

Optimal Layout Design at the Height of Shear Wall of 3D RC Structure Considering CO₂ Emissions

Hamidreza Shahmoradi Qomi¹, Hosein Naderpour², Seyed Rohollah Hoseini Vaez^{*3}

1- PhD. Student, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

2- Professor, Faculty of Civil Engineering, Semnan University, Semnan, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Engineering, University of Qom, Qom, Iran

ABSTRACT

Shear wall design is one of the optimization problems, due to the presence of various parameters and its inhomogeneity, it has always attracted the attention of researchers and structural designers. The purpose of this research is to design a shear wall and its optimal arrangement in the height of an intermediate reinforced concrete three-dimensional structure. Considering the necessity of preserving the environment and reducing the emission of greenhouse gases, which are mostly made up of carbon gas, the objective function has been formulated based on the reduction of CO₂ emission caused by the materials used in the shear wall. On the other hand, in order to optimize the design, CSA meta-heuristic algorithm has been used, and to satisfy the constraints of the problem, the objective function has been used by the penalty method. Also, in order to simplify the search space, a number of shear walls have been pre-designed and discretely coded. In addition, displacement and force constraints have been applied regarding the shear wall and boundary elements so that the design and layout of the walls can be done correctly. In this research, a reinforced concrete moment-resisting frame with a shear wall in seven stories has been modeled and analyzed with the OpenSees software. Based on the optimal design of shear walls, the algorithm was successful in achieving the desired layout by satisfying all constraints.

ARTICLE INFO

Receive Date: 26 November 2022

Revise Date: 06 January 2023

Accept Date: 28 January 2023

Keywords:

3D RC structure

Meta-heuristic algorithm

Optimal design

Shear wall layout in height

CO₂ emissions

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2023.370951.2978>

*Corresponding author: Seyed Rohollah Hoseini Vaez

Email address: hoseinivaez@qom.ac.ir

طراحی بهینه چیدمان دیوار برشی در ارتفاع سازه سه بعدی بتن آرمه با رویکرد کاهش انتشار CO₂

حمیدرضا شاهمرادی قمی^۱، حسین نادریور^۱، سیدروح الله حسینی واعظ^{۲*}

۱- استاد تمام، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران

۲- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه قم، قم، ایران

چکیده

طراحی دیوار برشی یکی از مسائل مهم در رشته مهندسی عمران محسوب می‌شود که به علت وجود پارامترهای متنوع و ناهمگنی مصالح آن، همواره مورد توجه محققان در شاخه بهینه‌سازی قرار گرفته است. هدف از این تحقیق طراحی بهینه چیدمان دیوار برشی در ارتفاع قاب خمشی سه بعدی بتن آرمه معمولی است. از آنجایی که ساخت سازه‌های بتن آرمه مقادیر زیادی فولاد و بتن مصرف می‌کند، بهینه‌سازی طراحی سازه‌های بتن آرمه با هدف کاهش تأثیرات زیست‌محیطی، در سال‌های اخیر توجه زیادی از سوی محققان را به خود جلب کرده است. از این رو به منظور حفظ ارزش محیط زیست و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای، تابع هدف بر مبنای کاهش انتشار CO₂ ناشی از مصالح مصرفی در دیوار برشی (شامل فولاد و بتن)، فرمول نویسی شده است. از سوی دیگر به منظور بهینه‌یابی طراحی، از الگوریتم فراابتکاری کلاغ و جهت برآورده کردن قیود مساله، از تابع هدف به روش پناالتی استفاده شده است. همچنین به منظور ساده‌سازی فضای جستجو، انتخاب‌های دیوار برشی به صورت جعبه پیشنهادی گسسته، کدنویسی و مشخص گردیده است. به علاوه قیدهای کنترل تغییر مکانی و نیرویی در خصوص دیوار برشی و المان‌های مرزی اعمال شده است تا هم‌زمان طراحی و چیدمان دیوارها به درستی صورت پذیرد. در این تحقیق یک قاب خمشی بتن آرمه به همراه دیوار برشی در هفت طبقه به کمک نرم‌افزار آپن‌سیس مدل‌سازی و تحلیل شده است. نتایج طراحی بهینه دیوارهای برشی نشان می‌دهد که الگوریتم توانسته است با اقبای تمام قیود مساله، به چیدمان مطلوب دست یابد.

کلمات کلیدی: سازه بتن آرمه سه بعدی، الگوریتم فراابتکاری، طراحی بهینه، چیدمان دیوار برشی در ارتفاع، انتشار CO₂

سابقه مقاله:		شناسه دیجیتال:			
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	doi: https://doi.org/10.22065/jsce.2023.370951.2978
۱۴۰۱/۰۹/۰۵	۱۴۰۱/۱۰/۱۶	۱۴۰۱/۱۱/۰۸	۱۴۰۱/۱۱/۰۸	۱۴۰۲/۰۹/۳۰	10.22065/jsce.2023.370951.2978
*نویسنده مسئول:		سید روح الله حسینی واعظ			
پست الکترونیکی:		hoseinivaez@qom.ac.ir			

۱- مقدمه

دیوار برشی بتن‌آرمه یک نوع مرسوم و موثر از سیستم‌های باربر جانبی در سازه‌های بتن‌آرمه می‌باشد. به علاوه با توجه به اثرات قابل توجه نیروی زلزله بر روی دیوارهای برشی، استفاده از المان مرزی به عنوان یک ابزار مهم در کنترل نیروهای وارده به دیوار می‌باشد. هدف اصلی این پژوهش، طراحی بهینه چیدمان دیوارهای برشی در ارتفاع یک سازه با سیستم دوگانه قاب خمشی و دیوار می‌باشد. به منظور ارائه طرح دقیق‌تر دیوار برشی، سازه بتن‌آرمه به همراه دیوار برشی به صورت سه‌بعدی در نرم‌افزار آپن‌سیس مدل‌سازی شده است. همچنین با توجه به کاهش نیروی زلزله در طبقات بالاتر، بدیهی است که کنترل چیدمان دیوارها در ارتفاع سازه می‌تواند موجب نزدیک‌تر شدن به طرح بهینه به لحاظ فنی و اقتصادی گردد.

بتن مسلح یک ماده مرکب (متشکل از بتن و فولاد) است که اغلب در پروژه‌های ساختمانی و زیرساخت‌های عمرانی استفاده می‌شود. کاربرد زیاد و استفاده گسترده از این ماده در جهان امروز، منجر به تولید سالانه بتن مسلح با حجمی بیش از میلیاردها مترمکعب شده است. این استفاده قابل توجه از منابع طبیعی، باعث بروز اثرات قابل توجهی در محیط زیست گردیده است. بنابراین امروزه بهینه‌سازی سازه‌های بتن‌آرمه با رویکرد کاهش اثرات زیست محیطی و استفاده بهینه از ظرفیت مصالح، قابل توجه محققان و طراحان سازه قرار گرفته است [۱].

در این تحقیق، تابع هدف مساله با رویکرد توجه به سلامت محیط زیست و کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای فرمول‌نویسی شده است. بنابراین حجم بتن و فولاد مورد استفاده در طرح که از مواردی نظیر ضخامت دیوار، تعداد و سطح مقطع میلگردها استخراج می‌گردد، محاسبه و به عنوان پارامترهای اصلی تابع هدف مساله در نظر گرفته شده است.

۲- مروری بر ادبیات

با توجه به اهمیت محیط زیست و حفظ آن، رویکرد تازه‌ای در علم مهندسی و طراحی سازه‌ها مورد بحث و بررسی قرار گرفته است. امروزه، علاقه زیادی جهت در نظر گرفتن همزمان عوامل موثر در حفظ محیط زیست و بهینه‌سازی طراحی سازه‌های بتن‌آرمه در مطالعات به چشم می‌خورد. با توجه به این مهم، برخی از کشورهای توسعه یافته سعی کردند تا عوامل کلیدی حاکم بر حفظ محیط زیست را بررسی کنند [۲]. در بررسی‌های اخیر، اغلب انتشار گازهای گلخانه‌ای و اثرات ناشی از آن در فرآیند بهینه‌سازی طراحی سازه‌ها در نظر گرفته شده است. هرچند که استراتژی‌های مختلفی برای کاهش گازهای گلخانه‌ای وجود دارد [۳]، اما بهینه‌سازی طراحی سازه‌ها با رویکرد کاهش کربن بسیار کارآمد ارزیابی شده است [۴]. از این رو می‌توان به مطالعه طراحی قاب خمشی بتن‌آرمه معمولی که توسط اخوان کاظمی و همکاران در سال ۲۰۲۲ صورت پذیرفت [۵]، اشاره نمود. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که طراحی سازه بر مبنای کاهش انتشار CO₂، روشی کارآمد است و طرح نهایی در راستای حفظ محیط زیست می‌باشد.

از سوی دیگر در خصوص بهینه‌یابی طراحی قاب خمشی بتن‌آرمه، تحقیقات بسیاری توسط محققان صورت گرفته است. به عنوان مثال در مطالعه سیفی، طراحی قاب بتن‌آرمه با استفاده از الگوریتم ژنتیک و با ملاحظات اثرات خوردگی بهینه‌سازی شده است [۶]. در این تحقیق یک سازه ۵ طبقه بتن‌آرمه در آپن‌سیس مدل‌سازی شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد که با کنترل قیود نیروی محوری، نیروی خمشی و بیشینه دررفت سازه، روش ارائه شده موثر واقع گردیده است.

در مورد چیدمان دیوارهای برشی در پلان قاب خمشی بتن‌آرمه، می‌توان به کتاب دیوارهای برشی خیرالدین [۷] اشاره نمود که در فصل پنجم به جانمایی و تخمین تعداد دیوارهای برشی مورد نیاز در سازه‌های بتن‌آرمه می‌پردازد. در این فصل به منظور آشنایی مهندسان محاسبی که به تازگی کار طراحی سازه‌ها را آغاز نموده‌اند، رابطه‌ای برای تخمین مساحت مورد نیاز دیوارهای برشی در سازه‌های بتن‌آرمه معرفی می‌شود. هم‌چنین موقعیت و جانمایی بهینه دیوارهای برشی با پلان‌های مربع، مستطیل، مثلثی و L شکل با منظور نمودن عوامل چهارگانه پیچش، صلبیت سقف، تغییر مکان جانبی نسبی و نیروی بالارانش تعیین گردیده است.

محققان الگوهایی نیز برای طراحی معماری پلان سازه‌ها ارائه داده‌اند [۸-۱۲] که به اندازه طراحی بهینه سازه برای مهندسان طرح اهمیت ندارد. امین‌نیا و همکاران الگوی طرح بهینه اجزای دیوار برشی در پلان با اشکال مختلف را در سال ۲۰۱۵ مطرح کردند [۱۳]. همچنین در رساله ارشد خیرالدین و نعمت پور، روشی برای بهینه‌یابی دیوارهای برشی در سازه‌های فولادی ارائه گردیده است [۱۴]. به منظور بهینه‌یابی چیدمان دیوار برشی و طراحی بهینه مشخصات دیوار، ژانگ و مولر [۱۵] سعی کردند با ساده‌سازی روابط طراحی دیوار برشی، بهترین چیدمان را توسط الگوریتم CSS ارائه دهند. از این رو گروه‌بندی دیوارها بدون هیچ محدودیتی صورت پذیرفت و دیگرام تداخلی هر گروه ترسیم گردید. بنابراین الگوریتم چیدمان‌ها را با توجه به محدودیت‌های پیچشی، خمشی، برشی و تغییر مکان جانبی، ارزیابی و طرح با کمترین هزینه را محاسبه می‌کند.

در سال ۲۰۱۶، با هدف ارزیابی مکان دیوار برشی در پلان، مدل‌های سازه به صورت پیش فرض با جایگذاری دیوار برشی در چند طرح مختلف بر روی سازه‌های ۵ طبقه و ۹ طبقه مطرح شد. هر چند نتایج تحقیق، طرح با چیدمان بهتر را معرفی می‌کند، اما به لحاظ اصول بهینه‌سازی، این انتخاب‌ها بایستی توسط الگوریتم صورت پذیرد، تا طرح بهینه از میان هزاران انتخاب تعیین گردد [۱۶].

در سال ۲۰۱۸، طراحی تحلیلی به منظور بهینه‌سازی دیوارهای برشی در سیستم دال تخت مطرح شد [۱۷]. در این تحقیق یک سازه ۶ طبقه مدلسازی و تحلیل شده است. به منظور رسیدن به هدف تحقیق، یک مدل بدون دیوار برشی و سه حالت دیوار برشی در مرکز و در اطراف پلان فرض گردیده است. نتایج تحلیل نشان می‌دهد که وجود دیوار برشی در اطراف پلان از نظر مقاومت جانبی سازه و ابعاد دیوار محاسبه شده، بسیار کارآمد بوده و به عنوان طرح بهینه انتخاب شده است. در همین سال، نیکزاد و یوشیتامی [۱۸] روشی به منظور طراحی کاربردی سازه بتن‌آرمه سه‌بعدی با سیستم قاب خمشی و دیوار برشی بر مبنای بهینه‌یابی سازه‌ها ارائه دادند. این تحقیق بر روی یک سازه با سیستم دال و دیوار با تکیه بر اثر محدودیت ابعادی بر روی نتایج طراحی بهینه انجام گرفته است. اخیراً دهنوی پور و همکاران [۱۹] بهینه‌یابی چیدمان دیوار برشی بر مبنای قید پیچشی به کمک الگوریتم گردش آب را مطرح کرده‌اند. این تحقیق بر روی چیدمان دیوارها در پلان تمرکز داشته و نتایج با رویکرد تابع چند هدفه به صورت سطح پارتو استخراج گردیده است.

طلعت‌اثری و ربیعی [۲۰] روشی برای بهینه‌یابی چیدمان دیوارهای برشی در پلان با اعمال محدودیت‌های معاری ارائه دادند. در این تحقیق گروه‌بندی دیوارها در پلان، با هر طرح دلخواه توسط الگوریتم صورت پذیرفته است. به علاوه ارائه الگوریتم QCSS و استفاده از دیوار برشی با ضخامت ثابت به همراه آرماتورگذاری یکنواخت از ویژگی‌های این تحقیق است. به علاوه استراتژی بهینه‌سازی چیدمان دیوار برشی برای سازه‌های بلند بر اساس طراحی مفهومی مبتنی بر داده‌ها، توسط لو و همکاران [۲۱] به کمک الگوریتم جستجوی ممنوعه صورت گرفته است. همچنین در تحقیق دیگر، پابلو و همکاران [۲۲] با استفاده از شبکه حلقه‌ای، طراحی مفهومی سازه با رویکرد چیدمان دیوارهای برشی در سازه را مطرح کردند.

۳- روش تحقیق

در این تحقیق روشی به منظور چیدمان بهینه دیوار برشی در ارتفاع یک قاب بتن‌آرمه سه‌بعدی به کمک محاسبات نرم ارائه شده است. با توجه به محدودیت‌های معماری و دانش مهندسی، مکان دیوارها در پلان فرض می‌شود. هدف کلی در این تحقیق، طراحی و چیدمان بهینه دیوار برشی در ارتفاع با در نظر گرفتن المان مرزی به کمک محاسبات نرم می‌باشد. برای رسیدن به پاسخ نزدیک به طرح بهینه، مدل سازه قاب خمشی بتن‌آرمه به همراه دیوار برشی به صورت سه‌بعدی مدل‌سازی شده است.

۳-۱- طراحی دیوارهای برشی

طراحی دیوارهای برشی مطابق با ضوابط آیین نامه بتن امریکا (ACI318-19) [۲۳] فرمول‌نویسی شده است. با توجه به وجود پارامترهای مختلف در طراحی دیوار برشی، از جمله آرماتورگذاری طولی و عرضی در جان و بال، ضخامت جان دیوار برشی، مساله به صورت گسسته و به کمک ایجاد باکس دیوارهای برشی فرمول‌نویسی شده است. دیوارهای برشی با رعایت قوانین زیر، از پیش طراحی و به صورت لیست مقاطع در نرم‌افزار ذخیره شده است:

- کنترل ابعاد دیوار برشی
- کنترل درصد آرماتورهای طولی المان مرزی
- کنترل فاصله آرماتورگذاری و نحوه چیدمان آنها
- کنترل درصد آرماتورهای طولی و عرضی جان دیوار برشی
- کنترل امتداد دیوارهای برشی تا پی برای دهانه‌های تعیین شده
- کنترل چیدمان دیوارهای برشی بر روی هم (از لحاظ تناسب ابعادی و آرماتورگذاری)

در ادامه محدودیت‌های هندسی برای تولید مقاطع به صورت زیر می‌باشد:

جدول ۱: فرضیات محدودیت‌های هندسی دیوار برشی

نام پارامتر	مقدار حداقل	مقدار حداکثر
درصد نسبی آرماتورهای طولی المان مرزی (ρ_l)	۰/۰۱	۰/۰۸
درصد نسبی آرماتورهای برشی افقی (ρ_h) و عمودی جان دیوار (ρ_v)	۰/۰۰۲۵	۰/۰۱
ضخامت دیوار برشی (t_w)	۲۰۰	۵۰۰
	میلی‌متر	میلی‌متر

همچنین در این تحقیق به منظور کنترل همزمان اثر نیروی محوری-خمشی دیوار برشی، دیاگرام تداخلی به ازای هر دیوار در نرم‌افزار متلب^۱ به صورت شبه‌کد شکل ۱، از قبل محاسبه خواهد شد.

```

Determine the number of interaction points ( $i=1$  to  $n$ ).
Calculate the neutral axis depth from the extreme compression fiber ( $x_i=i \times b/n$ ).
Calculate the depth of the equivalent rectangular stress block ( $a_i$ ).
Calculate the compressive force of concrete.
for  $j=1$  to  $m^{\text{th}}$  reinforcement rows
  Calculate the strain of the  $j^{\text{th}}$  reinforcement row
  Calculate the stress of the  $j^{\text{th}}$  reinforcement row
  If  $d_i > a_i$ 
    Calculate the axial compressive force of the  $j^{\text{th}}$  reinforcement row.
  else
    Calculate the axial tensile force of the  $j^{\text{th}}$  reinforcement row.
  end if
end for
Calculate the net tensile strain ( $\epsilon_t$ )
Calculate the strength reduction factor for  $i^{\text{th}}$  iteration
Calculate the design flexural strength ( $\phi P_{n,i}$ ).
Calculate the design axial strength ( $\phi M_{n,i}$ ).

```

شکل ۱: شبه‌کد رسم دیاگرام اندرکنش تداخلی نیروی محوری خمشی دیوار برشی

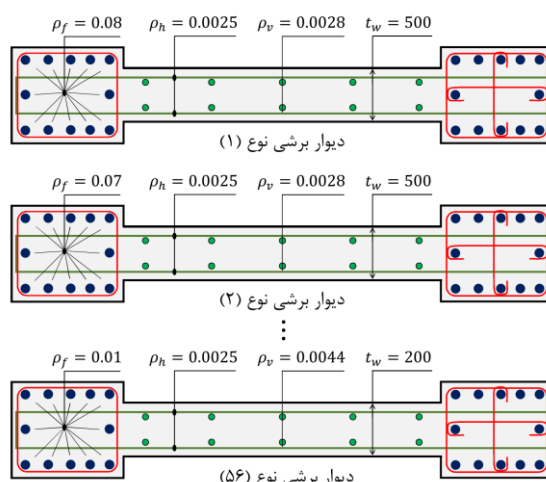
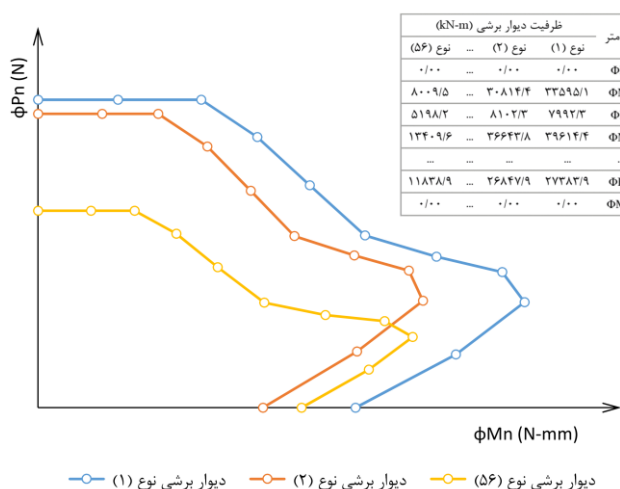
بنابراین مقاطع پیش‌فرض دیوار برشی برای حل مساله، از ضخامت جان به مقدار ۵۰۰ میلی‌متر و با درصد نسبی آرماتورهای طولی به مقدار ۸ درصد شروع و تا ضخامت جان به مقدار ۲۰۰ میلی‌متر و با درصد نسبی آرماتورهای طولی به مقدار ۱ درصد ادامه می‌یابد، که به صورت شماتیک در شکل ۲ نمایش داده شده است.

در نهایت، لیست مقاطع دیوارهای برشی با ذخیره کردن اطلاعات کلیدی شامل، ضخامت دیوار، درصد آرماتورهای طولی و عرضی جان، درصد آرماتورهای طولی المان مرزی و همچنین مقادیر مربوط به ظرفیت اندرکنش نیروی محوری خمشی دیوار با در نظر گرفتن ۱۱ نقطه، مطابق جدول ۲ ایجاد می‌گردد.

¹ Matlab

جدول ۲: لیست مقاطع پیش طراحی شده دیوار برشی

تعداد میلگردهای المان مرزی	قطر میلگردهای المان مرزی	درصد میلگردهای طولی المان مرزی	فاصله میلگردهای عمودی دیوار (φ16)	درصد نسبی میلگردهای عمودی دیوار	ضخامت دیوار	تیپ دیوار
۳۴	φ32	%۸	۳۰۰	۰,۰۰۲۸	۵۰۰	۱
۳۰	φ32	%۷	۳۰۰	۰,۰۰۲۸	۵۰۰	۲
۳۰	φ30	%۶	۳۰۰	۰,۰۰۲۸	۵۰۰	۳
.....
۱۸	φ25	%۲	۴۵۰	۰,۰۰۴۴	۲۰۰	۵۵
۱۲	φ20	%۱	۴۵۰	۰,۰۰۴۴	۲۰۰	۵۶



شکل ۲: نمایش شماتیک مقاطع پیش فرض

۲-۳- معرفی مساله طراحی بهینه دیوار برشی

هدف این تحقیق طراحی بهینه چیدمان دیوارهای برشی در ارتفاع قاب خمشی بتن آرمه معمولی در حالت سه بعدی است. تابع هدف مساله بهینه سازی سازه بتن آرمه به همراه دیوار برشی به این گونه تعریف شده است، که میزان انتشار CO2 ناشی از مصرف مصالح در کل سازه (قاب خمشی و دیوار برشی) به حداقل برسد. با توجه به اینکه المان های قاب خمشی ثابت فرض شده است، بنابراین به حداقل رساندن میزان انتشار CO2 مربوط به مصالح مصرفی در دیوارهای برشی (شامل فولاد و بتن) می باشد. در این صورت تابع هدف به صورت زیر تعریف می شود:

$$E_t = \sum_{i=1}^n V_{i,Ac} \cdot C_{Ac} + \sum_{i=1}^n W_{i,As} \cdot C_{As} \quad (1)$$

که در این رابطه، عبارت E_t معرف تابع هدف است و نشان دهنده میزان انتشار CO2 ناشی از مصرف مصالح در دیوارهای برشی سازه می باشد. همچنین عبارت n نشان دهنده تعداد دیوارها است. به علاوه $V_{i,Ac}$ و C_{Ac} به ترتیب بیان گر حجم بتن مصرفی دیوار برشی و ضریب انتشار CO2 مربوط به مصالح بتنی می باشد که مقدار آن معادل $3 \text{ kg CO}_2\text{-e/m}^3$ فرض شده است. به همین ترتیب $W_{i,As}$ و C_{As} بیان گر وزن آرماتور مصرفی دیوار برشی به همراه المان مرزی و ضریب انتشار CO2 مربوط به مصالح فولادی می باشد که مقدار آن معادل $132/88 \text{ kg CO}_2\text{-e/kg}$ فرض شده است [۵].

۳-۳- تعریف قیدهای مساله

قیدها را می‌توان به دو دسته تقسیم‌بندی کرد؛ دسته اول همان روابط طراحی است که منجر به ایجاد ظرفیت لازم به ازای بارهای وارده به سازه می‌شود. دسته دوم رعایت محدودیت‌های آیین‌نامه‌ای (بایدها و نبایدها) می‌باشد که بسیار حایز اهمیت است. در ادامه تابع هدف با در نظر گرفتن تخطی از قیود به روش پنالیتی به صورت رابطه زیر بیان می‌شود:

$$f(x) = E_t \times (1 + v_1)^2 \quad (2)$$

در این تحقیق سیستم سازه به صورت قاب خمشی بتن‌آرمه به همراه دیوار برشی معمولی در نظر گرفته شده است. بنابراین مطابق با آیین‌نامه بتن امریکا، تنش در دورترین تار فشاری به مقدار زیر محدود می‌شود:

$$v_1 = \max(\sigma - 0.2f_c' - 1, 0) \quad (3)$$

به منظور کنترل کشش و فشار در المان مرزی، نیروی محوری بدست آمده از تحلیل سازه، می‌بایست کمتر از ظرفیت کششی آرماتورها (T_a) باشد که به عنوان قید دوم به صورت زیر می‌باشد:

$$v_2 = \max(P_t - T_a - 1, 0) \quad (4)$$

از سوی دیگر، در حالتی که المان مرزی تحت نیروی فشاری باشد، به عنوان یک ستون عمل می‌کند و بایستی از ظرفیت فشاری مطابق با آیین‌نامه بتن امریکا کمتر باشد. با فرض استفاده از خاموت‌های معمولی (غیر اسپیرال)، مقاومت اسمی نیروی محوری ستون به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$v_3 = \max(P_n - P_{n,max} - 1, 0) \quad (5)$$

به منظور کنترل برش در جان دیوار برشی، نیروی برشی حاصل از تحلیل (V_u) نباید بیشتر از مقاومت برشی (V_n) باشد. بنابراین قید مربوط به کنترل برش به صورت رابطه زیر فرمول‌نویسی شده است:

$$v_4 = \max(v_u - \phi v_n - 1, 0) \quad (6)$$

از سوی دیگر، ظرفیت برشی اسمی دیوار به حداکثر مقدار زیر بایستی محدود شود، که بایستی در محاسبات لحاظ گردد:

$$v_{n,max} = 0.66\sqrt{f_c'} A_{cv} \quad (7)$$

با توجه به اثر همزمان نیروی محوری و خمشی وارده به دیوار برشی، می‌بایست این مهم بر اساس دیاگرام تداخلی دیوار کنترل گردد. همانطور که گفته شد، اطلاعات مربوط به هر دیوار برشی، محاسبه و ذخیره شده است. بنابراین نیروی حاصل از تحلیل به عنوان یک نقطه کنترلی درون دیاگرام قرار می‌گیرد. با توجه به زاویه قرارگیری این نقطه با محور افقی و قطع آن با نقاط دیاگرام ظرفیت دیوار برشی مربوطه، نقطه کنترلی به دست می‌آید.

بنابراین یک دیوار برشی زمانی در محدوده مجاز قرار می‌گیرد، که طول خط واصله از مبدا تا نقطه نیرویی (L_u) کوتاه‌تر از طول خط واصله از مبدا تا محل قطع متناظر در دیاگرام اندرکنش (L_a) باشد. از این رو قید سوم به صورت زیر بیان می‌شود:

$$v_5 = \max(L_u - L_a - 1, 0) \quad (8)$$

همچنین لازم است جابجایی نسبی طبقات (δ_{Story}) در اثر بارهای وارده با حد مجاز آیین‌نامه (δ_a) کنترل شود. بنابراین جابجایی نسبی هر طبقه باید کمتر از ۰/۰۰۲ برابر ارتفاع طبقه باشد. بر این اساس قید ششم را می‌توان به صورت زیر فرمول‌نویسی کرد:

$$v_6 = \max(\delta_{Story} - \delta_a - 1, 0) \quad (9)$$

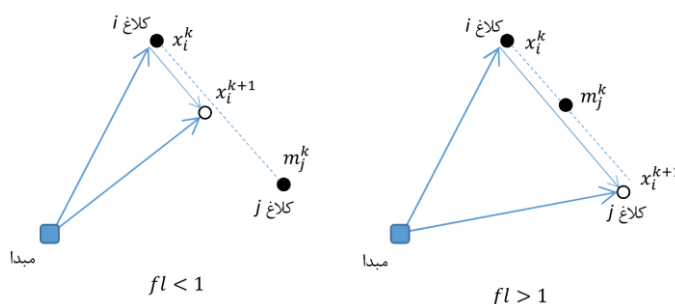
در این تحقیق ضریب پیچش سازه (A_j) در پلان محاسبه و مطابق با آیین نامه به مقدار $1/2$ محدود شده است تا سازه در محدوده پیچش حداقل قرار گیرد. بنابراین قید هفتم به صورت زیر فرمول نویسی می شود:

$$v_7 = \max(\delta_{max} - \delta_{Ave} - 1.2, 0) \quad (10)$$

۳-۴- الگوریتم حل مساله

امروزه با گسترش مسائل مهندسی در زمینه بهینه سازی و پیچیدگی هر چه بیشتر آنها، الگوریتم های فراابتکاری یکی از موثرترین روش ها برای حل مسائل بهینه سازی به شمار می روند. الگوریتم های فراابتکاری یک روش محاسباتی هستند که با یک سعی اولیه و منطبق بر قوانین تعریف شده به سمت تکرارهای بهبودشونده حرکت می کنند، تا به بهینه مطلق یک مساله بسیار نزدیک شوند [۲۴]. از این رو الگوریتم ها یکی از پرکاربردترین ابزارهای بهینه سازی به شمار می روند که در اغلب مسائل طراحی بهینه سازه ها مورد استقبال محققان قرار گرفته است [۲۵]. در این تحقیق از الگوریتم کلاغ (CSA^2) برای حل مساله استفاده گردیده است که در سال ۲۰۱۶ توسط عسگرزاده ارائه شد [۲۶]. این الگوریتم همانند اغلب الگوریتم ها نظیر کرم شب تاب (FA^3)، از جمله الگوریتم های هوش ازدحامی است که با سیستم مبتنی بر جمعیت عمل می کند. کلاغ ها از جمله پرندگانی هستند که بسیار باهوش و نسبت به فیزیک خود، مغز بزرگی دارند. تحقیقات نشان می دهد که این موجودات به کمک حافظه تصویری قوی که دارند، قادرند غریبه ها را به راحتی تشخیص دهند و مکان های پیچیده را به خوبی می توانند به یاد بیاورند.

ایده اصلی این الگوریتم از رفتار چگونگی یافتن غذا و ذخیره آن الهام گرفته شده است. به این صورت که گویی کلاغ، غذا را دزدیده و در مکانی امن ذخیره می کند تا چندین ماه بعد در صورت لزوم بتواند از آنها استفاده کند. اگر فرض کنیم که اندازه دسته پرندگان (جمعیت) N باشد، آنگاه موقعیت کلاغ i ام، در تکرار t ام را با x_{it} نشان می دهیم. هر کلاغ i موقعیت مخفی گاه غذایی خود را به خاطر دارد و دائماً به دنبال آن است که بهترین مکان را بدست آورد. این موقعیت در تکرار t ام با m_{it} نشان داده می شود (شکل ۳).



شکل ۳: نحوه حرکت الگوریتم کلاغ.

در نهایت معادله حرکت کلاغ i در صورتی که نداند کلاغ j به دنبال اوست، به صورت زیر بیان می شود:

$$x_i^{t+1} = x_i^t + r_i \times fl_i^t \times (m_j^t - x_i^t) \quad (11)$$

اما در صورتی که کلاغ i در تکرار t ام، به اندازه P_{it} احتمال دهد که کلاغ j به دنبال اوست، مقصد خود را بر اساس رابطه زیر تغییر

می دهد:

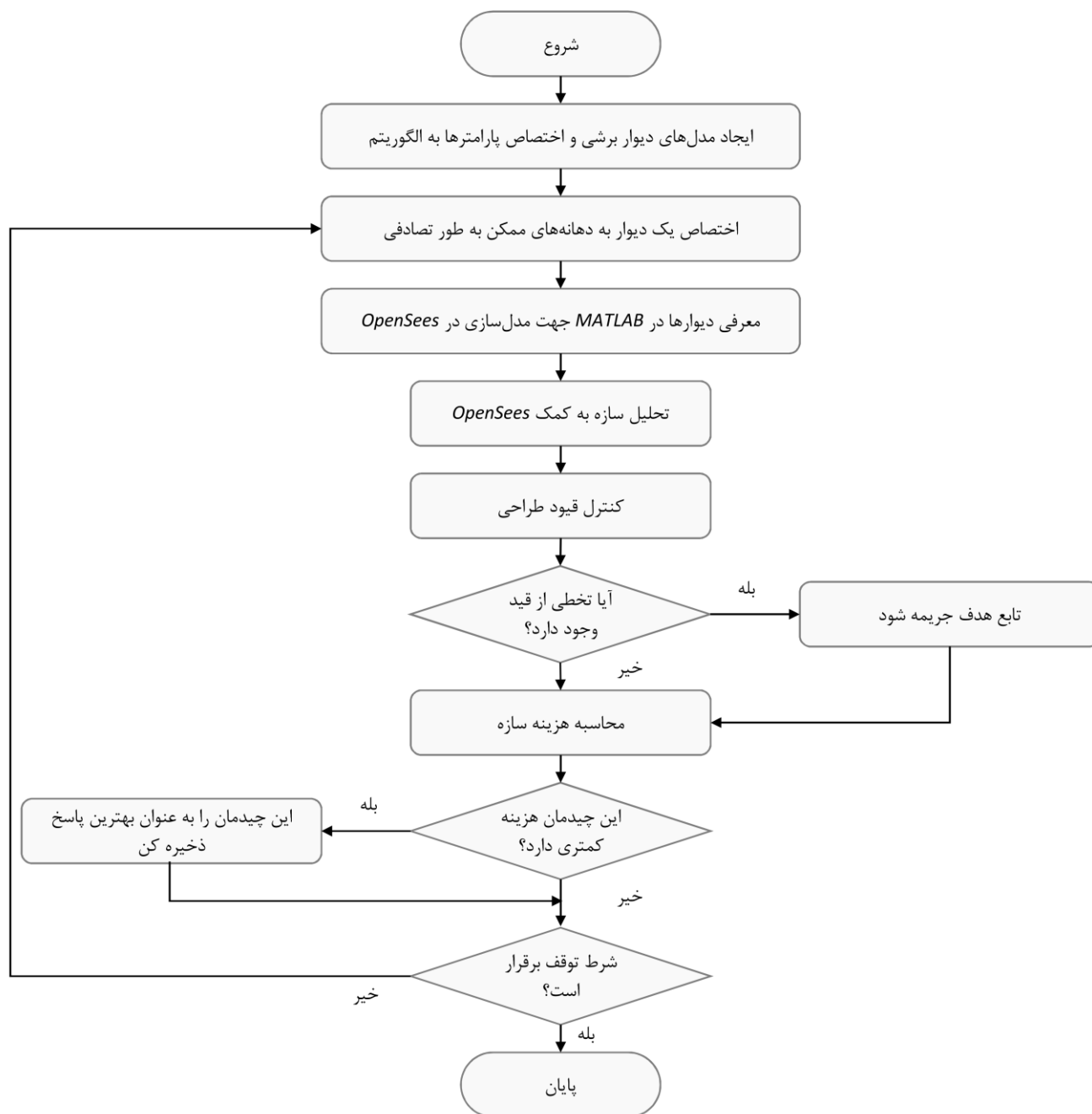
² Crow Search Algorithm

³ Firefly Algorithm

$$\text{if } r_j < P_i^j$$

$$x_i^{t+1} = \text{update to random position}$$
(۱۲)

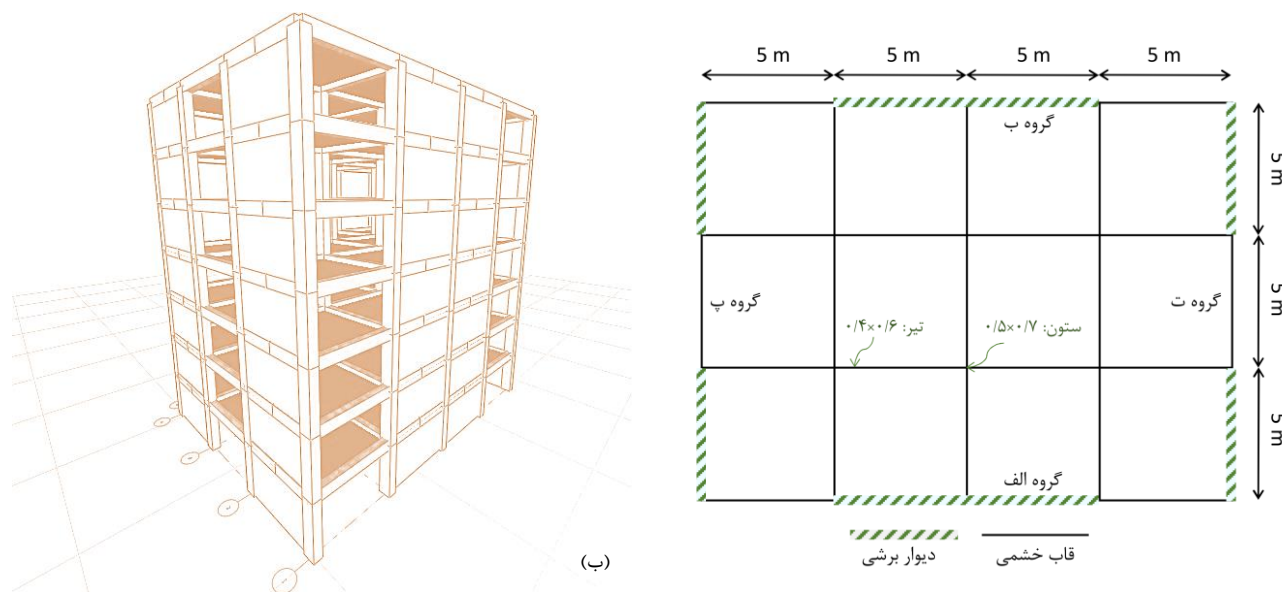
که در این رابطه r_j و P_i^j یک عدد تصادفی در بازه صفر تا یک و f_{lit} نشان دهنده طول پرواز کلاغ i در تکرار t ام می‌باشد. در نهایت در شکل ۴، راهکار کلی حل مساله در قالب یک فلوجارت ساده نمایش داده شده است.



شکل ۴: فلوجارت حل مساله

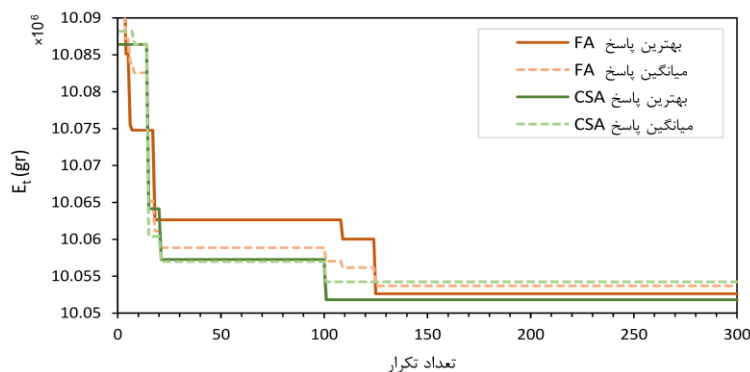
۴- مثال عددی

در این تحقیق، یک سازه بتن آرمه به صورت ۷ طبقه با ارتفاع کل ۲۱ متر به همراه دیوار برشی در نظر گرفته شده است (شکل ۵). به منظور تحلیل و طراحی، این سازه به صورت سه بعدی در نرم افزار آپن سیس^۴ [۲۷] مدل سازی شده است. به منظور حل مساله مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن معمولی برابر با ۳۰ مگاپاسکال و مقاومت فشاری فولاد مصرفی برابر با ۴۰۰ مگاپاسکال می باشد. به علاوه بار مرده وارده به سازه برابر ۴۵۰ کیلوگرم بر مترمربع، بار زنده معادل ۲۰۰ کیلوگرم بر مترمربع و شتاب زلزله ۰/۱۲۵ برابر شتاب زمین فرض شده است.



شکل ۵: تصویر مدل سازه، الف) پلان، ب) مدل سه بعدی

شکل ۵، تصویر سه بعدی مدل سازه ای و پلان مربوطه را نمایش می دهد. به منظور طراحی بهینه قاب بتن آرمه به همراه دیوار برشی، دیوارها در پلان به چهار گروه الف، ب، پ و ت تقسیم بندی شده اند (شکل ۵-الف). پس از تنظیم الگوریتم بهینه سازی برای حل مساله حاضر، ایجاد باکس دیوار و معرفی محدودیت های دیوار در پلان به مدل سازه توسط الگوریتم، طراحی بهینه آغاز می گردد. به منظور اعتبارسنجی نتایج، مساله علاوه بر الگوریتم کلاغ (CSA)، توسط الگوریتم کرم شب تاب (FA) نیز بهینه یابی شده است. در این تحقیق، برای حل هر مساله ۳۰۰ تکرار در نظر گرفته شده است.



شکل ۶: میزان انتشار CO₂ در هر تکرار برای پاسخ بهینه و میانگین

شکل ۶ نمودار حرکت الگوریتم به سمت نقطه بهینه برای هر دو الگوریتم را نشان می‌دهد. با توجه به اینکه هر الگوریتم به تعداد ۳۰ بار اجرا شده است، بهترین و میانگین پاسخ‌ها نیز در نمودار فوق ارائه گردیده است. در نهایت نتایج طراحی بهینه در جدول ۳ نشان داده شده است.

جدول ۳: نتایج حاصل از طراحی

مقدار تابع هدف (Ei)		پارامترهای حل مساله
کرم شبتاب (FA)	کلاغ (CSA)	
۴	۴	تعداد متغیرهای مساله
۳۰۰	۳۰۰	تعداد تکرار
۱۰۰۰۵۵،۰۱۳	۱۰۰۰۵۶،۸۷۶	بدترین پاسخ
۱۰۰۰۵۳،۷۰۴	۱۰۰۰۵۴،۲۴۲	میانگین پاسخ
۱۰۰۰۵۲،۶۲۶	۱۰۰۰۵۱،۸۱۸	بهترین پاسخ
صفر	صفر	میزان تخطی از قیود در پاسخ بهینه

همانطور که در جدول فوق مشخص است، کمترین مقدار تابع هدف در این سازه با توجه به چیدمان بهینه دیوار برشی به مقدار ۱۰،۰۵۱،۸۱۸ گرم رسیده است. به علاوه الگوریتم توانسته است در پاسخ بهینه تمام قیود را برآورد کند و میزان تخطی کل به مقدار صفر رسیده است.

۵- بحث بر روی نتایج تحقیق

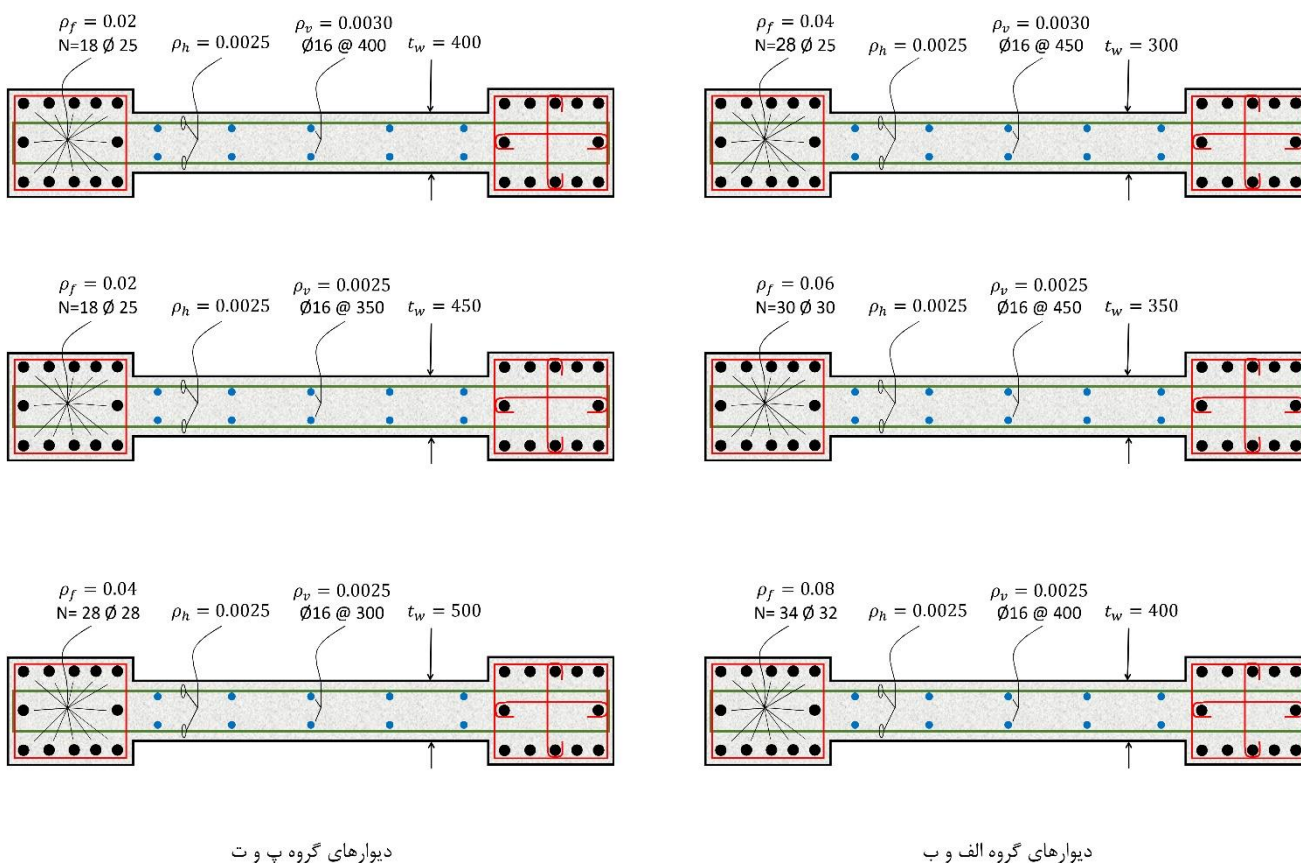
در این تحقیق یکی از روش‌های طراحی و چیدمان بهینه دیوار برشی در ارتفاع یک سازه سه‌بعدی بتن‌آرمه بیان شد. طراحی و بهینه‌یابی چیدمان دیوار برشی در ارتفاع که تابع ابعاد بتن و مساحت آرماتورها به همراه کنترل المان مرزی است، یکی از دست‌آوردهای این تحقیق به شمار می‌رود. در ادامه به بررسی نتایج طراحی دیوار و چیدمان بهینه حاصل از حل این مساله که در جدول ۴ آورده شده است، می‌پردازیم.

جدول ۴: طراحی بهینه چیدمان دیوار برشی

گروه دیوار	نام طبقه	ضخامت دیوار	درصد نسبی میلگردهای عمودی دیوار	فاصله میلگردهای عمودی دیوار (φ16)	درصد طولی المان مرزی	قطر میلگردهای المان مرزی	تعداد میلگردهای المان مرزی
الف	۱-۳	۴۰۰	۰/۰۰۲۵	۴۰۰	٪۸	φ32	۳۴
	۴-۵	۳۵۰	۰/۰۰۲۵	۴۵۰	٪۶	φ30	۳۰
	۶-۷	۳۰۰	۰/۰۰۳۰	۴۵۰	٪۴	φ25	۲۸
ب	۱-۳	۴۰۰	۰/۰۰۲۵	۴۰۰	٪۸	φ32	۳۴
	۴-۵	۳۵۰	۰/۰۰۲۵	۴۵۰	٪۶	φ30	۳۰
	۶-۷	۳۰۰	۰/۰۰۳۰	۴۵۰	٪۴	φ25	۲۸
پ	۱-۳	۵۰۰	۰/۰۰۲۷	۳۰۰	٪۴	φ25	۲۸
	۴-۵	۴۵۰	۰/۰۰۲۵	۳۵۰	٪۲	φ25	۱۸
	۶-۷	۴۰۰	۰/۰۰۲۵	۴۰۰	٪۲	φ25	۱۸
ت	۱-۳	۵۰۰	۰/۰۰۲۷	۳۰۰	٪۴	φ25	۲۸
	۴-۵	۴۵۰	۰/۰۰۲۵	۳۵۰	٪۲	φ25	۱۸
	۶-۷	۴۰۰	۰/۰۰۲۵	۴۰۰	٪۲	φ25	۱۸

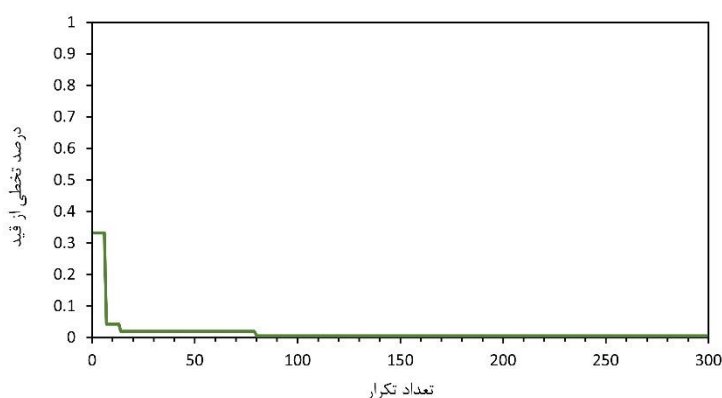
با توجه به جدول فوق، تیپ دیوارهای برشی در ارتفاع به صورت طبقات ۱ الی ۳، ۴ الی ۵ و ۶ الی ۷ می باشد. همانطور که مشخص است، پاسخ بهینه از دیوارهای در راستای X، با ضخامت ۴۰۰ میلی متر در طبقات پایین شروع و در طبقات بالایی به ۳۰۰ میلی متر و دیوارهای در راستای Y، با ضخامت ۵۰۰ میلی متر در طبقات پایین شروع و در طبقات بالایی به ۴۰۰ میلی متر می رسد. از سوی دیگر درصد نسبی میلگردهای عمودی دیوار بزرگتر از ۰/۰۲۵ به دست آمده که با توجه به ضخامت دیوار فواصل آرماتورها در طبقات بالا بیشتر از طبقات پایین به دست آمده است.

شکل ۷، طرح نهایی چیدمان دیوارهای برشی را به صورت شماتیک نمایش می دهد.



شکل ۷: نمایش شماتیک طراحی بهینه چیدمان دیوار برشی

با توجه به نتایج به دست آمده و همچنین نمودار شکل ۸، مشاهده می شود که این روش به منظور طراحی و چیدمان بهینه دیوارهای برشی، تلاش می کند تا قیود مساله که همان ضوابط طراحی بر مبنای آیین نامه است را به خوبی برآورده کند و به طرح بهینه دست یابد.



شکل ۸: میزان تخطی کل قیدها در هر تکرار

جدول ۵، مقدار حداکثر نسبت تقاضا به ظرفیت برای هر یک از قیدهای طراحی را در پاسخ بهینه نشان می‌دهد. همانطور که مشخص است، قید تغییر مکان به علت وجود دیوارهای مناسب در طرح نهایی، از اهمیت کمتری برخوردار می‌باشد. همچنین قیود مربوط به کنترل نیروی برشی دیوارها، کنترل پیچش کلی سازه و کنترل اندرکنش نیروی محوری خمشی دیوارها، به ترتیب اهمیت بیشتری در نتایج طرح نهایی چیدمان دیوارها را به خود اختصاص داده‌اند.

جدول ۵: ارزیابی قیود طراحی

نام قید	تنش در المان مرزی	نیروی محوری	نیروی برشی	اندرکنش	تغییر مکان	پیچش	
	V ₁	V ₂	V ₃	V ₄	V ₅	V ₆	V ₇
مقدار بیشینه	۰/۵۶۳	۰/۴۲۲	۰/۹۹۶	۰/۷۷۹	۰/۲۷۱	۰/۸۲۳	

۶- نتیجه‌گیری

در این تحقیق یک فرمول‌نویسی جدید به منظور حل مساله بهینه‌یابی چیدمان دیوارهای برشی در ارتفاع سازه بتن‌آرمه ارائه گردید. همچنین با توجه به گسترش استفاده از سازه‌های بتن‌آرمه، به منظور حفظ محیط زیست، میزان انتشار CO₂ ناشی از مصالح مصرفی که یکی از مهم‌ترین گازهای گلخانه‌ای است، به عنوان تابع هدف مساله در نظر گرفته شده است. به منظور حل مثال عددی، یک قاب خمشی بتن‌آرمه معمولی به همراه دیوار برشی در هفت طبقه مدل‌سازی گردید. نتایج حاصل از این تحقیق به طور خلاصه در زیر بیان می‌شود:

۱. مدل‌سازی یک قاب خمشی بتن‌آرمه به همراه دیوار برشی در مقیاس واقعی، متناسب با چیدمان تصادفی دیوار در ارتفاع
۲. فرمول‌نویسی مساله به صورت گسسته و ایجاد یک باکس جامع از دیوارهای برشی پیش طراحی شده.
۳. نحوه چیدمان دیوارهای برشی در بهترین پاسخ، به گونه‌ای است که کاهش حجم مصالح و در پی آن کاهش انتشار CO₂ را در کل سازه شاهد هستیم.
۴. خروجی طراحی بهینه، نشان می‌دهد که الگوریتم توانسته است تمام قیود را برآورده کند و به بهترین چیدمان دیوار در ارتفاع دست یابد.

مراجع

- [1] Afzal, M., Liu, Y., Cheng, J. C., & Gan, V. J. (2020). Reinforced Concrete Structural Design Optimization: A Critical Review. *Journal of Cleaner Production*, 260, 120-623.
- [2] Ding, G. K. (2008). Sustainable Construction, the Role of Environmental Assessment Tools. *Journal of Environmental Management*, 86(3), 451-464.
- [3] Sepehri, A., Sarrafzadeh, M. H., & Avateffazeli, M. (2020). Interaction Between *Chlorella Vulgaris* and Nitrifying-Enriched Activated Sludge in the Treatment of Wastewater With Low C/N Ratio. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119-164.
- [4] Gan, V. J., Lo, I. M., Ma, J., Tse, K. T., Cheng, J. C., & Chan, C. M. (2020). Simulation Optimization towards Energy Efficient Green Buildings: Current Status and Future Trends. *Journal of Cleaner Production*, 254, 120012.
- [5] Akhavan Kazemi, M., Hoseini Vaez, S. R., & Fathali, M. A. (2022). An Eco-Friendly Reliability-Based Design Optimization of Intermediate Reinforced Concrete Moment Frames. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 1-21.
- [6] Seify Asghshahr, M. (2021). Design Optimization of Corroded Reinforced Concrete Frame using Genetic Algorithm. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(8).
- [7] Kheyroddin, A. and Emami, E. (2016). *Shear Wall Based on ACI 318-2014 & Iranian National Building Code (Chapter 9)*. Semnan: Semnan University, 499-522 (Chapter 5).
- [8] Terzidis, K. (2007). Auto PLAN: A Stochastic Generator of Architectural Plans from a Building Program. *Digital Media and the Creative Process*, 2008.
- [9] Lai, H. J. (1988). Hamiltonian Line Graphs. *Journal of graph theory*, 12(1), 11-15.
- [10] Peng, C. H., Yang, Y. L., Bao, F., Fink, D., Yan, D. M., Wonka, P., & Mitra, N. J. (2016). Computational Network Design from Functional Specifications. *ACM Transactions on Graphics (TOG)*, 35(4), 1-12.
- [11] Shekhawat, K. (2014). Algorithm for Constructing an Optimally Connected Rectangular Floor Plan. *Frontiers of Architectural Research*, 3(3), 324-330.
- [12] Stiny, G. (2006). *Shape: Talking about Seeing and Doing*. MIT Press, Cambridge, MA.
- [13] Aminnia, M., & Hosseini, M. (2015). The Effects of Placement and Cross-Section Shape of Shear Walls in Multi-Story RC Buildings with Plan Irregularity on Their Seismic Behavior by Using Nonlinear Time History Analyses. *International Journal of Civil and Environmental Engineering*, 9(10), 1327-1334.
- [14] Kheyroddin, A., Nematpour A., (2012). *Optimal Location of Concrete Shear Walls in Steel Structures Using Genetic Algorithm*, Master Science, Semnan University, Faculty of Civil Engineering.
- [15] Zhang, Y., & Mueller, C. (2017). Shear Wall Layout Optimization for Conceptual Design of Tall Buildings. *Engineering Structures*, 140, 225-240.
- [16] Kulkarni, A. (2016). Assessment of Location and Optimum Percentage of Shear Wall for Typical Plans. *International Journal of Engineering Development and Research*, 12(3), 41-47
- [17] Abdullah, S., & Nandhakumar, P. (2018). Analytical Design for Optimization of Shear Wall for Flat Slab. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(5), 1335-1338.
- [18] Nikzad, H., & Yoshitomi, S. (2018). Practical Design Procedures of 3D Reinforced Concrete Shear Wall-Frame Structure Based on Structural Optimization Method. *International Science Index, Urban and Civil Engineering*, 12(6).
- [19] Dehnvipour, H., Meshki, H., & Naderpour, H. (2021). Torsion-Based Layout Optimization of Shear Walls Using Multi-Objective Water Cycle Algorithm. *Advances in Structural Engineering*, 24(13), 3030-3042.
- [20] Talatahari, S., & Rabiei, M. (2020). Shear Wall Layout Optimization of Tall Buildings Using Quantum Charged System Search. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 14(5), 1131-1151.
- [21] Lou, H., Gao, B., Jin, F., Wan, Y., & Wang, Y. (2021). Shear Wall Layout Optimization Strategy for High-Rise Buildings Based on Conceptual Design and Data-Driven Tabu Search. *Computers & Structures*, 250, 106546.
- [22] Pizarro, P. N., Massone, L. M., Rojas, F. R., & Ruiz, R. O. (2021). Use of Convolutional Networks in the Conceptual Structural Design of Shear Wall Buildings Layout. *Engineering Structures*, 239, 112311.
- [23] American Concrete Institute. Committee 318. (2019). *Residential Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-19) and Commentary: An ACI Standard*. American Concrete Institute.
- [24] Hoseini Vaez, S. R., & Shahmoradi Qomi, H. (2018). Bar Layout and Weight Optimization of Special RC Shear Wall. *Structures Elsevier*, 14(1), 153-163.
- [25] Emami, S., Parsa, J., Emami, H. (2021). Evaluating Cracks in Concrete Dams using Meta-heuristic Algorithms and Artificial Neural Networks. *Journal of Structural and Construction Engineering*, 8(Special Issue 2).

- [26] Askarzadeh, A. (2016). A Novel Metaheuristic Method for Solving Constrained Engineering Optimization Problems: Crow Search Algorithm. *Computers & Structures*, 169, 1-12.
- [27] McKenna, F., Fenves, G. L., & Scott, M. H. (2000). *Open system for earthquake engineering simulation*. University of California, Berkeley, CA.