود. اولین قدم مهم در یک رابطه‌سازی کامل، مشخص کردن متغیرهای طراحی سیستم است. نکته مهم دیگر که باید در نظر داشت این است که تمام متغیرهای طراحی باید تا حد امکان از هم مستقل باشند[۱]. در این پژوهش متغیرهای طراحی شامل ارتفاع یا ضخامت دال (h)، قطر میلگردهای فولادی خمشی (db) و فاصله میلگردهای خمشی (S) می‌باشند.

۲-۲ تابع هدف

برای مقایسه طرح‌های قابل قبول مختلف باید معیاری داشت. این معیار ممکن است یک تابع اسکالر باشد که مقدار عددی آن را بتوان با متغیرهای طراحی مشخص، به دست آورد. پس این معیار باید تابع متغیرهای طراحی باشد. به این معیار در یک مسئله طراحی بهین تابع هدف گویند[۱]. در این پژوهش تابع هدف، مجموع هزینه‌های بتن ریزی و میلگرد گذاری انتخاب گردید. کاهش ارتفاع دال به کاهش هزینه بتن ریزی و کاهش قطر و فاصله میلگردها به کاهش هزینه میلگرد گذاری می‌انجامد. تابع هزینه را می‌توان از رابطه زیر تعیین نمود:

$$C_t = C_c + C_r \qquad (۱)$$

که در آن Cc و Cr نشان دهنده هزینه مربوط به بتن مصرفی و میلگردهای تسلیح می باشند. هزینه بتن مصرفی و آرماتورگذاری را مطابق روابط زیر می‌توان محاسبه نمود:

$$C_c = Lbhc_c \qquad (۲)$$

$$C_r = w_s L A_s c_s \qquad (۳)$$

که در آنها L طول دهانه ، b عرض دهانه، h ضخامت دال، c_c هزینه واحد حجم بتن ریزی ،Cs هزینه واحد وزن میلگردها می‌باشند، W_s وزن واحد فولاد که ۷۸۵۰ کیلوگرم بر مترمکعب است و As سطح مقطع میلگردهای طولی است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$A_s = \frac{\pi d_b^2}{4}\left(\frac{b}{s}\right) \qquad (۴)$$

که در آن d_b قطر و s فاصله میلگردهای تسلیح می‌باشند.

۲-۳ قیود طراحی

در این پژوهش قیود طراحی با توجه به آیین نامه بتن آمریکا (ACI 318-05) تعریف شده اند و شامل قیود خمشی، قیود برشی، قیود بهره برداری و قیود مربوط به تغییر شکل می‌باشند[۱۰]. با توجه به عملکرد یکطرفه و رفتار یکنواخت دال بین تیرها، در بررسی و طراحی آن نیازی به در نظر گرفتن کل دال نمی‌باشد و کافی است که یک عرض محدود آن در نظر گرفته شده و نتیجه به کل دال تعمیم داده شود.

۲-۳-۱ قیود خمشی

در مقاطع بحرانی ممان نهایی خارجی نباید از ممان مقاومت اسمی بیشتر باشد، این محدودیت مطابق رابطه زیر بیان می‌شود:

$$Mu \leq \emptyset\, Mn \qquad (۵)$$

که در آن Ø برابر 0.9 است ، Mu ممان طراحی نهایی و Mn ممان خمشی اسمی می‌باشند و از رابطه های زیر بدست می-آیند:

$$Mn = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2}\right) \qquad (۶)$$

$$Mu = kwl_n^2 \qquad (۷)$$

که در آنها f_y تنش تسلیم آرماتورهای تسلیم، l_n معادل طول خالص دهانه، d ارتفاع موثر مقطع می باشند. k ضریب مربوط به ممان است که از جدول ۱ بدست می‌آید و a ارتفاع معادل ناحیه فشاری بتن، و w معادل بار گسترده یکنواخت ضریب دار هستند که از روابط زیر محاسبه می‌شوند:

$$a = \frac{A_s f_y}{0.85\, f_c\, b} \quad (۸)$$

$$w = 1.2\ DL + 1.6\ LL \quad (۹)$$

که در آنها f_c معادل مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن، DL بار مرده سقف (علاوه بر وزن دال) و LL بار زنده می‌باشند.

جدول ۱- ضرایب آیین نامه‌ای جهت تعیین لنگرهای خمشی در تیرهای سراسری و تیرهای یکطرفه [۲] ACI 318

نیروی داخلی مورد نظر	ضریب مربوطه(k)
لنگر مثبت در دهانه های انتهایی الف) اگر انتهای غیر سراسری مقید (گیردار) نباشد ب) اگر انتهای غیر سراسری با تکیه‌گاه پیوسته باشد لنگر مثبت در دهانه‌های داخلی	$w\, l_n^2 / 11$ $w\, l_n^2 / 14$ $w\, l_n^2 / 16$
لنگر منفی در وجه خارجی اولین تکیه‌گاه داخلی الف) برای سازه های دو دهانه ب) برای سازه با بیش از دو دهانه لنگر منفی در سایر وجوه تکیه‌گاه‌های داخلی	$w\, l_n^2 / 9$ $w\, l_n^2 / 10$ $w\, l_n^2 / 11$
لنگر منفی در وجه کلیه تکیه‌گاه‌ها برای دال‌های با دهانه حداکثر ۳ متر ; و نیز برای تیرهایی که نسبت جمع سختی ستون‌ها به سختی تیر، در انتهای دهانه بزرگتر از ۸ متر است	$w\, l_n^2 / 12$
لنگر منفی در وجه داخلی تکیه‌گاه‌های خارجی برای اعضایی که با تکیه‌گاه‌ها به صورت یکپارچه ساخته شده اند الف) در جایی که تکیه‌گاه به صورت تیر لبه ای است ب) در جایی که تکیه‌گاه یک ستون است	$w\, l_n^2 / 24$ $w\, l_n^2 / 16$

۲-۳-۲ قیود برشی

در دال‌ها معمولا میلگرد برشی قرار داده نمی‌شود و بتن به تنهایی باید قادر به تحمل نیروهای برشی باشد. به منظور کنترل برش رابطه زیر استفاده می‌شود:

$$V_u \leq \emptyset\, V_c \quad (۱۰)$$

که در آن مقدار $\emptyset$ برابر 0.75 است و Vu معرف نیروی برش ضریبدار نهایی است که در وجه اولین تکیه‌گاه داخلی برابر $\frac{1.15\, wl_n}{2}$ و در وجه سایر تکیه‌گاه‌ها برابر $\frac{wl_n}{2}$ می‌باشد و Vc مقاومت برشی اسمی بتن است که از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$Vc = \alpha_1 \sqrt{f_c}\, bd \quad (۱۱)$$

که در آن مطابق آیین نامه بتن آمریکا (ACI 318-05) مقدار α_1 برابر 0.53 می‌باشد .

۲-۳-۳ قیود بهره برداری

قیود بهره برداری به صورت محدودیت در نسبت فولاد میلگردها و فاصله بین آنها تعریف می‌شود. برای جلوگیری از شکست ترد حداکثر فولاد در اعضای خمشی از رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\rho < \rho_{max} \quad (۱۲)$$

که در آن ρ درصد فولاد و ρ_{max} حداکثر نسبت فولاد می‌باشند و از روابط زیر بدست می‌آیند:

$$\rho = A_s/bd \quad (۱۳)$$

$$\rho_{max} = \frac{0.85 f'_c \beta_1}{f_y}\left(\frac{3}{7}\right) \quad (۱۴)$$

β_1 ضریبی است که بستگی به مقاومت فشاری بتن دارد و برای بتن با مقاومت فشاری بین ۱۷۵ تا ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع یا بیشتر از ۳۰۰ کیلوگرم بر سانتی مترمربع، از روابطه زیر بدست می‌آید:

$$\text{For } 175\frac{kg}{cm^2} \le f_c \le 300\frac{kg}{cm^2} \qquad \beta_1 = 0.85 \quad (۱۵)$$

$$\text{For } f_c \ge 300\frac{kg}{cm^2} \qquad \beta_1 = 0.85 - 0.05\,\frac{f_c - 300}{70} \ge 0.65 \quad (۱۶)$$

در دال‌ها نیازی به قرار دادن حداقل فولاد خمشی (ρ_{min}) نیست اما فولاد جمع شدگی و حرارتی به عنوان حداقل فولاد خمشی باید در دالها قرار داده شوند[ACI-10.5.4]. در جهت عمود بر میلگردهای اصلی خمشی یا در جهت فرعی دال نیز باید حداقل فولاد جمع شدگی و حرارتی قرار داده شود[ACI-7.12.1] این محدودیت به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$A_s \ge A_{smin} \quad (۱۷)$$

که در آن A_{smin} حداقل فولاد جمع شدگی و حرارتی می‌باشد و برای فولادهای نمره ۴۰ و ۵۰ ،از رابطه $0.002bh$ و برای فولاد نمره ۶۰ از رابطه $0.0018bh$ بدست می‌آید .

آیین نامه ACI برای در نظر گرفتن اثرات بارگذاری موضعی و همچنین کنترل گسترش ترک حداکثر فاصله میلگردها را محدود می‌کند که این محدودیت علاوه بر محدودیت حداقل فاصله میلگردها با روابط زیر بیان می‌شوند:

$$s < \min(3h, \alpha_2) \quad (۱۸)$$

$$s \ge \max(db, \alpha_3) \quad (۱۹)$$

که در آنها مقدار α_2 برابر ۴۵ سانتی متر و مقدار α_3 برابر 2.5 سانتی متر در نظر گرفته می‌شود.

۲-۳-۴ قیود تغییر شکل

در طراحی اعضای خمشی، عضو بتن آرمه باید دارای مقاومت لازم باشد اما نباید ابعاد آن آنقدر کوچک اختیار گردد که تغییر شکل عضو بیشتر از حد مجاز شود. آیین نامه بتن آمریکا (ACI 318-05) حدقل ضخامتی را از جدول ۲ به منظور کنترل تغییر شکل ارائه می‌کند. باید توجه داشت که در بسیاری از حالات طراحی معمول سازه‌های بتن آرمه تنها کنترل همین ضابطه برای بررسی عضو از نظر تغییر شکل مربوطه لازم و کافی است.

جدول ۲-حداقل ضخامت تیرها و دال‌های یکطرفه ($f_y = 4200\ kg/cm^2$)[۳]

عضو	تکیه‌گاه‌های ساده	یک انتها پیوسته	دو انتها پیوسته	طره
دال‌های تو پر	$l/20$	$l/24$	$l/28$	$l/10$
تیرها	$l/16$	$l/18.5$	$l/21$	$l/8$

باید توجه داشت که ضخامت کمتر از حداقل مقادیر جدول نیز می‌تواند مورد استفاده قرار گیرد، اما در آن صورت باید تغییر شکل عضو محاسبه شده و با مقادیر مجاز مقایسه گردد. ضرایب l به صورت ضریب γ در فرم استاندارد مسئله بهینه سازی بیان شده است. در خصوص جدول ۲ باید ذکر کرد که حداقل ضخامت ارائه شده در جدول فوق برای فولاد نمره ۶۰ (fy = 4200 kg/cm2) است. برای فولادهای دیگر مقادیر جدول باید در α_1 ضرب گردد.ضریب α_1 از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_1 = \left(0.4 + \frac{f_y}{7000}\right) \quad (۲۰)$$

و نیز مقادیر جدول ۲ برای بتن‌های معمولی است و برای بتن‌های سبک با وزن مخصوص بین 1500 kg/m3 تا 2000 kg/m3 مقادیر جدول باید در ضریب α_2 ضرب گردد. ضریب α_2 از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$\alpha_2 = \max(1.65 - .0003w_c, 1.09) \quad (۲۱)$$

که در آن w_c وزن مخصوص بتن بر حسب کیلوگرم بر سانتی‌مترمکعب می‌باشد.

۲-۴ فرم استاندارد مسئله بهینه سازی

با تعریف ضخامت دال (h) به عنوان متغیر طراحی اول (x_1)، قطر میلگردهای فولادی (d_b) به عنوان متغیر طراحی دوم (x_2) و فاصله میلگردها (S) به عنوان متغیر طراحی سوم (x_3) و با در نظر گرفتن هزینه دال به عنوان تابع هدف و همچنین قیود طراحی، فرم ریاضی و استاندارد مسئله طراحی دال یکطرفه به صورت روابط زیر بیان می‌شود:

Minimization of $\quad f(x) = Lbc_c x_1 + w_s L\frac{\pi x_2^2}{4}(\frac{b}{x_3})c_r$

Subjected to:

$$g_1(x) = \frac{kwl_n^2}{0.9(\frac{\pi x_2^2}{4}(\frac{b}{x_3})f_y((x_1 - \left(\frac{x_2}{2}\right) - 2) - (-\frac{(\frac{\pi x_2^2}{4}(\frac{b}{x_3})f_y \ / \ 0.85f_c b)}{2}))} - 1 \le 0$$

$$g_2(x) = \frac{1.15wl_n}{0.75 \times 2(0.53\, b(x_1 - \left(\frac{x_2}{2}\right) - 2)\sqrt{f_c})} - 1 \le 0$$

$$g_3(x) = \frac{\frac{\pi x_2^2}{4}(\frac{b}{x_3}) \ / \ b(x_1 - (x_2/2) - 2)}{3 \times 0.85f_c'\beta_1 / \ 7f_y} - 1 \le 0$$

$$g_4(x) = 1 - \frac{\frac{\pi x_2^2}{4}(\frac{b}{x_3})}{A_{smin}} \le 0$$

(۲۲)

$$g_5(x) = x_3 - 3x_1 \le 0$$

$$g_6(x) = x_2 - x_3 \le 0$$

$$g_7(x) = x_3 - 45 \le 0$$

$$g_8(x) = -x_3 + 2.5 \le 0$$

$$g_9(x) = \alpha_1\alpha_2\frac{L}{\gamma} - x_1 \le 0$$

$$g_{10}(x) = -x_2 \le 0$$

$$g_{11}(x) = -x_1 \le 0$$

در روابط بالا تابع f(x) تابع هدف بهینه سازی است که باید کمینه شود چرا که به صورت تابع هزینه مجموع بتن ریزی و آرماتور گذاری در نظر گرفته شده است. قیود g_1 مربوط به محدودیت خمشی، g_2 مربوط به محدودیت برشی، قیود g_3 تا g_8 مربوط به محدودیت کارایی، قید g_9 مربوط به محدودیت تغییر شکل است و دو قید آخر برای مثبت بودن متغیرهای طراحی در نظر گرفته شده اند.

۳ مثال عددی

در این بخش به عنوان مثال، طراحی دال یک سیستم یکطرفه به عرض ۸ متر و طول ۴ متر که در مرجع [۳] براساس آیین نامه ACI318-05 طراحی شده را مورد بررسی قرار می‌دهیم. بار مرده برابر 100 kg/m2 (علاوه بر وزن دال)، بار زنده برابر 500 kg/m2، مقاومت مشخصه بتن برابر f_c=210 kg/cm^2 ، تنش تسلیم میلگردها برابر f_y=3000 kg/ cm^2 و عرض تیرهای فرعی برابر 30 cm در نظر گرفته شد. با توجه به اینکه دال بیشتر از دو دهانه دارد، نسبت فولاد خمشی برای حداکثر لنگر منفی در وجه خارجی اولین تکیه‌گاه داخلی، تعیین کننده است ($K=\frac{1}{10}$) و با توجه به اینکه در دال معمولا میلگردهای برشی قرار داده نمی‌شود و بتن باید قادر به تحمل تنش های برشی باشد، حداکثر نیروی برشی در وجه این تکیه‌گاه داخلی، تعیین کننده است و از رابطه $\frac{1.15W_u L_n}{2}$ به دست می‌آید.

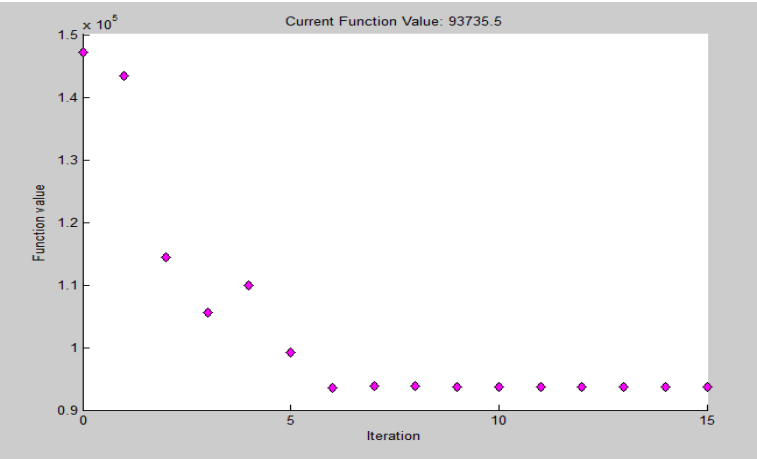
هزینه بتن ریزی حدودا برابر ۱۰۰۰۰۰ تومان در هر مترمکعب معادل ۰/۱ تومان در هر سانتی متر مکعب و قیمت میلگرد ϕ۸ برابر ۲۰۹۰ تومان، قیمت میلگرد 10 ϕ و 12 ϕ برابر ۱۹۶۰ تومان و سایر میلگردها ۱۹۳۰ تومان در نظر گرفته شد. مقایسه اندازه‌ها و هزینه‌های محاسبه شده برای نوار دال به عرض یک متر در روش کلاسیک و روش SQP در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳- مقایسه اندازه ها و هزینه های محاسبه شده در روش کلاسیک و روش SQP

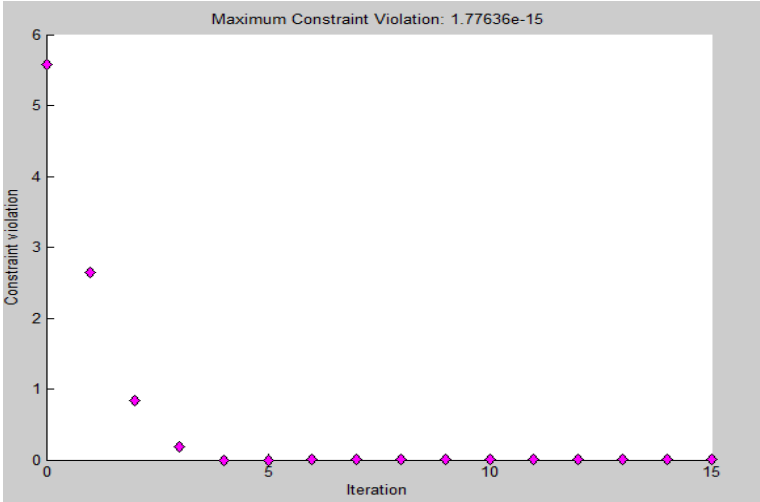
محل لنگر	K	h(cm)	d_b(cm)	S(cm)	هزینه در روش کلاسیک(تومان)	h(cm)	d_b(cm)	S(cm)	هزینه در روش SQP (تومان)
مقادیر لنگر منفی وجه خارجی اولین تکیه-گاه داخلی	1/10	14	1.2	18	94669	13.8	1	12.5	93735
وجه داخلی تکیه‌گاه انتهایی	1/24	14	1.2	42	72573	13.8	1	30	72235
سایر لنگرهای منفی	1/11	14	1.2	20	90802	13.8	1	13.9	90074
برای لنگرهای مثبت دهانه انتهایی	1/14	14	1.2	26	82771	13.8	1	17.8	82402
همه دهانه-های داخلی	1/16	14	1.2	30	79202	13.8	1	20.5	78895

نتایج موجود در جدول ۳ نشان می‌دهد که هزینه دال بتنی نسبت به هزینه طرح کلاسیک ۱ درصد کاهش یافته است و این نشان می‌دهد که روش پیشنهادی در این مقاله برای کاهش هزینه‌های طراحی روش مفیدی است. با توجه به مقادیر بدست آمده در طرح کلاسیک با در نظر گرفتن k برابر $\frac{1}{24}$ ، قید g_5 نقض شده است در حالی که مقادیر بدست آمده توسط الگوریتم SQP نقض شدگی نشان نمی‌دهد و در این حالت، قیود فعال g_4 و g_9 بوده و در بقیه حالات قیود فعال g_1 و g_9 می‌باشند.

تغییرات مقدار تابع هزینه در چرخه های مختلف طراحی در شکل (۱) نشان داده شده است و ملاحظه می شود که الگوریتم پس از ۱۵ چرخه طراحی به همگرایی رسیده است. مقدار تابع هدف تا تکرار ششم تغییرات زیادی دارد، اما پس از آن تغییرات کند می‌شود. شکل (۲) نشان دهنده حداکثر مقدار نقض شدگی قیود می‌باشد. همانطور که مشاهده می‌شود از تکرار چهار به بعد نقض شدگی قیود تقریبا به صفر می‌رسد و در تکرار پنج هیچ نقض شدگی در قیود ملاحظه نمی‌گردد. این موضوع نشان می‌دهد که این الگوریتم توانایی برطرف کردن نقض شدگی را دارد و ضمن کاهش هزینه، همه محدودیت‌های طراحی را ارضا می‌نماید.



شکل ۱ – تغییرات مقدار تابع هزینه



شکل ۲- حداکثر مقدار نقض شدگی قیود

باید توجه کرد که هزینه واحد بتن و فولاد تاثیر بسزایی در طرح بهینه دارد، به طوری که با کاهش هزینه بتن، الگوریتم سعی در افزایش ارتفاع مقطع برای ایجاد طراحی بهینه می‌نماید. بنابراین عملکرد الگوریتم منطقی است زیرا، با توجه به در نظر گرفتن قیمت بالای بتن در این مثال، الگوریتم سعی در کاهش هزینه بتن دارد که این خود منجر به فعال شدن قید حداقل ارتفاع (g_7) می‌گردد.

۴ نتیجه گیری

در این تحقیق یک روش طراحی بهین برای طراحی دال‌های بتنی یکطرفه با تکیه‌گاه‌های ساده و پیوسته ارائه شد. ابتدا تابع هدف و متغیرهای طراحی مشخص، سپس فرمول بندی طراحی تحت قیود خمشی ، برشی، کارایی و تغییر شکل ارائه گردید. روش SQP به عنوان روشی موثر و کارا در حل مسئله بهینه سازی بکار گرفته شد. با ارائه یک مثال طراحی کلاسیک دال بتنی با روش SQP مقایسه و بهبود نتایج ملاحظه گردید و نشان داده شد که الگوریتم پیشنهادی توانایی حداقل کردن هزینه‌های ساخت دال بتنی یکطرفه را با در نظر گرفتن کلیه محدودیت‌های طراحی دارد و طی تعداد چرخه محدودی همگرا می‌گردد. از آنجا که ممکن است قیمت بتن و میلگردها در زمان‌ها و مکان‌های مختلف متفاوت باشد و با توجه به اینکه در طراحی کلاسیک هزینه بتن و میلگرد در طراحی در نظر گرفته نمی‌شود، هنگامی که قیمت بتن کاهش یابد روش SQP با افزایش ضخامت دال، کاهش هزینه بیشتری را نسبت به طرح کلاسیک نتیجه می‌دهد که این امر اهمیت استفاده از این روش را در طراحی نشان می‌دهد.

۵ مراجع

[۱]. ابوالبشری،م. ح. (۱۳۷۸)،" مقدمه ای بر طراحی بهین"، دانشگاه فردوسی مشهد.

[۲]. مستوفی نژاد، د. (۱۳۸۹)،"سازه های بتن آرمه(جلد دوم)،"انتشارات ارکان دانش.

[۳]. اکبر، ح. ا. (۱۳۸۹)، "طراحی سازه های بتن آرمه(جلد اول)"، انتشارات سیمای دانش.

[4].Traum, E. 1963. Economical design of reinforce concrete slabs using ultimate strength theory. Proceeding of the American concrete institute 60: 763-774.

[5].Brown, R.H. 1975. Minimum cost selection of one-way slab thickness. Journal of the Structural Division, ASCE 101 (ST12), pp.2585-2590.

[6].Brondurn-Nielsen, T. 1985. Optimization of reinforcement in shells, folded plates, walls, and slabs. Journal of the American Concrete Institute, Vol. 82, No.4, pp.304-309.

[7]. Hanna, A.S., Senouci, A.B. 1995. Design optimization of concrete slab forms. Journal of Construction Engineering and Management, Vol. 121, No. 2, pp.215–221.

[8].Tabatabai, S.M.R., Mosalam, K.M., 2001. Computational platform for non linear analysis/optimal design reinforced concrete structures. Engineering computations, Vol. 18, No.5/6, pp.726-743.

[9]. Ahmadkhanlou, A., Adeli, H., 2005. Optimum cost design of reinforced concrete slabs using neural dynamic model. Engineering Application of Artificial Intelligence 18: 65-72.

[10].ACI 318-05, Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary-ACI 318R-05, American Concrete Institute, Farmington Hills, MI, USA, 2005.

Abstract
Nowadays, competition among companies to present the best design uncovers necessity to optimization methods in planning of structural components. Since concrete slabs play a main role in transmitting loads to foundations, optimizing them can decrease the costs of buildings. To do so, in this research, a new method to design of slabs is presented to decrease the cost of concrete and bar of slabs. First the problem is formulated using optimization methods. Designing constrains consist of flexural, shear, service and deformation according to ACI 318-05. Then sequential quadratic programming (SQP) is utilized to find the best method. The efficiently of proposed method in designing concrete slabs with different constrains is evaluated in a case study.