

طراحی پایدار دال دوطرفه بتن آرمه به منظور بهینه‌سازی انرژی محصور با استفاده از الگوریتم ژنتیک

علی قاسمی خوراسگانی^۱، محسن سعادت^۲

^۱دانش‌آموخته کارشناسی ارشد، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران؛ alighasemi657@gmail.com

^۲استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران؛ mohsen.saadat@iau.ac.ir

* نویسنده مسئول: محسن سعادت

چکیده

با توجه به افزایش چشمگیر انتشار گازهای گلخانه‌ای و گرم شدن کره زمین، نیاز به فرآیندهای دوست‌دار طبیعت بیش از پیش احساس می‌شود. انرژی محصور از جمله عوامل تاثیرگذار بر انتشار گاز دی‌اکسیدکربن بوده و کاهش آن می‌تواند قدمی بزرگ در راستای محیط-زیست پاک باشد. از طرف دیگر، صنعت ساختمان یکی از صناعی است که به واسطه نوع مصالح مصرفی و فواصل طولانی حمل، بیشترین انرژی محصور را به خود اختصاص داده‌است. در نتیجه، در این مقاله، انرژی محصور به عنوان یکی از اهداف مساله انتخاب شده‌است. همچنین با توجه به اینکه بتن پرمصرف‌ترین ماده دنیا بعد از آب شناخته شده، دال بتن‌آرمه به عنوان عضو مورد مطالعه در نظر گرفته شده است. بهینه‌سازی یک دال با ابعاد مشخص و بارگذاری ثابت با استفاده از الگوریتم ژنتیک در نرم‌افزار اکسل پس از پیاده‌سازی معادلات تحلیل به روش ضرایب لنگر خمشی و طراحی به روش بار و مقاومت و تعریف محدودیت‌های آیین نامه بتن ایران انجام شده‌است. عوامل موثر در کاهش انرژی محصور دال، کاهش مقاومت فشاری بتن به پایین‌ترین حد ممکن و افزایش تنش تسلیم آرماتورها و افزایش مقدار مصرفی آرماتور در دال می‌باشند. با توجه به رابطه مستقیم هزینه با قیمت آرماتور، با افزایش قیمت آرماتور، کاهش انرژی محصور دال سبب افزایش هزینه اجرای دال شده‌است. به طوری که نتایج نشان می‌دهند کاهش حدود چهار درصدی انرژی محصور سبب افزایش حدود دو درصدی هزینه دال می‌شود.

کلمات کلیدی: انرژی محصور، دال دوطرفه، تیر محیطی، بهینه‌سازی، الگوریتم ژنتیک

Sustainable design of reinforced concrete two-way slab through embodied energy optimization by Genetic Algorithm

Ali Ghasemi Khorasgani¹, Mohsen Saadat²

¹MSc graduate, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran;
alighasemi657@gmail.com

²Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Na.C., Islamic Azad University, Najafabad, Iran;
mohsen.saadat@iau.ac.ir

* Corresponding author: Mohsen Saadat

ABSTRACT

Due to the effect of embodied energy on the sustainable development and high consumption of concrete in construction materials, the embodied energy of reinforced concrete slab with the beam is optimized. In this research, the internal forces of the slab have been calculated using the flexural moment coefficient method. The objective functions in this research are energy and cost. The code's limitations are considered constraints in the optimization process, and the effect of design variables on the objective functions is studied. A rectangular two-way slab with suitable circumferential beams by a length of 7 m and a width of 4.9 m, which is continuity on four sides, has been studied under the load of 500 live loads and 550 additional dead loads (without slab weight). The variables of slab thickness, compressive strength of concrete, and yield stress of reinforcement in this slab have been determined as the optimization limit due to the depreciation of the embodied energy and cost objective functions by the Genetic Algorithm in compliance with regulatory and executive requirements.

Keywords: Embodied Energy, Two-way slab, premarital beam, Optimization, Genetic Algorithm.

۱- مقدمه

در سال‌های اخیر قیمت بالای انرژی و همچنین تصویب پروتکل کیوتو به عنوان یک توافق‌نامه بین‌المللی الزام‌آور برای کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای توسط ۱۸۳ کشور، صنایع را به کاهش مصرف انرژی ترغیب کرده‌است. با توجه به محدود بودن منابع انرژی و لزوم حفاظت از محیط‌زیست، عمده تمرکز جامعه جهانی بر مصرف انرژی و انتشار گازهای گلخانه‌ای معطوف شده و سهم صنعت ساختمان در مصرف انرژی حدود ۴۰ درصد از کل انرژی جهان بوده‌است. همچنین این صنعت عامل ۲۵ درصد انتشار گازهای گلخانه‌ای است [۱]. توسعه پایدار و اعتبار پایداری مصالح ساختمانی با آشکار شدن تأثیر محیط‌زیستی صنعت ساخت‌وساز اهمیت روزافزونی پیدا کرده‌است. یکی از موثرترین ابزارهای کاهش این تأثیر، کاهش میزان انرژی مصرفی در ساخت سازه‌های جدید است.

انرژی مصرفی در صنعت ساختمان به دو دسته کلی تقسیم می‌شود. دسته اول انرژی عملیاتی که حدود ۴۵ درصد از انرژی مصرفی این صنعت را شامل می‌شود و دسته دوم انرژی محصور که سهم آن ۵۵ درصد از انرژی مصرفی در صنعت ساختمان است [۲]. انرژی محصور، انرژی مورد نیاز برای استخراج، تولید، حمل‌ونقل مصالح، ساخت ساختمان، مرمت و نگهداری و در نهایت تخریب آن است [۳]. در سال‌های اخیر با توجه به تمرکز محققین بر انرژی عملیاتی سازه‌ها به دلیل سهم زیادی که در انرژی کلی طول عمر یک ساختمان دارد و بهینه کردن آن، انرژی محصور در جریان ساخت سازه مغفول باقی مانده‌است. همچنین با توجه به ظهور تجهیزات و لوازم کارآمدتر همراه با مصالح پیشرفته‌تر و موثرتر و مصالح عایق بندی پتانسیل بهینه‌سازی انرژی عملیاتی کاهش یافته و تأکید جاری به انرژی محصور مصالح ساختمانی منتقل شده‌است. بهینه سازی انرژی محصور در مرحله طراحی سازه، موجب صرف هزینه کمتر در فرآیند بهینه‌سازی می‌شود.

گنزال و ناوارو [۴] بر این باورند که مواد و مصالح با انرژی محصور بیشتر، نتیجه فرآیندهایی هستند که انتشار گاز دی‌اکسیدکربن در آن‌ها بیشتر بوده‌است. بتن پرمصرف‌ترین ماده در جهان پس از آب بوده و مصرف جهانی آن حدود شش میلیارد و چهارصد میلیون مترمکعب در سال است [۵]. در کشور ایران نیز مصرف این ماده از متوسط جهانی بیشتر است.

محاسبه انرژی محصور به روش‌های گوناگونی انجام می‌شود. اولین بار کرافورد [۶] روش ورودی و خروجی را با استفاده از داده‌های ملی برای تعیین کمیت انرژی مورد نیاز برای تولید استفاده کرده‌اند. که این روش به دلیل تفاوت سطح تفکیک اقتصاد در کشورهای مختلف، کاربرد جامعی ندارد. پس از آن دگزیت و مانیش [۷] یک روش تجزیه و تحلیل ترکیبی مبتنی بر فرآیند استفاده کردند. در این روش انرژی محصور فرآیندهای تولید محصول جزء به جزء محاسبه می‌شود. اخیراً آتماکا [۸] روشی ترکیبی با استفاده از پایگاه داده ICE^۱ ارائه کرد و انرژی محصور در صنعت ایالات متحده آمریکا را با استفاده از چهار روش ورودی خروجی، روش مبتنی بر فرآیند، روش ترکیبی مبتنی بر فرآیند و روش ترکیبی مبتنی بر ورودی خروجی محاسبه کرده که مقادیر بدست آمده با مقادیر ارائه شده در پایگاه ICE یک همبستگی قوی و مثبت را نشان داده‌است.

دال‌های دوطرفه باتوجه به رفتار مناسب در برابر بارهای ثقلی و صلبیت قابل قبول در سازه‌های بلند مرتبه از محبوبیت زیادی در بین مهندسين برخوردار هستند. در این میان دال دوطرفه با تیرهای محیطی به دلیل امکان ساخت در دهانه‌های بلند بیشتر استفاده می‌شود. یائو و گای [۹] با بهینه سازی انرژی محصور به طراحی پایداری در سازه‌های بتن آرمه دست یافتند. در این پژوهش، یک تیر بتن آرمه به طول ۷ متر با تکیه گاه گیردار در هر دوطرف و با مقطع مستطیلی را تحت آیین نامه بتن آمریکا [۱۰] مورد مطالعه قرار دادند. تابع هدف با رویکرد حداقل شدن هزینه و انرژی محصور بهینه شده و مشخص شد که با کاهش یافتن ۱۰٪ انرژی محصور، حدود ۵٪ هزینه اضافه می‌شود. ویت ورت و همکاران [۱۱] انرژی محصور تیر مختلط بتن-فولاد را با استفاده از الگوریتم ژنتیک و بر مبنای آیین نامه طراحی اروپا کمینه کردند. آنها تابع هدف را به پنج مورد شامل بیشترین دهانه، کمترین سطح مقطع تیر، کمترین ضخامت دال، کمترین وزن و کمترین تغییر شکل در نظر گرفتند. در ادامه و برای هر کدام از توابع هدف یک رابطه منحصر به فرد به دست آوردند که از همبستگی جمعی این روابط، حالت بهینه به دست می‌آید.

¹ The Inventory of Carbon and Energy (ICE)



کد اختصاصی:
۲۸۲۲۵-۰۴۲۵۰

اولین همایش ملی
ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۲- روش تحقیق

در پژوهش حاضر، نیروهای داخلی این نوع دال با استفاده از روش ضرایب لنگر خمشی و استفاده از روابط آن در نرم‌افزار اکسل محاسبه شده‌اند. آرماتورهای مورد نیاز دال با توجه به کمینه شدن توابع هدف هزینه و انرژی محصور و برقراری محدودیت‌های آیین‌نامه آبا با استفاده از افزونه Solver نرم‌افزار اکسل ۲۰۱۹ به دست می‌آیند.

۱-۲- توضیح مساله:

در این تحقیق، به عنوان نمونه یک دال مستطیلی دوطرفه با تیر محیطی با شرایط هندسی مشخص شده در جدول شماره ۱ مورد مطالعه قرار گرفته است. L_a و L_b به ترتیب طول کوتاه و طول بلند و h_f ضخامت دال خواهند بود. این دال در چهار طرف دارای پیوستگی و تیر مناسب است. با توجه به ماهیت بهینه‌سازی دال و عدم دخالت طراحی تیرهای تکیه‌گاهی در این پژوهش، ابعاد این تیرها به شکلی در فرآیند بهینه‌سازی توسط نرم‌افزار انتخاب می‌شوند که تیر طبق تعریف آیین‌نامه بتن ایران نسبتاً سخت تلقی شود.

جدول ۱- شرایط هندسی و ابعاد دال

L_a (متر)	L_b (متر)
۴.۹	۷

بارهای وارده به این دال شامل دو دسته بار مرده تکمیلی بدون احتساب وزن دال و بار زنده، مطابق جدول شماره ۲ خواهند بود. وزن دال در طول محاسبات با استفاده از ضخامت دال در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۲- بارهای وارده به دال

بار زنده (کیلوگرم بر مترمربع)	بار مرده (کیلوگرم بر مترمربع)
۵۰۰	۵۵۰

در این تحقیق برای بدست آوردن لنگرهای دال دوطرفه از روش ضرایب لنگر خمشی ارائه شده در آیین‌نامه بتن ایران (آبا) استفاده خواهد شد [۱۲]. این روش تنها برای دال‌های مستطیلی به همراه تیرهای محیطی قابل استفاده می‌باشد. ضرایب لنگر خمشی با توجه به پیوسته بودن دال در هر چهار طرف و نسبت L_a/L_b در جدول شماره ۳ ارائه شده‌است و با استفاده از رابطه شماره ۱ و ۲ لنگرهای دال به دست خواهند آمد.

جدول ۳- ضرایب لنگر خمشی

C_b	C_a	C_{bd}^+	C_{bl}^+	C_{ad}^+	C_{al}^+	L_a/L_b
۰/۰۱۷	۰/۰۷۴	۰/۰۰۷	۰/۰۱۲	۰/۰۳۰	۰/۰۴۹	۰/۷

$$M_a = C_a \times q_u \times L_a^2 \quad (۱)$$

$$M_b = C_b \times q_u \times L_b^2 \quad (۲)$$

q_u بار ضریب‌دار براساس ترکیبات بارگذاری آیین‌نامه بتن ایران بر حسب (kg/m^2) مطابق رابطه شماره ۳ است.

$$q_u = [1.25 (بار مرده تکمیلی + h_f \times 2500)] + [1.5 (بار زنده)] \quad (۳)$$

۲-۲- توابع هدف:

۱-۲-۲- تابع هدف هزینه:



کد اختصاصی:
۲۸۲۲۵-۰۴۲۵۰

اولین همایش ملی
ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



رابطه شماره ۴ به عنوان تابع هدف هزینه در نرم‌افزار تعریف خواهد شد. در این رابطه V_c حجم بتن براساس رابطه شماره ۴ و برحسب مترمکعب، W_s وزن آرماتور برحسب کیلوگرم، C_c قیمت یک مترمکعب بتن براساس مقاومت فشاری و C_s هزینه ۱۰۰ کیلوگرم آرماتور است. با توجه به تغییرات قیمت فولاد و بتن در بازه‌های زمانی مختلف و تاثیر این تغییرات بر نتایج بهینه‌سازی، نسبت قیمت ۱۰۰ کیلوگرم آرماتور را به قیمت یک مترمکعب بتن را به عنوان یک شاخص تغییر به نام R در نظر خواهیم گرفت. پایا و همکاران [۱۳] مقدار R را برای مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال و تنش تسلیم آرماتور ۴۰۰ مگاپاسکال برابر با ۱.۱ برآورد کرده‌اند. صاحب و همکاران [۱۴] این مقدار را برای مقاومت فشاری ۳۵ مگاپاسکال و تنش تسلیم آرماتور ۴۶۰ مگاپاسکال ۰.۹۱ برآورد می‌کنند. این تغییرات به علت عرضه و تقاضا و نوسانات قیمت فولاد و بتن است.

با فرض ثابت بودن قیمت بتن در این نسبت، فرآیند بهینه‌سازی برای نسبت‌های مختلف R انجام شده و تاثیر تغییرات قیمت در نتایج بهینه‌سازی ثبت شده است.

$$T_c = C_c \times V_c + \frac{C_s}{100} \times W_s \quad (۴)$$

$$V_c = L_a \times L_b \times h_f \quad (۵)$$

با توجه به تغییرات قیمت بتن برحسب مقاومت فشاری، جهت محاسبه C_c از رابطه تجربی شماره ۶ استفاده شده است. در این رابطه قیمت بتن با مقاومت فشاری $\frac{kg}{cm^2}$ ۲۰۰ به صورت ثابت برابر ۵،۷۵۰،۰۰۰ ریال به ازای هر مترمکعب بتن در نظر گرفته می‌شود.

$$C_c = ((f'_c - 200) \times 972) + 5.750.000 \quad (۶)$$

برای بارهای جدول شماره ۲ و براساس روابط شماره ۱ و ۲، با استفاده از روابط شماره ۶ تا ۱۰ وزن کل آرماتور مورد نیاز دال به دست می‌آید. در این روابط b عرض واحد دال، d ارتفاع موثر دال (با توجه به پوشش روی آرماتورها) که در این پژوهش ۳ سانتی‌متر در نظر گرفته می‌شود. f_c مقاومت فشاری بتن و f_y تنش تسلیم آرماتور است [۱۲].

$$R_r = \frac{M_a \text{ or } M_b}{b \times d^2} \times 0.00980665 \quad (۷)$$

$$m_\theta = \frac{0.85 \times f_y \times 0.099}{0.85 \times 0.65 \times f'_c \times 0.099} \quad (۸)$$

$$\rho = \frac{1}{m_\theta} \times \left(1 - \sqrt{1 - \frac{2 \times m_\theta \times R_r}{0.85 \times f_y \times 0.099}}\right) \quad (۹)$$

$$A_s = \rho \times 1000 \times d \times 1000 \times 0.01 \quad (۱۰)$$

در رابطه شماره ۹، A_s مقدار آرماتور مورد نیاز برای طول واحد و برحسب $\frac{cm^2}{m}$ می‌باشد.

$$W_s = \left[\sum_{i=1}^4 A_{s_i} \right] \cdot [0.0001 \times 7850 \times L_a \times L_b] \quad (۱۱)$$

۲-۲-۲- تابع هدف انرژی محصور:

انرژی محصور به سه بخش، انرژی محصور مواد و مصالح، انرژی محصور حمل و نقل و انرژی محصور ساخت و ماشین آلات تقسیم می‌شود. تابع هدف انرژی محصور با محاسبه جداگانه این بخش‌ها و جمع جبری آنها بدست می‌آید [۱۵]. طبق نظر اشبی [۱۶] رابطه شماره ۱۲ بین انرژی محصور و انتشار گاز دی اکسید کربن برقرار می‌باشد.

$$\text{انرژی محصور (مگاژول)} = 0.08 \times \text{دی اکسید کربن (کیلوگرم)} \quad (۱۲)$$

با بهره‌گیری از رابطه شماره ۱۳ انرژی محصور مواد و مصالح محاسبه می‌شود. در این رابطه V_i حجم مصالح (مترمکعب)، γ_i چگالی مصالح (کیلوگرم بر مترمکعب)، e_i ضریب انرژی محصور ماده می‌باشد. انرژی محصور بتن و آرماتور با استفاده از روابط شماره ۱۳ تا ۱۶ محاسبه شده‌است.

$$EE_M = \sum_{i=1}^n V_i \times \gamma_i \times e_i \quad (13)$$

$$EE_C = V_C \times \gamma_C \times e_{RC} \quad (14)$$

$$e_{RC} = \frac{W_S}{V_C \times 100} \times 1.04 + e_c \quad (15)$$

$$EE_S = W_S \times 22.3 \quad (16)$$

ضریب انرژی محصور بتن طبق جدول شماره ۴ براساس مقاومت فشاری بتن توسط ICE ارائه شده‌است [۱۷]. به این ضریب به ازای هر ۱۰۰ کیلوگرم آرماتور در حجم بتن، مقدار ۱.۰۴ مطابق رابطه شماره ۱۳ اضافه می‌شود. ضریب انرژی محصور آرماتور طبق جدول ICE برای کشورهای غیر اتحادیه اروپا برابر ۲۲.۳ مگاژول بر کیلوگرم است.

جدول ۴- ضریب انرژی محصور بتن بر حسب مقاومت فشاری

f'_c	e_c
16/20 MPa	0.7
21/24 MPa	0.74
25/29 MPa	0.78
30/34 MPa	0.82
35/39 MPa	0.88
40/50 MPa	1.0

نرخ تخلیه بتن از میکسر بین $\frac{0.25}{\text{min}}$ تا $\frac{0.33}{\text{min}}$ است [۱۸]. با این تفاسیر به صورت میانگین برای تخلیه تراک میکسر ۶ متر مکعبی، حدود ۲۱ دقیقه زمان صرف می‌شود. اگر سرعت متوسط تراک میکسر را $50 \frac{\text{km}}{\text{hr}}$ و زمان انتظار جهت تخلیه بتن را حدود ۹ دقیقه فرض کنیم، با توجه به زمان گیرش بتن، مدت زمان کامل حمل بتن تا ریختن بتن در محل اجرا نباید از ۹۰ دقیقه بیشتر شود، در اینصورت تراک میکسر مسافتی حدود ۵۰ کیلومتر را به طور متوسط تا رسیدن به سایت پروژه طی خواهد کرد. انرژی محصور تراک‌ها و تریلرها برای حمل از محل تولید تا سایت برابر $11/04 \frac{\text{MJ}}{\text{km}}$ و برای برگشت بدون بار برابر $8/42 \frac{\text{MJ}}{\text{km}}$ است [۱۹]. در نتیجه انرژی محصور حمل و نقل بتن برابر ۹۷۳ MJ محاسبه شده‌است. ظرفیت تراک میکسرهای در ایران عموماً حدود ۶ مترمکعب است و در نتیجه وزن بتن بارگیری شده توسط آنها حدود ۱۴۴۰۰ کیلوگرم برآورد می‌شود و مقدار انرژی محصور بتن بر حسب وزن معادل $0/675 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ محاسبه می‌شود. همچنین ظرفیت هر تریلر جهت حمل آرماتور حدود ۲۴۰۰۰ کیلوگرم است. با توجه به اقلیم کشور ایران مسافت هر سفر جهت حمل آرماتور به طور میانگین ۱۰۷ کیلومتر فرض می‌شود. در نتیجه عدد $0/867 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$ برای انرژی محصور حمل و نقل آرماتور با توجه به محاسبات زیر به دست می‌آید.

$$107 \times 11.04 + 107 \times 8.42 = 2082.22 \text{ MJ} \quad \text{و} \quad \frac{2082.22}{24.000} = 0.0867 \frac{\text{MJ}}{\text{kg}}$$

در این صورت انرژی محصور حمل و نقل در دال بتن آرمه براساس رابطه شماره ۱۵ محاسبه می‌شود.

$$EE_{TR} = V_{conc} \times 2400 \times 0.0675 + W_{S_{rebar}} \times 0.0867 \quad (17)$$



کد اختصاصی:
۲۸۲۲۵-۰۴۲۵۰

اولین همایش ملی
ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



انرژی محصور ساخت‌وساز با استفاده از راندمان کاری و قدرت ماشین‌آلات مورد استفاده در فرآیند ساخت محاسبه می‌شود. در جدول شماره ۵ ماشین‌آلات مورد استفاده در ساخت دال بتن‌آرمه به همراه راندمان و قدرت دستگاه ارائه شده است [۵]. زمان متوسط کار ماشین‌آلات ۸ ساعت در روز فرض می‌شود. با استفاده از رابطه شماره ۱۸ و ۱۹ انرژی محصور ساخت دال بتن‌آرمه محاسبه می‌شود.

$$EE_C = \sum \frac{V_i}{W_i} \times 8 \times P \times 3.6 \quad (18)$$

$$EE_C = (V_{conc.} \times 8 \times 3.6 \times \left(\frac{10}{100} + \frac{97}{64} + \frac{2}{56}\right)) + (W_{srebar} \times \frac{8 \times 3.6}{7850} \times \left(\frac{5.5}{16} + \frac{4}{8} + \frac{15}{3}\right)) \quad (19)$$

جدول ۵- راندمان و قدرت ماشین‌آلات

ماشین آلات	m^3/day	حجم کار دستگاه (W)	قدرت (P) kw/hr
میکسر		۱۰۰	۱۰
پمپ بتن		۶۴	۹۷
ویبراتور		۵۶	۲
دستگاه برش		۱۶	۵/۵
دستگاه خم		۸	۴
دستگاه خاموت زن		۳	۱۵

براساس مجموع روابط شماره ۱۴، ۱۵، ۱۶، ۱۷ و ۱۹ تابع هدف انرژی محصور در فرآیند تولید دال بتن‌آرمه مطابق رابطه شماره ۲۰ به دست می‌آید.

$$EE_T = 47.37 \times W_{srebar} + 209.56 \times V_{conc.} + 2400 \times e_{conc.} \times V_{conc.} \quad (20)$$

۲-۳- محدودیت‌های بهینه‌سازی

دال بتن‌آرمه در فرآیند بهینه‌سازی علاوه بر حفظ قابلیت اجرایی بودن باید قادر به تحمل و انتقال بارهای وارده باشد. به همین منظور با تعریف قیود در برنامه، فرآیند الگوریتم را در محدوده جوابهای قابل قبول محدود خواهیم کرد. قیود آیین‌نامه و اجرایی در روابط ۲۱ تا ۲۶ آورده شده‌اند.

$$200 \frac{kg}{cm^2} \leq f'_c \leq 500 \frac{kg}{cm^2} \quad (21)$$

$$2400 \frac{kg}{cm^2} \leq f_y \leq 4000 \frac{kg}{cm^2} \quad (22)$$

$$0.5 \leq \frac{L_a}{L_b} \leq 1 \quad (23)$$

$$\left[(0.1 m), \left(\frac{(L_a + L_b) \times 2}{160} \right) \right] \leq h_f \leq \sqrt{\frac{b_w \times h_w^3}{2 \times L_b}} \quad (24)$$

$$\left(\frac{0.15 \sqrt{f'_c}}{f_y} \right) 100 \times h_f \leq A_s \leq 0.85 \times (1.09 - 0.08 f'_c) \left(\frac{0.65 f'_c}{0.85 f_y} \right) \left(\frac{600}{600 + f_y} \right) 100 \times h_f \quad (25)$$

$$\max \left[\left(\frac{q_u \times L_a \times L_b}{4 \times L_a} \right), \left[\left(\frac{((q_u \times L_a \times L_b) - (2 \times q_u \times \frac{L_a^2}{4})) \times 0.5}{L_b} \right) \right] \right] \leq 0.2 \phi_c \sqrt{f'_c} \times 0.1 \times d \times 10^5 \quad (26)$$



کد اختصاصی:
۲۸۲۲۵-۰۴۲۵۰

اولین همایش ملی
ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



برای کنترل خیز دال از روش غیرمستقیم ارائه شده در آیین‌نامه بتن ایران در این پژوهش استفاده شده است.

$$b_e = \min (b_w + 2 h_b, b_w + 8h_f) \quad (27)$$

$$A = \frac{h_f}{h_w}, \quad B = \frac{b_e}{b_w} - 1 \quad (28)$$

$$I_b = \left[\frac{1 + A \times B \times (4 - 6A + 4A^2 + B \times A^3)}{1 + A \times B} \right] \times \frac{b_w \times h_w^3}{12} \quad (29)$$

$$I_s = \frac{L_b \times h_f^3}{12}, \quad \alpha_i = \frac{I_b \times E_c}{I_s \times E_c}, \quad \alpha_m = \frac{\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4}{4} \quad (30)$$

اگر $\alpha_m \leq 0.2$ باشد، ضخامت دال نباید از مقادیر جدول شماره ۶ کمتر در نظر گرفته می‌شود.

جدول ۶- حداقل ضخامت دال

حداقل ضخامت دال	F_y (Mpa)
$L_a/36$	۳۰۰
$L_a/33$	۴۲۰
$L_a/31$	۵۲۰

اگر $0.2 < \alpha_m \leq 2$ باشد حداقل ضخامت دال از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$h_f \geq \left[L_a \left(0.8 + \frac{f_y}{1670} \right) \right] / \left[36 + 5 \times \frac{L_b}{L_a} (\alpha_m - 0.2) \right] \quad (31)$$

$$h_f \geq 125 \text{ mm} \quad (32)$$

اگر $\alpha_m < 2$ باشد حداقل ضخامت دال از روابط زیر محاسبه می‌شود.

$$h_f \geq \frac{L_a (0.8 + \frac{f_y}{1670})}{36 + 9 \times \frac{L_b}{L_a}} \quad (33)$$

$$h_f \geq 90 \text{ mm} \quad (34)$$

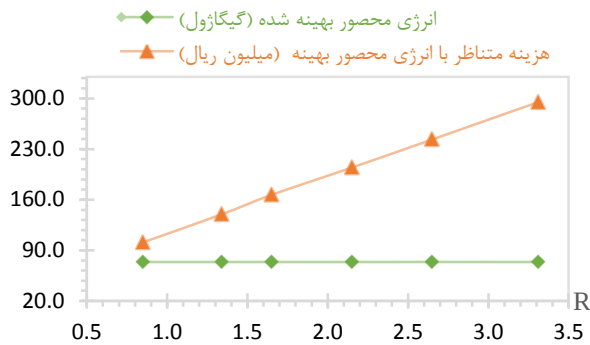
۳- نتایج و بحث

در این پژوهش مقدار R در بازه ۰/۵ تا ۴ فرض می‌شود و برای هر مقدار در این بازه نتیجه بهینه‌سازی گزارش شده است. مطابق شکل شماره ۱ هزینه متناظر با انرژی محصور بهینه با افزایش نسبت R ، که با توجه به ثابت بودن قیمت بتن نشان‌دهنده تغییرات قیمت فولاد است، افزایش یافته است. هزینه بهینه دال نیز با افزایش نسبت R افزایش خواهد یافت. انرژی محصور بهینه دال و انرژی محصور متناظر با هزینه بهینه تابع نسبت R نبوده و نسبت به تغییر قیمت ثابت می‌ماند. این موضوع نشان می‌دهد در کمترین نسبت R ، اختلاف انرژی محصور، کمینه و هزینه کمینه بسیار ناچیز است. به عبارت دیگر هزینه تحمیل شده به دلیل کمینه شدن انرژی محصور در نسبت پایین R ، کمترین مقدار می‌باشد و هرچه قیمت آرماتور نسبت به بتن کمتر باشد، کمینه شدن انرژی محصور دال اقتصادی‌تر است.



کد اختصاصی:
۲۸۲۲۵-۰۴۲۵۰

اولین همایش ملی
ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴

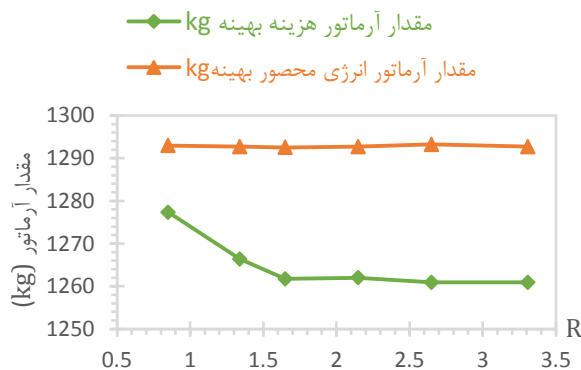


شکل ۱- تغییرات انرژی محصور بهینه و هزینه متناظر آن بر حسب R

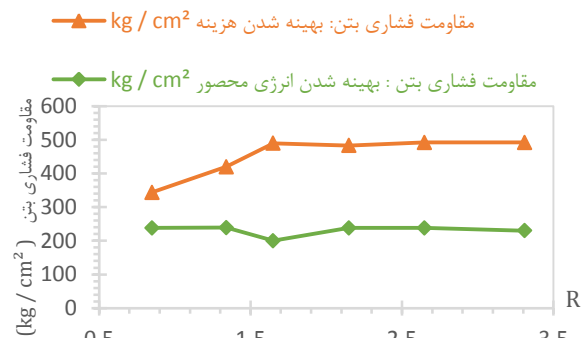


شکل ۲- تغییرات هزینه بهینه و انرژی محصور متناظر آن بر حسب R

در شکل شماره ۳ مقدار آرماتور برای بهینه شدن انرژی محصور تقریباً ثابت است و از مقدار آرماتور برای حداقل شدن هزینه بیشتر است. این موضوع نشان‌دهنده تاثیر کم انرژی محصور آرماتور نسبت به بتن است.

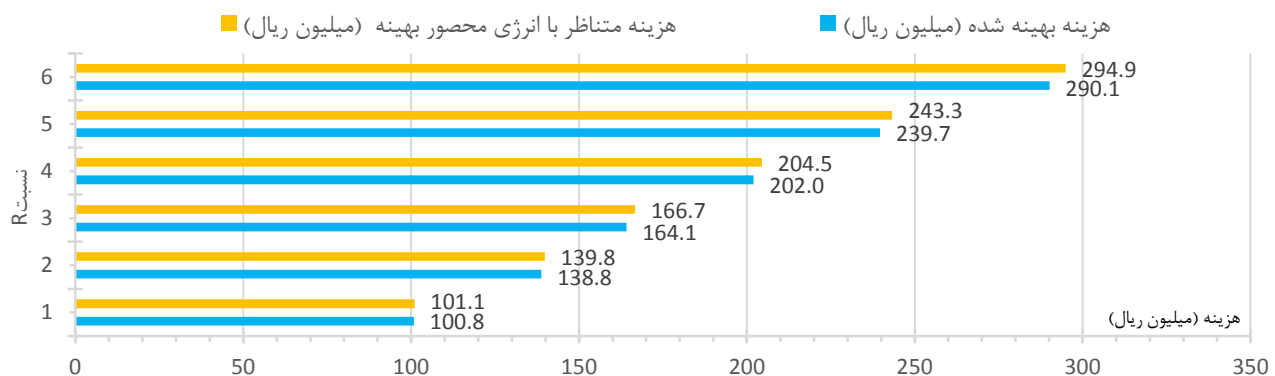


شکل ۳- تغییرات مقدار آرماتور (کیلوگرم) براساس نسبت‌های R



شکل ۴- تغییرات $f'c$ براساس نسبت‌های R

در شکل شماره ۵ در نسبت پایین R اختلاف قیمت ناچیزی بین هزینه بهینه و هزینه متناظر با انرژی محصور بهینه مشاهده می‌شود. در صورتی که این افزایش قیمت در نسبت‌های بالای R حدود دودرصد است. انرژی محصور در کلیه نسبت‌های R حدود چهار درصد کاهش می‌یابد. افزایش هزینه به منظور بهینه‌سازی انرژی محصور با تغییرات نسبت R (افزایش قیمت آرماتور) رابطه مستقیم دارد.



شکل ۵- هزینه بهینه شده و هزینه متناظر با انرژی محصور بهینه شده برای نسبت‌های مختلف R

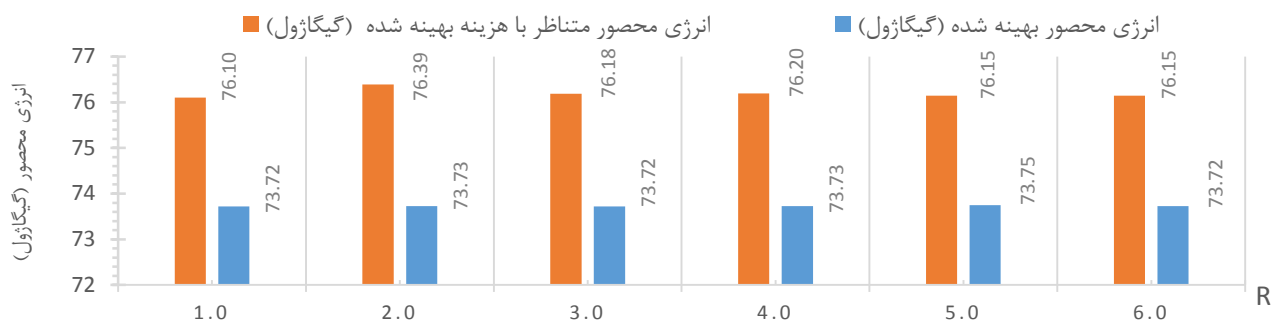


کد اختصاصی:
۲۸۲۲۵-۰۴۲۵۰

اولین همایش ملی
ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴

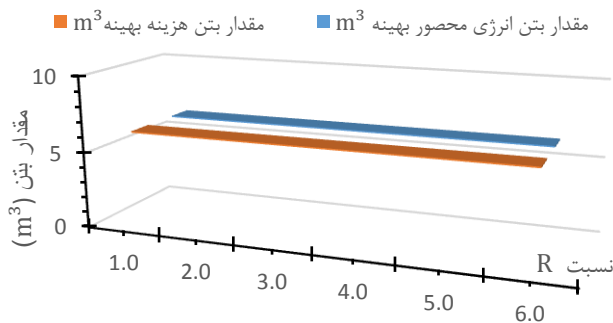


با توجه به شکل شماره ۴ و ۷ مقدار بتن جهت بهینه شدن هزینه و انرژی محصور یکسان خواهد بود و این عدم تغییر به علت تغییر نکردن ضخامت دال در فرآیند بهینه‌سازی هزینه و انرژی محصور است. ضخامت دال بدلیل برقراری محدودیت تغییر شکل دال، عامل موثری در بهینه‌سازی نخواهد بود. مقاومت فشاری بتن بدلیل عدم تغییر در حجم بتن کاهش می‌یابد تا انرژی محصور را به حداقل برساند. با افزایش مقاومت فشاری به دلیل کاهش مقدار آرماتور مصرفی هزینه کمینه می‌شود.

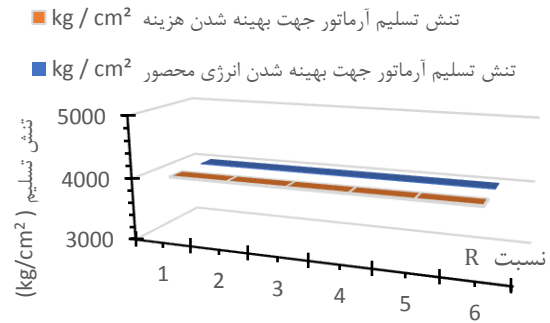


شکل ۶- انرژی محصور بهینه شده و انرژی محصور متناظر با هزینه بهینه شده برای نسبت‌های مختلف R

شکل شماره ۸ نشان می‌دهد تنش تسلیم آرماتور در راستای کاهش مقدار مصرفی آرماتور در هر دو حالت در بیشترین حالت ممکن قرار می‌گیرد.



شکل ۷- تغییرات مقدار بتن (m³) براساس نسبت‌های R



شکل ۸- تنش تسلیم آرماتور جهت حداقل شدن انرژی و هزینه

۴- نتیجه‌گیری

در این تحقیق دال دوطرفه به همراه تیر محیطی به صورت پیوسته در اطراف مورد مطالعه قرار گرفته و از لحاظ میزان انرژی محصور مصرفی و هزینه بهینه‌سازی شده‌است. بر این اساس، نتایج زیر به تفکیک در این پژوهش به دست آمده است.

۱- با افزایش نسبت R، میزان هزینه بهینه افزایش می‌یابد و اختلاف بین هزینه متناظر با انرژی محصور کمینه، و هزینه کمینه شده دال افزایش می‌یابد. در نتیجه به دلیل بالا بودن قیمت آرماتور، بهینه‌سازی انرژی محصور غیر اقتصادی می‌شود.

۲- بهینه‌سازی انرژی محصور دال سبب افزایش هزینه خواهد شد که به ازای کاهش چهار درصدی انرژی محصور، هزینه دو درصد افزایش می‌یابد.

۳- انرژی محصور دال مورد مطالعه پس از بهینه‌سازی، حدود ۲۹۰۰ مگاژول نسبت به انرژی محصور متناظر با هزینه کمینه کاهش می‌یابد. این مقدار معادل ۲۳۲ کیلوگرم گاز دی‌اکسیدکربن و معادل ۶/۷۶ کیلوگرم دی‌اکسیدکربن به ازای هر متر مربع دال است.



کد اختصاصی:
۲۸۲۲۵-۰۴۲۵۰

اولین همایش ملی
ساختمان‌ها و زیرساخت‌های عمرانی تاب‌آور و زیست‌بوم پایدار
دانشگاه آزاد اسلامی واحد نجف آباد
۸ و ۹ بهمن ۱۴۰۴



۴- عوامل موثر در کاهش انرژی محصور شامل کاهش مقاومت فشاری بتن و افزایش تنش تسلیم آرماتور مصرفی می‌باشد.

۵- جهت کمینه شدن انرژی محصور لازم است بتن با مقاومت فشاری پایین استفاده شود. این موضوع به دلیل توازن نیروها در مقطع دال سبب افزایش مقدار آرماتور مصرفی می‌شود.

۵-مراجع

- [1] International-EnergyAgency, *Key world energy statistics*. 2007, International Energy Agency Paris, France. p. 48-70.
- [2] Tracey, S. and B. Anne, *OECD insights sustainable development* 2008, OECD Publishing: Paris, France. p. 76-114.
- [3] Ding, G.K.C., *The development of a multi-criteria approach for the measurement of sustainable performance for built projects and facilities*. 2004.
- [4] González, M.J. and J.G. Navarro, *Assessment of the decrease of CO2 emissions in the construction field through the selection of materials: Practical case study of three houses of low environmental impact*. Building and environment, 2006. **41**(7): p. 902-909.
- [5] Goggins, J., T. Keane, and A. Kelly, *The assessment of embodied energy in typical reinforced concrete building structures in Ireland*. Energy and Buildings, 2010. **42**(5): p. 735-744.
- [6] Crowther, P., *Design for disassembly to recover embodied energy*. Sustaining the Future: Energy Ecology Architecture PLEA'99, 1999: p. 95-100.
- [7] Dixit, M.K., C.H. Culp, and J.L. Fernández-Solís, *System boundary for embodied energy in buildings: A conceptual model for definition*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2013. **21**: p. 153-164.
- [8] Atmaca, A., *Life cycle assessment and cost analysis of residential buildings in south east of Turkey: part 1—review and methodology*. The International Journal of Life Cycle Assessment, 2016. **21**(6): p. 831-846.
- [9] Yeo, D. and R.D. Gabbai, *Sustainable design of reinforced concrete structures through embodied energy optimization*. Energy and buildings, 2011. **43**(8): p. 2028-2033.
- [10] ACI-Committee-318, *Building code requirements for structural concrete: (ACI 318-99); and commentary (ACI 318R-99)*. 1999, American Concrete Institute: Farmington Hills, USA.
- [11] Whitworth, A. and K. Tsavdaridis, *Embodied Energy Optimization of Steel-Concrete Composite Beams using a Genetic Algorithm*. Procedia Manufacturing, 2020. **44**: p. 417-424.
- [12] آیین نامه بتن ایران، راهنمای آیین نامه بتن ایران نشریه شماره ۱۲۶. ۱۳۸۱، انتشارات سازمان مدیریت و برنامه ریزی کشور: ایران
- [13] Paya-Zaforteza, I., et al., *CO2-optimization of reinforced concrete frames by simulated annealing*. Engineering Structures, 2009. **31**(7): p. 1501-1508.
- [14] Sahab, M., A. Ashour, and V. Toropov, *Cost optimisation of reinforced concrete flat slab buildings*. Engineering structures, 2005. **27**(3): p. 313-322.
- [15] Nizam, R.S., C. Zhang, and L. Tian, *A BIM based tool for assessing embodied energy for buildings*. Energy and Buildings, 2018. **170**: p. 1-14.
- [16] Ashby, M.F., *Materials and the environment: eco-informed material choice*; 2009. BH Publication, 2009.
- [17] Hammond, G. and C. Jones, *Inventory of carbon & energy (ICE) version 2.0*. University of Bath, 2011.
- [18] Orłowski, Z., *Simulation of concrete batch plant production* Z. Orłowski. eWork and eBusiness in Architecture, Engineering and Construction, 2002: p. 199.
- [19] Kennedy, E., *Integration of the Measurement of Energy Usage into Road Design*. Final Report. Commission of the European Communities Directorate-General for Energy and Transport. Contract No, 2006. **4**: p. 02-091.