

میزان انتشار دی اکسید کربن در فرایند ساخت و اجرای عرشه های فولاد-FRP در مقایسه با

سیستمهای رایج ساختمانی

حسن طاهر نجار^۱، حامد خضرزاده^{۲*}

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس

* ایمیل نویسنده مسئول: khezrzadeh@modares.ac.ir

تاریخ دریافت: ۹۹/۰۲/۳۱ تاریخ پذیرش: ۹۹/۰۳/۲۵

چکیده

با توجه به اهداف توسعه پایدار و اثرات مخرب تغییر اقلیم، توجه به اثرات زیست محیطی تولید هر محصول بیش از پیش افزایش یافته است. از مهمترین عوامل موثر در مقدار انتشار دی اکسید کربن در صنعت ساختمان وزن ساختمان است. در این پژوهش، تحلیل چرخه عمر (LCA) ساختمانها در مرحله تولید و فرآوری مواد و مصالح انجام شده و اثرات آن مورد بررسی قرار گرفته است. بدین منظور اثرات کاهش وزن ساختمانهای فولادی، ناشی از استفاده از سیستم سقف نوین فولاد-FRP با سایر سیستمهای رایج برای سقف بر میزان انتشار گاز دی اکسید کربن است مقایسه شده است. ساختمانهای فولادی با طبقات، سیستم سازه ای، و سیستم کف متفاوت در نظر گرفته شده اند. برآورد میزان مصالح مصرفی و میزان انتشار دی اکسید کربن در هنگام ساخت این سازه ها بیانگر این امر است که ساختمانهای دارای سقف فولاد-FRP دارای کمترین میزان وزن هستند و میزان انتشار CO₂ آنها نسبت به سایر سقفها در کلیه سیستم های سازه ای به نحو قابل ملاحظه ای کاهش یافته است. علاوه بر این توابع میزان انتشار گاز گلخانه ای در سیستمهای مختلف سازه ای برپایه تحلیلهای صورت گرفته ارایه شده اند که همبستگی بسیار بالایی با نتایج محاسباتی دارند و امکان پیش بینی میزان انتشار را با دقت بالا برای سازه های متفاوت فراهم می سازند.

کلمات کلیدی

"تحلیل چرخه عمر"، "وزن سازه ای"، "عرشه فولاد-FRP"، "انتشار گاز CO₂"، "توابع انتشار"

CO₂ Emission in the Construction Process of Buildings with Steel-FRP Deck System Compared to Common Building Systems

Hasan Taher Najjar¹, Hamed Khezrzadeh^{2,*}

1. MSc student, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Teharn, Iran

*2. Assistant Professor, Faculty of Civil and Environmental Engineering, Tarbiat Modares University, Teharn, Iran

*Email Address: khezrzadeh@modares.ac.ir

Abstract

Regarding the sustainable development goals and devastating consequences of climate change, considering the environmental impacts of products have found everyday increasing importance. One of the major sources of greenhouse gas emission is building industry. In the current research, life cycle assessment (LCA) of buildings has been done at the production and processing stages, and corresponding impacts are estimated. To reach this aim, effect of replacing common decking systems with new decking system of steel-FRP are estimated on the rate of CO₂ emission. Steel frame buildings with 3, 5, 7, and 10 storeys with different structural systems (including intermediate moment frame, special moment frame, special concentrically braced frame, and dual system) and different decking systems (concrete joist, steel joist, and composite steel concrete) are chosen and designed by considering all details. The results demonstrate the significant decrease in the weight of structural components in case of using steel-FRP decking system which will directly correlate with substantial decline in the CO₂ emission. Moreover, precise emission functions are provided for different structural systems which exhibit excellent coefficient of determination with the provided calculation data, and can be implemented to estimate the environmental costs of buildings in terms of CO₂ emission.

Keywords

"Life Cycle Assessment (LCA)", "Structural weight", "Steel-FRP deck", "CO₂ emission", "Emission functions"

۱- مقدمه

بیشتر عرشه های کامپوزیت FRP در سازه های جدید شده است. به علت وزن کم و هزینه های پایین تعمیر و نگهداری، پل های بسیاری با استفاده از عرشه های FRP در دنیا ساخته شده یا در حال ساخت است. وزن پایین این عرشه ها و سرعت بالای ساخت آنها باعث ترجیح آنها به سیستم های رایج عرشه در پروژه های متعدد شده است (Plunkett, 1997, Reising, 2004). محققین اخیرا عرشه ساختمانی جدیدی را با استفاده از ترکیب فولاد و FRP معرفی نموده اند که این عرشه علاوه بر برآورده کردن کلیه الزامات آیین نامه های ساختمانی برای کف های سازه های دارای وزنی بسیار پایین تر در مقایسه با عرشه های متداول در سازه های ساختمانی است (Sadrara, 2019). در این پژوهش در ابتدا سیستم های سازه و کف در نظر گرفته شده برای آنالیز همراه با مشخصات آنها معرفی خواهد شد. سپس نتایج کامل طراحی سازه ها اعم از مشخصات سازه و پی ارایه می شود. پس از آن به بررسی اثرات محیط زیستی ناشی از فرایند ساخت هر کدام از سازه ها پرداخته شده و هزینه های زیست محیطی بر حسب میزان انتشار گازهای گلخانه ای تعیین می شود. در پایان بر پایه نتایج مدلهای سازه های مختلف، توابع درونیابی برای پیش بینی میزان انتشار گاز گلخانه ای CO₂ برای سیستم های سازه ای ارایه شده است.

۲- روش انجام تحقیق

بدون شک یک از مهمترین عوامل در کاهش انتشار دی اکسید کربن ناشی از ساخت ساختمانها کاهش وزن ساختمان است. برای نیل به این هدف سعی بر این است تا حد امکان سطح مقطع اعضای سازه ای به حداقل ممکن کاهش یابند. یکی از راه های رسیدن به شرایط فوق استفاده از عرشه های FRP است. در این پژوهش با بررسی سازه های فولادی دارای سیستم های مختلف باربر جانبی (شامل قاب خمشی متوسط^۱، قاب خمشی ویژه^۲، قاب مهاربندی ویژه^۳ و دو گانه قاب خمشی ویژه و مهاربند ویژه)، سیستم های مختلف کف (شامل سقف تیرچه بتنی و بلوک^۴، سقف تیرچه فلزی^۵، سقف کامپوزیت فولادی با دال بتنی^۶، و سقف فولاد-FRP) و تعداد طبقات مختلف (۳، ۵، ۷ و ۱۰) سعی شده است تا اثر استفاده از عرشه های فولاد-FRP بر روی کاهش وزن و کاهش میزان انتشار CO₂ در حین عملیات ساخت بررسی شود. ابعاد پلان کل ساختمان ها ۲۴ در ۲۵ متر استفاده شده است. ارتفاع همه طبقات ۳/۲ متر و پلان بصورت منظم با ۵ دهانه ۵ متری در هر دو راستا برای سازه ها در نظر گرفته شده است. برای تحلیل نیروهای ناشی از زلزله از روش تحلیل استاتیکی معادل استفاده شده است. بنابراین در مجموع ۶۴ حالت مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. میزان فولاد (سازه ها و پی ها)، بتن مصرفی (سازه ها و پی ها) و دی اکسید کربن منتشر از مواد ساختمانی و حمل و نقل مصالح در حالات مختلف با یکدیگر مقایسه شده است.

امروزه بحث انتشار گازهای گلخانه ای و کاهش آنها یکی از مقوله های مهم و اساسی است. یکی از فعالیت هایی که باعث انتشار قسمت زیادی از این گازها در جو می شود پروژه های ساختمانی است. عملیات ساختمان سازی اثرات مستقیم و غیر مستقیم متعددی روی محیط زیست دارد. صنعت ساخت ساختمان ها، ۴۰ درصد از مصرف اولیه انرژی و ۳۶ درصد از انتشار گاز دی اکسید کربن در کشورهای صنعتی را تشکیل می دهد (Nässén, 2007). بدون شک یک از مهمترین دغدغه ها برای کاهش انتشار دی اکسید کربن در طراحی سازه ها کاهش وزن ساختمان است. برای نیل به این هدف سعی بر این است تا حد امکان سطح مقطع اعضای سازه ای به حداقل ممکن کاهش یابند. امروزه استفاده از مصالح طبیعی و مصالح مصنوعی که نسبت جرم به مقاومت کمتری دارند به عنوان یک راه حل موثر در جهت کاهش وزن ساختمان و نیز کاهش انتشار دی اکسید کربن در صنعت ساخت و ساز و نیز سرعت و سهولت اجرا و ساخت مورد توجه است. نتایج تحقیقات نشان می دهد که میزان کاهش انتشار دی اکسید کربن در خانه های چوبی نسبت به خانه های بتنی تنها ۱۴ درصد است (González, 2006). انتشار گازهای گلخانه ای در ساختمان ها به طور عمده از شش منبع است که به شرح زیر خلاصه می شوند:

۱- ساخت مواد ساختمانی، ۲- حمل و نقل مصالح ساختمانی، ۳- حمل و نقل تجهیزات ساخت، ۴- مصرف انرژی تجهیزات ساختمانی، ۵- حمل و نقل کارگران و ۶- دفع زباله های ساختمانی (Yan, 2010). نتایج نشان می دهند که ۸۲ الی ۸۷ درصد از انتشار گازهای گلخانه ای مربوط به ساخت و ساز، ناشی از تولید مصالح ساختمانی است، ۶ الی ۸ درصد ناشی از (حمل و نقل) مصالح ساختمانی و ۶ الی ۹ درصد ناشی از مصرف انرژی در تجهیزات ساختمانی است. نتایج همچنین نشان می دهد که انتشار گازهای گلخانه ای ناشی از تولید بتن و فولاد ساختمانی حدود ۹۴ تا ۹۵ درصد از تمام مصالح ساختمانی است (Yan, 2010). بتن به عنوان پرکاربردترین ماده ساختمانی به تنهایی عامل انتشار ۴ تا ۵ درصد از کل انتشار دی اکسید کربن در دنیا است و به ازای تولید هر تن سیمان ۶۵۰ تا ۹۲۰ کیلوگرم (بسته به سطح تکنولوژی) دی اکسید کربن تولید می شود (Flower, 2001 Worrell, 2007). علاوه بر آن تولید فولاد بیش از ۲۵ درصد انتشار سهم همه صنایع یعنی حدود ۹ درصد سهم جهان است و شدت انتشار دی اکسید کربن در صنایع فولاد حدود ۱/۲۴۲ تن به ازای هر تن فولاد تولیدی است (Kundak, 2009). تحقیقات بسیاری بر روی کاهش انتشار دی اکسید کربن در صنعت ساخت و ساز توسط محققان مختلف صورت گرفته است. که از آن جمله می توان به (González, 2006) اشاره نمود که در این پژوهش کاهش انتشار گازهای گلخانه ای در زمینه صنعت ساختمان از طریق انتخاب مواد را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که امکان کاهش انتشار CO₂ در مرحله ساخت به میزان ۳۰ درصد از طریق انتخاب دقیق مواد با اثر زیست محیطی پایین امکان پذیر است. در پژوهشی دیگر (Gerilla, 2007) نشان داد که امکان کاهش ۲۳ درصدی انتشار CO₂ با جایگزینی خانه های بتنی با خانه های چوبی وجود دارد. یکی از راه های کاهش وزن در سازه ها استفاده از عرشه های FRP است. در سال های اخیر، نیازهای سازه ای در مهندسی عمران باعث پیشرفت و کاربرد

1. Intermediate Moment Frame (IMF)
2. Special Moment Frame (SMF)
3. Special Concentrically Braced Frame (SCBF)
4. Concrete Joist
5. Steel Joist
6. Steel-Concrete Composite Deck

جدول ۳- مشخصات بتن (C20)

2500 (kg/m ³)	وزن واحد حجم
20.61 (GPa)	مدول الاستیسیته
0.2	ضریب پواسون
20 MPa	مقاومت فشاری

جدول ۴- مشخصات آرماتور رده S400

7850 (kg/m ³)	وزن واحد حجم
200 (GPa)	مدول الاستیسیته
0.3	ضریب پواسون
400 MPa	تنش تسلیم آرماتورها
600 MPa	تنش نهایی آرماتورها

جدول ۵- مشخصات خاک

137 (kPa)	تنش فشاری مجاز خاک q_{all}
16.47 (N/cm ³)	مدول عکس العمل بستر

۳- نتایج

• نتایج تحلیل و طراحی اسکلت و پی سازه‌ها

در جدول‌های زیر نتایج محاسبات وزن مصالح ساختمانی (فولاد، بتن، و FRP) در مترمربع از مساحت ساختمان نشان داده است. مقادیر ارائه شده در جدول‌های ۶ و ۷ شامل طراحی دقیق و با کلیه جزئیات سازه هستند که در آنها وزن اجزای سازه‌ای زیر لحاظ شده است:

- ۱- وزن اعضای اصلی سازه‌ها شامل (تیرها، ستون‌ها، تیرهای لانه زنبوری فرعی در سقف کامپوزیت فولاد-بتن و مهاربندها)
- ۲- وزن اجزای اتصالات فلنجی تیر به ستون شامل (ورق انتهایی، سخت‌کننده، ورق مضاعف و ورق پیوستگی)
- ۳- وزن اجزای اتصالات در سیستم قاب مهاربندی شامل (گاست‌پلیت، وزن اتصالات مفصلی تیر به ستون)
- ۴- وزن اجزای اتصالات در سیستم دوگانه شامل (اتصالات در سیستم قاب مهاربندی و اتصالات فلنجی تیر به ستون)
- ۵- وزن کف‌ستونها شامل (کف‌ستون، سخت‌کننده و بولت)
- ۶- وزن آرماتور سقف شامل (آرماتور کششی، بالایی، تقویتی، عرضی، حرارتی و اودکا)

۷- وزن آرماتورهای پی در سیستم قاب خمشی متوسط و ویژه شامل (آرماتورهای طولی، آرماتورهای عرضی، خرکها، آرماتور برش یک طرفه و آرماتور تقویتی)

۸- وزن آرماتورهای پی در سیستم قاب مهاربندی و ویژه شامل (آرماتورهای طولی، آرماتورهای عرضی، خرک، آرماتورهای برش یک طرفه، آرماتورهای تقویتی، آرماتورهای طولی و عرضی شمع) وزن کلیه اجزای بتنی شامل (سقفها، کفسازی با ملات ماسه سیمان، پی‌ها و شمعها)

جدول ۱- وزن اجزای عرشه (Sadrara, 2019)

وزن (kg)	اجزای عرشه
14.78	پروفیل‌های بالایی و پایینی
19.37	ورق‌های بالایی و پایینی
6.31	بخش Ω شکل هسته
2.21	اجزای قائم مرکب
2.01	ورق‌های تکیه‌گاهی
44.71	جمع

سقف فولاد-FRP در نظر گرفته شده در این پژوهش، نوعی سقف سازه‌ای است که به صورت ترکیبی از تیرهای فولادی و عرشه فولاد-FRP است. در این نوع سقف لنگرهای خمشی و برشی را تیرهای فلزی در ترکیب با FRP تحمل می‌کنند. وزن عرشه فولاد-FRP و مشخصات عرشه از نتایج پژوهش (Sadrara, 2019) تعیین گردید. در پژوهش بر اساس آیین نامه آشتو روند طراحی و تحلیل یک عرشه ی جدید ساختمانی را ارائه می‌کند. با توجه به مواد و مصالح به کار رفته در ساخت عرشه وزن یک متر مربع از عرشه طبق جدول ۱ قابل محاسبه است. در پژوهش حاضر وزن یک مترمربع عرشه فولاد-FRP در جهت اطمینان برابر با ۶۰ کیلوگرم در نظر گرفته است.

• طراحی اسکلت و پی سازه‌ها

در این پژوهش طراحی سازه‌ها به روش (LRFD) و با استفاده از آیین نامه AISC 360-05 (AISC, 2010) و مباحث نهم و دهم مقررات ملی ساختمان، انجام شده است. تحلیل و طراحی سازه‌ها و پی‌ها نیز با استفاده از نرم افزار ETABS-2016 و نرم افزار SAFE 2016 صورت گرفته است. فولاد استفاده شده از نوع St37 است که مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است. از روش تحلیل استاتیکی معادل برای بارگذاری لرزه‌ای سازه‌های فولادی استفاده شده است. شتاب مینای طرح ($A=0.35$) لحاظ شده و ساختمان‌های مورد مطالعه واقع در شهر تهران بر خاک نوع III قرار دارند. ساختمان‌ها دارای کاربری مسکونی هستند و براساس نوع کاربری و میزان آسیب ناشی از خرابی آنها در گروه ساختمان‌های با اهمیت متوسط قرار می‌گیرند. محل احداث این ساختمان‌ها در منطقه‌ای با خطر لرزه‌خیزی بسیار زیاد است بنابراین براساس استاندارد ۲۸۰۰ داریم:

$$S_0=1.1, S=1.75, T_S=0.7, \quad (1)$$

$$T_0=0.15, A=0.35, I=1$$

مشخصات مصالح مصرفی پی‌ها با استفاده از بتن C20 به شرح جدول ۳ است. همچنین آرماتورها از نوع آرماتور S400 به شرح جدول ۴ انتخاب شده اند. مشخصات خاک به کار رفته در طراحی پی‌ها در جدول ۵ نشان داده شده است.

جدول ۲- مشخصات فولاد (St37)

7850 (kg/m ³)	وزن واحد حجم
200 (GPa)	مدول الاستیسیته
0.3	ضریب پواسون
240 (MPa)	تنش تسلیم F_y
370 (MPa)	تنش گسیختگی F_u

جدول ۶- وزن بر واحد مساحت فولاد در سیستمهای متفاوت (kg/m²)-(C: Composite, Cc: Concrete, Jo: Joist, St: Steel)

No. of Stories	3 Story				5 Story				7 Story				10 Story			
Struc. Sys.	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF
Cc Jo	78.0	84.6	68.2	72.2	84.6	88.0	75.7	89.5	93.4	98.7	89.9	102.9	98.2	102.9	100.2	114.2
St Jo	77.2	82.0	69.2	72.9	82.8	85.9	73.9	89.6	90.0	97.1	89.5	102.6	96.0	100.9	98.0	113.2
St-Cc-C	71.6	73.1	64.2	66.8	78.8	79.5	71.1	79.3	85.7	90.4	80.5	96.1	90.5	92.6	94.2	108.6
St-FRP	45.1	50.5	43.7	50.8	49.7	51.0	48.9	57.2	55.9	58.8	58.0	63.7	64.6	71.1	66.3	73.2

جدول ۷- وزن بر واحد مساحت بتن در سیستمهای متفاوت (Tonnes/m²)

No. of Stories	3 Story				5 Story				7 Story				10 Story			
Struc. Sys.	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF
Cc Jo	.432	.432	.490	.453	.465	.482	.500	.511	.473	.473	.509	.520	.479	.470	.505	.484
St Jo	.387	.387	.447	.426	.437	.437	.449	.483	.445	.445	.482	.492	.451	.443	.471	.456
St-Cc-C	.415	.415	.471	.453	.465	.465	.478	.511	.472	.472	.509	.519	.470	.470	.487	.473
St-FRP	.177	.177	.201	.225	.184	.184	.216	.212	.198	.198	.221	.212	.236	.236	.276	.216

جدول ۸- فاکتورهای انتشار CO₂ (Andrew, 2003)

Specific element	CO ₂ emission factor (kg CO ₂ /kg)
بتن	0.159
فولاد	1.242
Glass FRP	0.77

• محاسبه مقدار دی اکسیدکربن منتشر شده از فرایند ساخت و حمل و نقل

روش محاسبه انتشار گازهای گلخانه‌ای در ساخت و ساز ساختمانی در مرجع (Yan, 2010) مورد بررسی قرار گرفته است. منابع انتشار گازهای گلخانه‌ای از ساختمانها به طور عمده به شش منبع تقسیم می‌شوند. در این پژوهش گازهای منتشر شده از دو مرحله زیر محاسبه می‌شوند:

۱- گاز دی‌اکسیدکربن تولید شده در فرایند تولید مصالح

۲- گاز دی‌اکسیدکربن تولید شده ناشی از حمل و نقل مصالح ساختمانی برای محاسبه انتشار گازهای دی‌اکسیدکربن منتشر شده از تولید مصالح ساختمانی (فولاد+بتن+FRP) از رابطه زیر استفاده شده است:

$$E_i = \sum_{j=1}^n M_j^i \times f_j^i \quad (2)$$

که در رابطه فوق :

E_i : کل انتشار دی‌اکسیدکربن از تولید مصالح ساختمانی (kgCO₂-e) (۱)

M_j^i : وزن مصالح (kg)

f_j^i : فاکتور انتشار دی‌اکسیدکربن مصالح ساختمانی.

در این پژوهش برای مقدار فاکتورهای انتشار دی اکسیدکربن (فولاد، بتن و FRP) از فاکتورهای CO₂ مصالح ساختمانی نیوزلند استفاده می‌شود (Andrew, 2003). و برای محاسبه انتشار گازهای دی‌اکسیدکربن منتشر شده از حمل و نقل مصالح ساختمانی (فولاد+بتن+FRP) از کارخانه‌ها تا سایت از رابطه زیر استفاده شده است.

$$E_{ii} = \sum_{j=1}^n \left(\frac{M_j^{ii}}{1000} \right) \times (T_j^i \times f_j^{ii}) \quad (3)$$

که در این رابطه:

E_{ii} : مقدار گاز دی‌اکسیدکربن ناشی از احتراق سوخت وسایل حمل و نقل مواد ساختمانی (kg CO₂-e) (۱)

M_j^{ii} : وزن مصالح ساختمانی (kg)

T_j^i : فاصله بین کارخانه مواد ساختمانی و سایت مورد مطالعه (km).

در این پژوهش فاصله بین کارخانه و سایت مورد مطالعه ۶۰ کیلومتر فرض می‌شود.

f_j^{ii} : فاکتور انتشار دی‌اکسیدکربن برای حمل و نقل (kgCO₂-e/ton km)

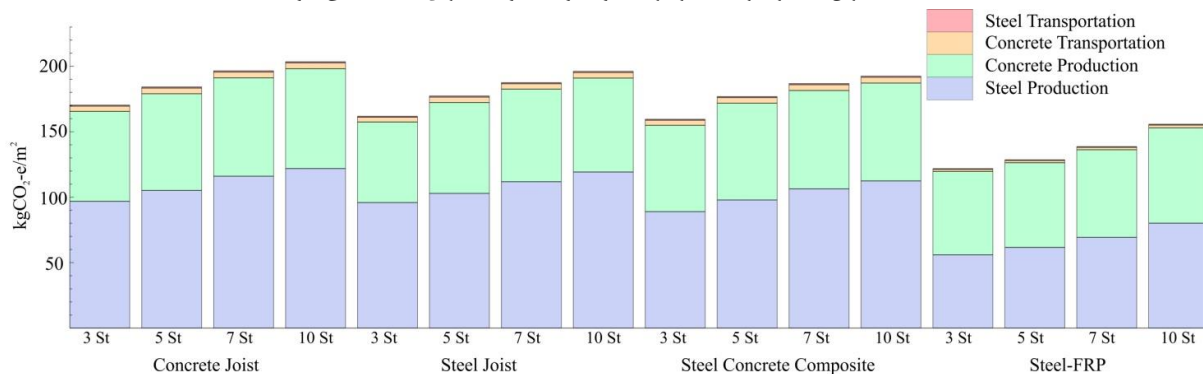
در این پژوهش فاکتور انتشار دی‌اکسیدکربن توسط حمل و نقل مصالح فولادی از پژوهش (Yan, 2010) و برابر $f=0.1563$ (kgCO₂-e/ton km) در نظر گرفته شده است. در نمودارهای ۱ الی ۴ میزان انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ در هر یک از سیستمهای سازه‌ای به تفکیک منبع انتشار نشان داده شده است. با بررسی اطلاعات ارایه شده در این اشکال مشخص می‌شود که عمده‌ترین منابع انتشار گاز CO₂ تولید فولاد و بتن هستند و جایگزینی عرشه فولاد-FRP به طرز قابل

ملاحظه‌ای در کاهش میزان انتشار تاثیر دارد. مقادیر میزان کل انتشار در جدول ۹ آورده شده است. بصورت اجمالی نتایج حاصل از محاسبات به شرح زیر هستند:

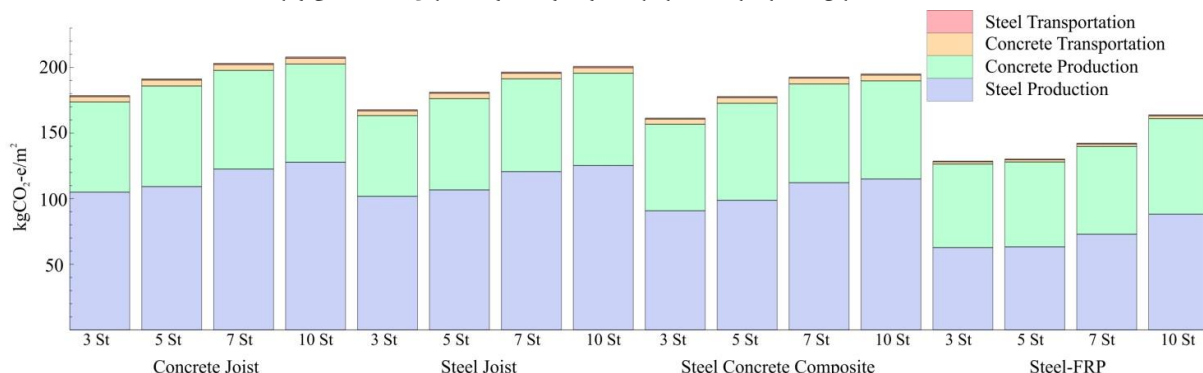
- ۱- در ساختمان ۳ طبقه میزان کاهش انتشار CO_2 در سقف‌های کرومیت، کامپوزیت با دال بتنی و سقف کامپوزیت با عرشه فولاد- FRP نسبت به سقف تیرچه و بلوک در صورت استفاده از سیستم قاب خمشی متوسط، به ترتیب ۵، ۶/۳ و ۲۸/۵ درصد، در صورت استفاده از قاب مهاربندی همگرا ویژه ۳/۶، ۴/۹ و ۲۶ درصد، در صورت استفاده از قاب خمشی ویژه ۶ و ۹/۶ و ۲۸ درصد و در صورت استفاده از قاب خمشی دوگانه به ترتیب ۲/۴، ۴/۱ و ۱۷/۷ درصد است.
- ۲- در ساختمان ۵ طبقه میزان کاهش انتشار CO_2 در سقف‌های کرومیت، کامپوزیت با دال بتنی و سقف کامپوزیت با عرشه فولاد- FRP نسبت به سقف تیرچه و بلوک در صورت استفاده از سیستم قاب خمشی متوسط، به ترتیب ۳/۸، ۴ و ۳۰/۲ درصد، در صورت استفاده از قاب مهاربندی همگرا ویژه ۶ و ۵/۳ و ۲۵/۷ درصد، در صورت استفاده از قاب خمشی ویژه ۵/۳ و ۷ و ۳۲ درصد و در صورت استفاده از قاب خمشی دوگانه به ترتیب ۲/۳، ۶/۵ و ۲۸ درصد است.
- ۳- در ساختمان ۷ طبقه میزان کاهش انتشار CO_2 در سقف‌های کرومیت، کامپوزیت با دال بتنی و سقف کامپوزیت با عرشه فولاد- FRP نسبت به سقف تیرچه و بلوک در صورت استفاده از سیستم قاب خمشی متوسط، به ترتیب ۴/۶، ۵ و ۲۹/۵ درصد، در صورت استفاده از قاب مهاربندی همگرا ویژه ۲/۶، ۶ و ۲۶/۹ درصد، در صورت استفاده از قاب خمشی ویژه ۳/۳، ۵/۲ و ۳۰ درصد و در صورت استفاده از قاب خمشی دوگانه به ترتیب ۲/۳، ۴ و ۳۰/۴ درصد است.

- ۴- در ساختمان ۱۰ طبقه میزان کاهش انتشار CO_2 در سقف‌های کرومیت، کامپوزیت با دال بتنی و سقف کامپوزیت با عرشه فولاد- FRP نسبت به سقف تیرچه و بلوک در صورت استفاده از سیستم قاب خمشی متوسط، به ترتیب ۳/۶، ۵/۴ و ۲۳/۵ درصد، در صورت استفاده از قاب مهاربندی همگرا ویژه ۴، ۵ و ۲۱/۷ درصد، در صورت استفاده از قاب خمشی ویژه ۳/۵، ۶/۲ و ۲۱/۲ درصد و در صورت استفاده از قاب خمشی دوگانه به ترتیب ۲/۷، ۳/۹ و ۲۲/۷ درصد است.
- ۵- میزان کاهش انتشار CO_2 در سقف کامپوزیت با عرشه فولاد- FRP نسبت به سقف معمولی تیرچه و بلوک در کلیه سیستم‌های سازه‌ای در حدود ۲۶ درصد است.
- ۶- انتخاب سیستم سازه‌ای مناسب در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در ساختمان‌های فولادی موثر است. با استفاده از عرشه فولاد- FRP، میزان کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن در سیستم‌های قاب خمشی ویژه، مهاربندی همگرای ویژه و قاب خمشی متوسط نسبت به سیستم دوگانه در ساختمان‌های با تعداد طبقات ۱۰ به ترتیب ۵/۵، ۵ و ۱۰/۲ درصد است.
- ۷- تعداد طبقات ساختمان در کاهش انتشار دی‌اکسیدکربن موثر است. میزان کاهش انتشار CO_2 در ساختمان با تعداد طبقات ۳، ۵ و ۷ نسبت به ساختمان تعداد طبقات ۱۰ در کلیه سیستم‌های سازه‌ای و در صورت استفاده از سقف با عرشه فولاد- FRP حدود ۲۱، ۱۸ و ۱۱ درصد است.

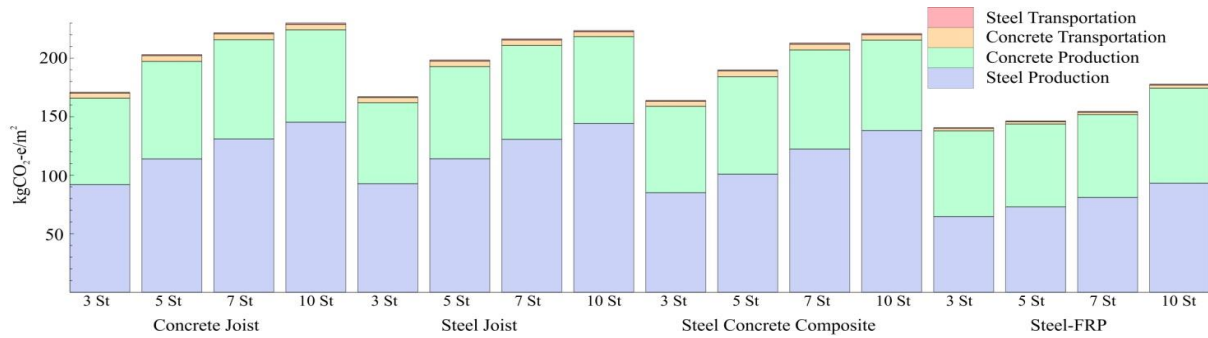
شکل ۱- میزان انتشار گاز CO_2 در فرایند تولید و حمل و نقل برای قاب خمشی متوسط



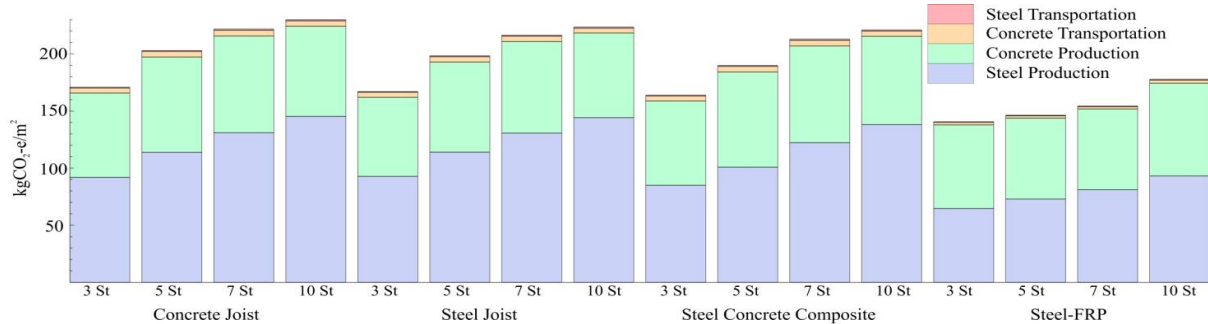
شکل ۲- میزان انتشار گاز CO_2 در فرایند تولید و حمل و نقل برای قاب خمشی ویژه



شکل ۳- میزان انتشار گاز CO₂ در فرایند تولید و حمل و نقل برای قاب با بادبند همگرای ویژه



شکل ۴- میزان انتشار گاز CO₂ در فرایند تولید و حمل و نقل برای قاب دوگانه بادبند همگرای ویژه+قاب خمشی ویژه



جدول ۹- میزان کل انتشار گاز CO₂ برای سیستمهای متفاوت سازه‌ای (kgCO₂-e/m²)

No. of Stories	3 Story				5 Story				7 Story				10 Story			
Struc. Sys.	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF	IMF	SMF	SCBF	SMF + SCBF
Cc Jo	170.3	178.5	167.9	166.6	184.2	191.4	178.9	198.0	196.5	203.1	198.3	216.3	203.5	207.9	210.3	224.3
St Jo	161.8	167.7	161.9	162.7	177.3	181.1	168.2	193.5	187.5	196.4	193.1	211.2	196.1	200.7	201.9	218.4
St-Cc-C	159.5	161.3	159.8	159.8	176.9	177.8	169.4	185.2	186.8	192.6	186.4	207.7	192.4	195.0	199.9	215.6
St-FRP	121.8	128.6	124.2	137.1	128.5	130.2	132.8	142.7	138.6	142.2	145.0	150.6	155.7	163.8	164.7	173.4

ارایه شده است که مقادیر نزدیک به یک بیانگر تطابق بسیار بالای مدل

پیشنهادی با نتایج محاسبات است.

جدول ۱۰- ثابتهای درون یابی در میزان انتشار CO₂ در سیستمهای سازه‌ای متفاوت

Structural Sys.	α_{sys}	β_{sys}	R ²
IMFCc Jo	1	0	0.9937
IMF St Jo	0.9581	0	0.9968
IMF St-Cc-C	0.9486	0	0.9878
SMFCc Jo	1.0344	0	0.9644
SMF St Jo	0.9888	0	0.9728
SMF St-Cc-C	0.9635	0	0.9585
SCBF Cc Jo	0.9018	0.0401	0.9661
SCBF St Jo	0.8702	0.0383	0.9463
SCBF St-Cc-C	0.8513	0.0384	0.9490
Dual Cc Jo	0.8707	0.0794	0.9575
Dual St Jo	0.8556	0.0751	0.9534
Dual St-Cc-C	0.8098	0.0841	0.9682

برای پیش بینی میزان انتشار به ازای هر متر مربع سازه‌های داری کف نوین فولاد-FRP تابع زیر پیشنهاد شده است:

$$E_{Tot} = (\xi_{sys} \times \sqrt[5]{S} + \eta_{sys}) \quad (5)$$

• توابع میزان انتشار گاز CO₂

بر پایه نتایج ارایه شده در جدول ۹، توابع درونیابی وابسته به میزان طبقات برحسب نوع سیستم کف و سیستم سازه‌ای به فرم زیر ارایه شده است تا با استفاده از این توابع اثرات زیست محیطی سیستمهای مختلف قابل پیش‌بینی باشند. تابع درونیابی در نظر گرفته شده برای میزان کل انتشار CO₂ در سیستمهای متعارف کف (Cc Jo, St Jo, St-Cc-C) و برای سیستمهای سازه (IMF, SMF, SCBF, SCBF+SMF) بصورت زیر تعریف شده است:

$$E_{Tot} = (\alpha_{sys} + \beta_{sys} \times \sqrt{S}) \times (159.41 \times \sqrt[5]{S} - 2.87 \times S - 20.04) \quad (4)$$

که در رابطه فوق S بیانگر تعداد طبقات سازه و مقادیر پارامترهای α_{sys} و β_{sys} ضریب R² برای سیستمهای سازه ای مختلف در جدول ۱۰ ارایه شده‌اند. در جهت تعیین میزان دقت تابع ارایه شده برای میزان انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ ضریب تشخیص^۱ نیز در جدول ۱۰

1. Coefficient of Determination

در نتیجه میزان انتشار گازهای گلخانه‌ای ناشی از فرایند ساخت و حمل و نقل دارد. در ساختمان‌های فولادی با توجه به اینکه ۵۰ - ۶۰ درصد وزن هر طبقه به وزن کف اختصاص دارد، استفاده از سقف‌های سبک منجر به کاهش جرم ساختمان و کاهش انتشار دی‌اکسید کربن می‌شود. نتایج این تحقیق بیانگر این امر هستند که استفاده از سیستم عرشه فولاد-FRP به نحو قابل ملاحظه‌ای باعث کاهش در میزان انتشار گاز گلخانه‌ای CO₂ شده و با جایگزینی سیستم‌های متداول با این سیستم نوین می‌توان به اهداف توسعه پایدار در صنعت ساختمان که شامل کاهش اثرات مخرب این صنعت بر محیط‌زیست در مرحله ساخت می‌باشد دست یافت. علاوه بر این تطابق مناسب توابع انتشار ارایه شده در این پژوهش برای سیستم‌های سازه‌ای متفاوت موید کاربردی بودن آنها در ارزیابی‌های زیست محیطی فرایند تولید ساختمانها است.

که در رابطه فوق S بیانگر تعداد طبقات سازه و مقادیر پارامترهای ξ_{sys} و η_{sys} و ضریب R^2 برای سیستم‌های سازه ای مختلف در جدول ۱۱ ارایه شده‌اند.

جدول ۱۱- ثابتهای درون یابی در میزان انتشار CO₂ در سیستم‌های سازه‌ای متفاوت با عرشه فولاد-FRP

Structural Sys.	ξ_{sys}	η_{sys}	R^2
IMF	0.3706	119.196	0.9963
SMF	0.4056	122.642	0.9843
SCBF	0.4406	121.516	0.9934
Dual	0.4006	132.621	0.9948

۴- نتیجه‌گیری

با توجه به بررسی‌های صورت گرفته در این پژوهش انتخاب نوع کف در سازه‌های مختلف تاثیر بسیار زیادی در وزن کلی سیستم سازه و

منابع

- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، نشریه شماره ۱۵۱، راهنمای طراحی و اجرای سقف تیرچه‌های فولادی با جان باز در ترکیب با بتن، ۱۳۸۱.
- معاونت برنامه ریزی و نظارت راهبردی رییس جمهور، نشریه شماره ۵۴۳، دستورالعمل طراحی و اجرای سقف‌های تیرچه و بلوک، ۱۳۹۰.
- وزارت مسکن و شهرسازی، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، استاندارد ۲۸۰۰ ایران، آیین‌نامه طراحی ساختمان‌ها در برابر زلزله، ویرایش چهارم، ۱۳۹۳.
- وزارت مسکن و شهرسازی، مبحث نهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های بتن آرمه، نشر توسعه ایران، ۱۳۹۲.
- وزارت مسکن و شهرسازی، مبحث دهم مقررات ملی ساختمان، طرح و اجرای ساختمان‌های فولادی، نشر توسعه ایران، ۱۳۹۲.
- AISC, 2010. Specification for Structural Steel Buildings, ANSI/AISC 360, AISC.
- Andrew, A. 2003. Embodied energy and CO₂ coefficients for New Zealand building materials, Report series: center for building performance research report.
- Flower, D. J. & Sanjayan, J. G., 2007. Green house gas emissions due to concrete manufacture. The International Journal of Life Cycle Assessment, 12(5), p. 282.
- Gerilla, G. P., Teknomo, K. & Hokao, K. 2007. An environment assessment of wood and steel reinforced concrete housing construction. Building an Environment, Vol. 42(7), P. 2778-84.
- González, M. J. & Navarro G. J. 2006. 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, Vol. 41(7), P. 902-9.
- Kundak, M., Lazić, L. & Črnko, J. 2009. CO₂ emission in the steel industry. Metalurgija, Vol. 48(3), P. 193-197.
- Nässén, J., Holmberg, J., Wadeskog, A. & Nyman, M., 2007. Direct and indirect energy use and carbon emissions in the production phase of buildings: an input-output analysis. Energy, Vol. 32(9), P. 1593-602.
- Plunkett, J. D., 1997. Fiber-reinforced polymer honeycomb short span bridge for rapid installation, No. NCHRP-IDEA Project 030.
- Reising, R. M. et al., 2004. Performance comparison of four fiber-reinforced polymer deck panels. Journal of Composites for Construction, Vol. 8(3), P. 265-74.
- Sadrara, A., Khezrzadeh, H. & Mofid, M., 2019. A new approach for the analysis and design of hybrid Steel-FRP building decks. In: Proceedings of CIVIL-COMP 2019, Riva del Garda, Italy.
- Sutherland, L. S. et al., 2016. Quasi-static indentation response of pedestrian bridge multicellular pultruded GFRP deck panels. Construction and Building Materials, 15(118), pp. 307-18.
- Worrell, E. et al., 2001. Carbon dioxide emissions from the global cement industry. Annual Review of Energy and the Environment, Vol. 26(1), P. 303-329.
- Yan, H., Shen, Q., Fan, L. C. & Zhang, L., 2010. Greenhouse gas emissions in building construction: A case study of One Peking in Hong Kong. Building and Environment, Vol. 45(4), P. 949-55.