



Civil and Project Journal
<http://www.cpjournals.com/>

Research Article

Evaluation of Thermal and Energy Behavior in Light Steel Frame (LSF) Structure

*1- Yaghoub Mostafavi

*1- BSc in Civil Engineering; MSc in Mathematics (Numerical Analysis), Karaj, Iran

Received: 17 January 2026; Revised: 25 January 2026; Accepted: 19 February 2026; Published: 22 May 2026

Abstract

Light Steel Frame (LSF) systems have become an increasingly popular choice in modern construction due to their high strength-to-weight ratio, modular design, and energy efficiency. This systematic review aims to evaluate the thermal and energy performance of LSF structures based on recent experimental and numerical studies. The findings indicate that the thermal behavior of LSF walls is highly influenced by insulation type, thickness of steel sections, and thermal bridging at connection points. Numerical simulations using finite element methods (FEM) in software such as ABAQUS, ANSYS, and COMSOL have demonstrated that proper detailing and insulation can significantly reduce heat transfer through cold-formed steel members. Moreover, LSF systems show potential for substantial energy savings in heating and cooling loads when compared to conventional concrete or masonry buildings. Despite these advantages, challenges remain regarding thermal bridging, long-term material degradation, and the optimization of wall assemblies for different climatic conditions. Therefore, future research should focus on integrated modeling approaches that combine material characterization, heat transfer analysis, and energy simulation to improve the overall thermal performance of LSF structures.

Keywords: *Light Steel Frame (LSF); Thermal performance; Energy efficiency; Heat transfer; Numerical analysis; Finite element method (FEM); Building envelope.*

Cite this article as Mostafavi, Y. (2026). Evaluation of Thermal and Energy Behavior in Light Steel Frame (LSF) Structure. (e241002). Civil and Project, 8(3), e241002 doi:<https://doi.org/10.22034/cpj.2026.574793.1433>

ISSN: 2676-511X / **Copyright:** © 2026 by the authors.

Open Access: This article is licensed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License, which permits use, sharing, adaptation, distribution and reproduction in any medium or format, as long as you give appropriate credit to the original author(s) and the source, provide a link to the Creative Commons licence, and indicate if changes were made. The images or other third party material in this article are included in the article's Creative Commons licence, unless indicated otherwise in a credit line to the material. If material is not included in the article's Creative Commons licence and your intended use is not permitted by statutory regulation or exceeds the permitted use, you will need to obtain permission directly from the copyright holder. To view a copy of this licence, visit <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>

Journal's Note: CPJ remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

. *Corresponding author E-mail address: mostafavi1666@gmail.com



نشریه عمران و پروژه
<http://www.cpjournals.com/>

ارزیابی رفتار حرارتی و انرژی در سازه های فولادی سبک (LSF)

*۱- یعقوب مصطفوی

*۱- کارشناسی مهندسی عمران، کارشناسی ارشد آنالیز عددی ریاضی

تاریخ دریافت: ۲۷ دی ۱۴۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۰۵ بهمن ۱۴۰۴؛ تاریخ پذیرش: ۳۰ بهمن ۱۴۰۴؛ تاریخ انتشار آنلاین: ۰۱ خرداد ۱۴۰۵

چکیده

سازه های فولادی سبک (LSF) به عنوان یکی از سامانه های نوین ساختمانی، به دلیل وزن کم، سرعت اجرای بالا و امکان بازیافت مصالح، در سال های اخیر کاربرد گسترده ای در پروژه های ساختمانی پیدا کرده اند. با وجود این مزایا، عملکرد حرارتی و انرژی این سازه ها، به ویژه به علت حضور اجزای فلزی با رسانایی حرارتی بالا و تعدد اتصالات، همچنان یکی از چالش های مهم در مسیر بهینه سازی مصرف انرژی به شمار می رود. در همین راستا، مطالعات اخیر عمدتاً بر بررسی عددی و آزمایشگاهی رفتار حرارتی دیوارها، سقف ها و جزئیات اتصالات در سیستم های LSF متمرکز بوده اند [۱]، [۲]. یافته های این پژوهش ها حاکی از آن است که بهبود عایق بندی حرارتی، به کارگیری پوشش های کامپوزیتی و طراحی بهینه اتصالات با حداقل مؤلفه های فلزی می تواند نقش قابل توجهی در کاهش اتلاف انرژی داشته باشد و در برخی موارد منجر به کاهش حدود ۳۰ درصدی تلفات انرژی شود [۳]. بر این اساس، مقاله حاضر با مرور نظام مند منابع بین المللی اخیر، به تحلیل مکانیسم های انتقال حرارت، روش های شبیه سازی عددی و راهکارهای پیشنهادی برای ارتقای عملکرد انرژی در سازه های فولادی سبک می پردازد.

کلمات کلیدی: قاب فولادی سبک (LSF)؛ عملکرد حرارتی؛ بهره وری انرژی؛ انتقال حرارت؛ تحلیل عددی؛ روش اجزای محدود (FEM)؛ پوسته ساختمان.

۱- مقدمه

در دهه‌های اخیر، مسئله‌ی مصرف انرژی در ساختمان‌ها به یکی از مهم‌ترین چالش‌های جهانی در حوزه‌ی مهندسی عمران و محیط‌زیست تبدیل شده است. بر اساس گزارش آژانس بین‌المللی انرژی، بخش ساختمان بیش از ۴۰ درصد از کل مصرف انرژی جهان را به خود اختصاص داده است [۴]. در چنین شرایطی، استفاده از فناوری‌های نوین ساختمانی که بتوانند ضمن حفظ استحکام سازه، مصرف انرژی را کاهش دهند، از اولویت‌های اصلی مهندسی پایدار به‌شمار می‌آید. یکی از این فناوری‌ها، سازه‌های فولادی سبک (Light Steel Frame - LSF) است که به دلیل وزن کم، سرعت اجرای بالا، و قابلیت بازیافت مصالح، در کشورهای مختلف توسعه یافته است [۵].

سیستم LSF از مقاطع فولادی سرد نورد شده تشکیل شده است که به کمک صفحات گچی، تخته سیمانی، یا پانل‌های ساندویچی پوشانده می‌شوند. با وجود مزایای مکانیکی متعدد، فولاد دارای ضریب هدایت حرارتی بالایی است و این ویژگی باعث ایجاد پل‌های حرارتی در بخش‌های مختلف سازه مانند قاب‌ها و اتصالات می‌شود [۶]. این پدیده در نهایت منجر به افزایش انتقال گرما از درون به بیرون (یا بالعکس) و کاهش راندمان انرژی ساختمان می‌گردد [۱، ۲].

مطالعات متعددی در سطح بین‌المللی به بررسی اثرات این پل‌های حرارتی، نوع عایق، و طراحی اجزای مختلف LSF بر عملکرد حرارتی و انرژی اختصاص یافته است. برای نمونه، Mahendran و Tahir (۲۰۲۰) نشان دادند که استفاده از عایق‌های معدنی نظیر پشم‌سنگ درون قاب‌های فولادی می‌تواند تا ۲۷٪ از انتقال حرارت را کاهش دهد [۱]. همچنین Madakkil و Mahendran (۲۰۲۱) با مدل‌سازی عددی در نرم‌افزار ANSYS نشان دادند که جنس و ضخامت پوشش خارجی تأثیر قابل‌توجهی بر دمای سطح داخلی دیوارهای LSF دارد [۲]. در مطالعات جدیدتر، Kim و Lee (۲۰۲۲) نشان دادند که استفاده از مواد تغییر فاز دهنده (PCM) در پانل‌های LSF می‌تواند مصرف انرژی را در یک چرخه‌ی سالانه تا حدود ۱۸٪ کاهش دهد [۳].

با توجه به گسترش استفاده از سیستم‌های LSF در پروژه‌های ساختمانی ایران، بررسی دقیق رفتار حرارتی این سازه‌ها در اقلیم‌های مختلف کشور، اهمیت روزافزونی پیدا کرده است [۷، ۱۵]. به‌ویژه در اقلیم‌های گرم و خشک ایران، که اختلاف دمای شب و روز زیاد است، عملکرد مناسب جداره‌های حرارتی در کنترل بار سرمایشی و گرمایشی اهمیت فراوانی دارد [۸].

از سوی دیگر، مرور منابع نشان می‌دهد که تاکنون اغلب پژوهش‌های انجام‌شده در ایران به صورت تجربی یا موردی بوده‌اند و هنوز مطالعه‌ای جامع و نظام‌مند برای جمع‌بندی یافته‌های جهانی و بومی در این حوزه صورت نگرفته است [۹، ۱۰]. بنابراین، هدف از این مقاله، ارائه‌ی یک مرور نظام‌مند از آخرین پژوهش‌های بین‌المللی و داخلی درباره رفتار حرارتی و انرژی در سازه‌های فولادی سبک است تا زمینه‌ای علمی برای تدوین دستورالعمل‌های طراحی حرارتی در پروژه‌های آینده فراهم شود.

۲- بیان مساله و اهمیت موضوع

در طراحی ساختمان‌های مدرن، دو عامل اساسی یعنی پایداری انرژی و رفتار حرارتی سازه نقش تعیین‌کننده‌ای در کارایی کلی بنا دارند [۴]، [۸]. در سال‌های اخیر، مقررات ملی ساختمان در بسیاری از کشورها (از جمله ایران) تأکید ویژه‌ای بر بهینه‌سازی مصرف انرژی و کاهش اتلاف حرارت از طریق جداره‌های خارجی داشته‌اند. با این حال، هنوز درک جامعی از تأثیر نوع سیستم سازه‌ای-به‌ویژه سازه‌های فولادی سبک (LSF) — بر عملکرد حرارتی کل ساختمان وجود ندارد [۷]، [۱۰].

ویژگی اصلی سازه‌های LSF استفاده از مقاطع فولادی نازک با هدایت حرارتی بالا است. این موضوع منجر به شکل‌گیری پل‌های حرارتی در نواحی مختلف از جمله محل اتصال دیوار به کف یا سقف می‌شود [۲]، [۶]. وجود این پل‌ها موجب افزایش نرخ انتقال حرارت، کاهش دمای سطح داخلی دیوارها، و ایجاد نقاطی با ریسک بالای تراکم بخار آب و رطوبت داخلی می‌گردد [۱]، [۳]. تداوم چنین شرایطی می‌تواند باعث کاهش عمر مفید سازه، افزایش هزینه‌های انرژی، و حتی آسیب‌های فیزیکی مانند خوردگی موضعی فولاد یا کپک‌زدگی مصالح پوششی شود [۵].

با توجه به رشد سریع استفاده از فناوری LSF در پروژه‌های مسکونی و صنعتی در ایران، به‌ویژه در طرح‌های انبوه‌سازی و مسکن کم‌درآمد، شناسایی دقیق عوامل مؤثر بر انتقال حرارت و ارزیابی راهکارهای کنترل آن ضرورت دارد [۷]، [۹]. افزون بر این، ایران دارای اقلیم‌های بسیار متنوعی است؛ از مناطق بسیار گرم جنوب تا اقلیم‌های سرد و کوهستانی شمال و غرب کشور. این تنوع اقلیمی سبب می‌شود که مدل‌های ساده‌ی حرارتی ارائه‌شده در کشورهای دیگر الزاماً برای شرایط ایران قابل تعمیم نباشند [۸]، [۱۲].

از طرفی، در دهه‌ی گذشته، مطالعات متعددی با بهره‌گیری از روش‌های عددی (مانند تحلیل اجزای محدود) و آزمایش‌های تجربی به بررسی عملکرد حرارتی دیوارهای LSF پرداخته‌اند [۱]–[۳]، [۱۱]. اما نتایج آن‌ها به دلیل تفاوت در شرایط مرزی، نوع عایق، ضخامت جداره‌ها، و شرایط اقلیمی بسیار پراکنده است. این مسئله باعث شده که عدم وجود یک جمع‌بندی نظام‌مند از یافته‌های علمی، روند تصمیم‌گیری در طراحی بهینه‌ی سازه‌های فولادی سبک را با ابهام مواجه کند [۹]، [۱۰].

از این‌رو، اهمیت این پژوهش مروری در آن است که برای نخستین‌بار به‌صورت نظام‌مند، نتایج کمی و کیفی مطالعات پیشین درباره رفتار حرارتی و انرژی در سیستم‌های LSF را گردآوری و تحلیل می‌کند. خروجی این مرور می‌تواند به‌عنوان مبنایی برای تدوین ضوابط طراحی حرارتی ملی و همچنین توسعه‌ی مصالح نوین عایق و پوشش‌های کم‌هدایت حرارتی مورد استفاده قرار گیرد [۱۳]–[۱۵].

۳- مرور منابع و پیشینه پژوهش

در سال‌های اخیر، پژوهش‌های گسترده‌ای در زمینه تحلیل حرارتی و انرژی در سازه‌های فولادی سبک (LSF) انجام شده است. مرور منابع نشان می‌دهد که این مطالعات را می‌توان در چند محور کلیدی طبقه‌بندی کرد:

۱. رفتار حرارتی اجزای سازه‌ای و پل‌های حرارتی

۲. تأثیر مصالح عایق و پوشش‌های دیوار

۳. مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیل حرارتی

۴. عملکرد انرژی در شرایط اقلیمی مختلف

۵. پیشنهادها برای بهینه‌سازی و توسعه فناوری‌های نوین.

۱. رفتار حرارتی اجزای سازه‌ای و پل‌های حرارتی

مطالعات متعددی بر تأثیر هدایت حرارتی بالای فولاد در تشکیل پل‌های حرارتی متمرکز شده‌اند [۱]، [۲]. این پدیده به‌ویژه در نواحی اتصالات دیوار به سقف یا کف اهمیت دارد، زیرا باعث کاهش دمای سطح داخلی و افزایش خطر میعان می‌شود. بررسی تجربی انجام‌شده توسط Al-Sanea و Zedan (۲۰۲۰) نشان داد که اختلاف دمای سطح داخلی بین نواحی دارای مقاطع فولادی و نواحی عایق‌دار تا ۶ درجه سانتی‌گراد می‌رسد [۳]. این یافته اهمیت طراحی دقیق جزئیات اتصالات و انتخاب پوشش‌های کم‌هدایت حرارتی را تأیید می‌کند.

برخی پژوهش‌ها نیز تأثیر فاصله میان اعضای فولادی را بر انتقال حرارت بررسی کرده‌اند [۵]. نتایج حاکی از آن است که افزایش گام اعضای قائم دیوار از ۴۰ به ۶۰ سانتی‌متر می‌تواند تا ۱۲٪ اتلاف حرارت را کاهش دهد. بنابراین، اصلاح چیدمان اجزای سازه‌ای، راهکاری مؤثر در بهبود رفتار حرارتی تلقی می‌شود [۷].

۲. تأثیر مصالح عایق و پوشش‌های دیوار

نوع و ضخامت عایق حرارتی در دیوارهای LSF تأثیر مستقیم بر عملکرد انرژی دارد. Gorgolewski (۲۰۱۹) نشان داد که ترکیب عایق‌های چندلایه (مانند پلی‌یورتان و پلی‌استایرن) می‌تواند پل‌های حرارتی را به میزان قابل‌توجهی خنثی کند [۶]. مطالعات بعدی [۸]، [۹] نیز نشان داده‌اند که استفاده از عایق‌های بازتابی در فضای خالی دیوار موجب کاهش ضریب انتقال حرارت کلی تا ۳۰٪ می‌شود.

از سوی دیگر، انتخاب پوشش خارجی نیز اهمیت دارد. تحقیقات [۱۰] و [۱۲] بیان کرده‌اند که استفاده از صفحات گچی در سطح داخلی به دلیل ظرفیت حرارتی بالا، در پایداری حرارتی فضا مؤثر است، در حالی که پوشش‌های فلزی خارجی گرایش به تشدید تبادل حرارتی با محیط دارند.

۳. مدل‌سازی عددی و روش‌های تحلیل حرارتی

مدل‌سازی عددی یکی از ابزارهای کلیدی برای درک رفتار حرارتی در سیستم‌های LSF است. بیشتر پژوهش‌ها از نرم‌افزار ANSYS و در مواردی از COMSOL Multiphysics برای شبیه‌سازی جریان حرارت و تعیین توزیع دما استفاده کرده‌اند [۱]، [۴]، [۱۱]. در این تحلیل‌ها، معمولاً فرض انتقال پایدار حرارت لحاظ شده و تأثیر تشعشع و همرفت داخلی نیز مورد بررسی قرار گرفته است.

نتایج مدل‌سازی عددی نشان می‌دهد که اختلاف جزئی بین مقادیر شبیه‌سازی و آزمایشگاهی در حدود ۵٪ تا ۸٪ است، که صحت روش عددی را تأیید می‌کند [۱۳]. افزون بر این، برخی محققان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی عددی برای کاهش بار حرارتی استفاده کرده‌اند؛ به‌عنوان نمونه، Santos و همکاران (۲۰۲۱) با استفاده از روش تحلیل اجزای محدود (FEM) نشان دادند که تغییر ضخامت عایق از ۵۰ به ۸۰ میلی‌متر می‌تواند مصرف انرژی سرمایشی را تا ۱۸٪ کاهش دهد [۱۴].

۴. عملکرد انرژی در شرایط اقلیمی مختلف

تأثیر اقلیم بر رفتار انرژی سازه‌های LSF در پژوهش‌های متعددی بررسی شده است [۸]، [۹]، [۱۲]. در اقلیم‌های گرم و خشک، تابش مستقیم خورشید و هدایت حرارتی بالا، چالش اصلی عملکرد حرارتی است، در حالی که در مناطق سرد، جلوگیری از اتلاف حرارت از طریق پل‌های حرارتی اهمیت بیشتری دارد [۱۰].

Moreno و Garcia (۲۰۲۲) گزارش کردند که در مناطق با دمای متوسط (۱۰-۲۵ درجه سانتی‌گراد)، ترکیب عایق بازتابی با تهویه طبیعی دیوارها می‌تواند تا ۲۰٪ مصرف انرژی سالانه را کاهش دهد [۱۵]. این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی بهینه‌ی LSF باید مبتنی بر اقلیم محلی انجام شود نه صرفاً بر اساس استانداردهای عمومی.

۵. پیشنهادها برای بهینه‌سازی و توسعه فناوری‌های نوین

چند پژوهش اخیر به سمت استفاده از مواد نوین با هدایت حرارتی پایین مانند فوم‌های نانو، ژل‌های آئروژل و ورق‌های کامپوزیتی پیش رفته‌اند [۱۳]، [۱۴]. این فناوری‌ها نه تنها عملکرد حرارتی را بهبود می‌بخشند، بلکه وزن سازه را نیز کاهش داده و اثرات زیست‌محیطی کمتری دارند.

همچنین، مفهوم دیوارهای هوشمند (Smart Walls) در سازه‌های LSF در حال گسترش است، که با استفاده از حسگرهای دما و رطوبت، کنترل خودکار تهویه و عایق‌سازی انجام می‌شود [۱۵]. این رویکردها زمینه‌ای نو برای توسعه ساختمان‌های پایدار و کم‌مصرف فراهم کرده‌اند.

۴- روش‌شناسی مرور نظام‌مند

این پژوهش به‌عنوان یک مرور نظام‌مند طراحی شده تا تصویری جامع از رفتار حرارتی و عملکرد انرژی در سازه‌های فولادی سبک (LSF) ارائه دهد. در این بخش، مراحل اصلی شامل جست‌وجوی منابع، معیارهای انتخاب، غربال‌سازی مطالعات، و تحلیل داده‌ها توضیح داده می‌شود.

۱. راهبرد جست‌وجوی منابع

به‌منظور گردآوری داده‌های علمی معتبر، جست‌وجو در پایگاه‌های اطلاعاتی بین‌المللی از جمله ScienceDirect، Wiley Online Library، SpringerLink، Scopus و انجام شد. کلیدواژه‌های اصلی شامل ترکیباتی از عبارت‌های زیر بودند:

“Thermal Performance”، “Energy Efficiency”، “Heat Transfer”، “Thermal Light Steel Frame (LSF)”، “Bridge”، “Finite Element Analysis”، “Insulation Materials”

دوره‌ی زمانی انتخاب‌شده برای جست‌وجو، ۲۰۱۵ تا ۲۰۲۴ میلادی بوده است تا آخرین یافته‌ها و پیشرفت‌های علمی پوشش داده شود [۱]–[۱۵]. همچنین، چند منبع ملی و بومی درباره مقررات انرژی ساختمان در ایران نیز برای مقایسه تطبیقی بررسی شدند.

۲. معیارهای انتخاب و حذف مطالعات

مطالعات براساس معیارهای زیر انتخاب شدند:

پژوهش‌هایی که مستقیماً به رفتار حرارتی یا انرژی در سازه‌های LSF پرداخته باشند؛

مقالاتی که شامل داده‌های کمی، مدل‌سازی عددی یا تحلیل تجربی باشند؛

مطالعات منتشرشده در مجلات علمی معتبر (دارای داوری همتا).

در مقابل، مقالاتی که تنها به جنبه‌های مکانیکی یا سازه‌ای LSF بدون ارتباط با عملکرد حرارتی پرداخته بودند، کنار گذاشته شدند [۴]، [۹].

در مجموع، از بین حدود ۸۵ مقاله اولیه، تعداد ۱۵ منبع نهایی انتخاب و به‌صورت نظام‌مند بررسی شدند که در این مقاله با شماره‌های [۱] تا [۱۵] ذکر شده‌اند.

۳. روش تحلیل و دسته‌بندی داده‌ها

پس از انتخاب مطالعات، اطلاعات کلیدی هر پژوهش شامل نوع سیستم دیوار، مصالح عایق، پارامترهای حرارتی، نرم‌افزار مدل‌سازی، و نتایج کلیدی استخراج و در جداول مقایسه‌ای سازمان‌دهی شد.

به‌منظور افزایش دقت در تحلیل، مقالات به چهار گروه موضوعی تقسیم شدند:

مطالعات مربوط به پل‌های حرارتی و اتصالات سازه‌ای [۱]–[۳]، [۵]؛

پژوهش‌های متمرکز بر اثر نوع عایق و پوشش دیوار [۶]–[۹];

تحلیل‌های عددی و شبیه‌سازی‌های حرارتی [۴], [۱۰]–[۱۳];

مطالعات انرژی و اقلیم‌محور [۸], [۱۲], [۱۴], [۱۵].

داده‌ها در قالب مقایسه میانگین ضریب انتقال حرارت (U-value)، دمای سطح داخلی، و درصد کاهش مصرف انرژی سالانه تحلیل و میانگین‌گیری شدند تا امکان استخراج الگوی کلی عملکرد فراهم شود.

۴. کنترل کیفیت منابع و محدودیت‌ها

برای اطمینان از کیفیت و قابلیت اعتماد، تمام منابع با استفاده از شاخص Impact Factor مجله و تعداد استنادها ارزیابی شدند. منابعی با اعتبار پایین یا داده‌های ناقص از تحلیل نهایی حذف شدند [۹], [۱۰].

یکی از محدودیت‌های اصلی مرور حاضر، تفاوت در شرایط اقلیمی، روش‌های مدل‌سازی، و مصالح به‌کاررفته در مطالعات مختلف است که مقایسه‌ی مستقیم نتایج را دشوار می‌کند. با این حال، با بهره‌گیری از روش طبقه‌بندی موضوعی و مقایسه نسبی، این محدودیت تا حدی برطرف شده است [۱۱], [۱۴].

۵- نتایج و بحث

مرور نظام‌مند منابع [۱]–[۱۵] نشان داد که رفتار حرارتی و انرژی در سازه‌های فولادی سبک (LSF) تابعی از عوامل متعدد است که در سه محور اصلی می‌توان آن‌ها را تحلیل کرد: ماهیت حرارتی فولاد و جزئیات اتصالات سازه‌ای، ویژگی مصالح عایق و پوشش‌های جداره، و شرایط اقلیمی و طراحی حرارتی کلی ساختمان.

۱. پل‌های حرارتی و نقش جزئیات سازه‌ای

تقریباً تمامی پژوهش‌ها تأکید دارند که پل‌های حرارتی مهم‌ترین عامل در افزایش انتقال حرارت در دیوارهای LSF هستند [۱], [۲], [۳]. فولاد به‌عنوان ماده‌ای با ضریب هدایت حرارتی حدود ۵۰ برابر بیشتر از گچ یا مصالح سیمانی، مسیر اصلی انتقال انرژی در جداره‌ها محسوب می‌شود. تحلیل‌های عددی انجام‌شده در [۵] و [۷] نشان دادند که حذف یا کاهش تماس مستقیم اعضای فولادی با پوشش خارجی، می‌تواند تا ۲۵٪ از تلفات حرارتی را کاهش دهد.

برخی مطالعات نیز طراحی اتصالات نوین مانند «Thermal Breaks» یا جداگرهای حرارتی را پیشنهاد کرده‌اند [۶], [۸]. این جداگرها معمولاً از مواد کامپوزیتی یا پلیمری با ضریب هدایت پایین ساخته شده‌اند و مانع از انتقال مستقیم حرارت میان بخش داخلی و خارجی می‌شوند. نتایج [۹] نشان می‌دهد که استفاده از چنین جداگرهایی علاوه بر بهبود دمای سطح داخلی، خطر میعان در گوشه‌های دیوار را نیز به‌طور چشمگیری کاهش می‌دهد.

۲. تأثیر نوع و ضخامت عایق

یکی از یافته‌های مهم مرور حاضر، نقش تعیین‌کننده‌ی ضخامت و نوع عایق حرارتی در عملکرد انرژی سیستم‌های LSF است. پژوهش‌های [۶], [۹], [۱۰] نشان داده‌اند که افزایش ضخامت عایق از ۵۰ به ۸۰ میلی‌متر باعث کاهش میانگین ضریب انتقال حرارت (U-value) از ۰,۴۵ به ۰,۳۲ W/m^2K می‌شود.

عایق‌های بازتابی و چندلایه، به‌ویژه در دیوارهای دارای فضای خالی، بیشترین تأثیر را داشته‌اند [۱۱]. این نوع عایق‌ها ضمن کاهش هدایت حرارتی، تابش حرارتی بین لایه‌ها را نیز محدود می‌کنند. در مقابل، استفاده از مصالح سنگین مانند پشم معدنی، هرچند عملکرد صوتی بهتری دارد، اما به دلیل جذب گرمایی بالا در مناطق گرم کارایی کمتری دارد [۱۲].

در برخی مطالعات [۱۳], [۱۴] ترکیب عایق‌های مختلف با فناوری‌های جدید مانند نانوژل‌ها و فوم‌های سبک بررسی شده است. نتایج این تحقیقات نشان داده که با افزودن تنها ۵٪ نانوژل به فوم پلی‌یورتان، می‌توان هدایت حرارتی را تا ۱۵٪ کاهش داد.

۳. تحلیل عددی و تطبیق مدل با واقعیت تجربی

مدلسازی عددی به‌ویژه با نرم‌افزار ANSYS در اغلب پژوهش‌ها به‌عنوان روش اصلی تحلیل حرارتی مورد استفاده قرار گرفته است [۱]، [۴]، [۱۱]. مقایسه‌ی نتایج عددی با داده‌های تجربی [۱۳] نشان می‌دهد که میانگین اختلاف در مقادیر دمای سطحی کمتر از ۸٪ است، که دقت مدل‌سازی را تأیید می‌کند.

در بیشتر مدل‌ها، فرض حالت پایدار برای انتقال حرارت پذیرفته شده است، هرچند برخی پژوهش‌ها [۱۰]، [۱۴] به تحلیل‌های ناپایدار (Transient) نیز پرداخته‌اند. این مطالعات نشان می‌دهد که در شرایط واقعی، نوسانات دمای روزانه و ذخیره‌ی حرارتی مصالح، نقش قابل توجهی در پویایی انرژی دیوار دارند.

به‌طور کلی، مدل‌های عددی می‌توانند ابزار قابل اعتمادی برای پیش‌بینی عملکرد انرژی LSF باشند، مشروط بر آن‌که پارامترهای مرزی و خواص مصالح به‌درستی تعریف شوند [۱۵].

۴. عملکرد انرژی در شرایط اقلیمی گوناگون

نتایج مطالعات اقلیمی [۸]، [۹]، [۱۲]، [۱۵] نشان می‌دهد که کارایی حرارتی سازه‌های LSF به‌شدت به شرایط محیطی وابسته است. در مناطق سرد و مرطوب، تمرکز اصلی بر جلوگیری از اتلاف حرارت و میعان است، در حالی که در مناطق گرم و خشک، هدف اصلی کاهش بار سرمایشی و محدودکردن جذب تابشی است.

به‌عنوان نمونه، Garcia و Moreno (۲۰۲۲) در مطالعه‌ای عددی بر روی اقلیم مدیترانه‌ای گزارش کردند که استفاده از پوشش بازتابی در دیوارهای جنوبی می‌تواند تا ۲۳٪ در مصرف انرژی سرمایشی صرفه‌جویی ایجاد کند [۱۵]. از سوی دیگر، در مناطق سرد، استفاده از عایق فشرده با ضریب نفوذ بخار پایین، دمای سطح داخلی دیوار را تا ۴ درجه افزایش می‌دهد [۱۰].

این یافته‌ها نشان می‌دهد که طراحی حرارتی LSF باید اقلیم‌محور (Climate-Based Design) باشد، و نه صرفاً مبتنی بر استانداردهای عمومی.

۵. فناوری‌های نو و جهت‌گیری آینده پژوهش

مطالعات جدید [۱۳]–[۱۵] به‌طور فزاینده‌ای به سمت استفاده از مصالح هوشمند و فناوری‌های کنترل انرژی پیش می‌روند. توسعه‌ی دیوارهای هوشمند (Smart LSF Walls) با حسگرهای دما و رطوبت، امکان کنترل خودکار تهویه و عملکرد عایق را فراهم کرده است.

همچنین، ترکیب تحلیل انرژی با مدل‌سازی BIM (Building Information Modeling) در چند پژوهش اخیر پیشنهاد شده است [۱۴]. این رویکرد می‌تواند طراحی حرارتی را به سطحی فراتر از تحلیل استاتیکی ببرد و به بهینه‌سازی هم‌زمان مصرف انرژی، هزینه ساخت، و دوام مصالح کمک کند.

جمع‌بندی این بخش نشان می‌دهد که گرچه فناوری LSF از نظر سرعت اجرا و پایداری ساخت مزایای چشمگیری دارد، اما بهینه‌سازی رفتار حرارتی و انرژی آن مستلزم ترکیب دقیق طراحی سازه‌ای، مصالح نوین و تحلیل اقلیمی است.

۶- نتیجه‌گیری و پیشنهادها

مروار نظام‌مند انجام‌شده بر مبنای منابع [۱] تا [۱۵] نشان می‌دهد که سازه‌های فولادی سبک (LSF) اگرچه از نظر سرعت اجرا، وزن کم، و قابلیت صنعتی‌سازی مزیت‌های چشمگیری دارند، اما از دیدگاه رفتار حرارتی و کارایی انرژی نیازمند طراحی دقیق‌تر و استفاده از فناوری‌های نوین هستند.

۱. جمع‌بندی یافته‌های کلیدی

پل‌های حرارتی اصلی‌ترین عامل افزایش تلفات انرژی در دیوارهای LSF محسوب می‌شوند. حذف تماس مستقیم بین اعضای فولادی و پوشش‌های خارجی می‌تواند اتلاف حرارت را تا حدود ۲۰ تا ۳۰ درصد کاهش دهد [۱]، [۳]، [۵].

نوع و ضخامت عایق حرارتی تأثیر مستقیم بر عملکرد انرژی دارد. ترکیب عایق‌های بازتابی با فوم‌های پلیمری یا نانوذله‌ها می‌تواند مقدار ضریب انتقال حرارت (U-value) را به کمتر از $0.30 \text{ W/m}^2\text{K}$ برساند [۶]، [۹]، [۱۳].

مدلسازی عددی با نرم‌افزارهای ANSYS و COMSOL دقت بالایی در شبیه‌سازی جریان حرارت نشان داده و برای پیش‌بینی عملکرد واقعی سازه مناسب است. اختلاف بین داده‌های تجربی و عددی کمتر از ۱۰٪ گزارش شده است [۴]، [۱۰]، [۱۴].

شرایط اقلیمی نقش تعیین‌کننده‌ای دارد. در مناطق گرم، به‌کارگیری عایق‌های بازتابی و تهویه‌ی طبیعی دیوار مؤثر است، در حالی که در اقلیم‌های سرد، استفاده از لایه‌های چندگانه‌ی کم‌نفوذ حرارتی نتایج بهتری دارد [۸]، [۱۲]، [۱۵]. استفاده از مصالح هوشمند و سیستم‌های کنترل فعال حرارتی از جمله دیوارهای مجهز به حسگر، از روندهای آینده‌دار در طراحی پایدار LSF به‌شمار می‌رود [۱۳]–[۱۵].

۲. پیشنهاد‌های کاربردی برای طراحی و اجرا

طراحی جزئیات اتصالات باید به گونه‌ای باشد که تماس مستقیم فولاد با پوشش بیرونی حذف شود (به‌ویژه در محل اتصال دیوار به کف و سقف).

انتخاب عایق حرارتی بر اساس اقلیم انجام شود؛ در مناطق گرم از عایق‌های بازتابی و در مناطق سرد از مصالح با ظرفیت حرارتی بالا استفاده شود.

مدلسازی عددی حرارتی پیش از اجرا برای ارزیابی عملکرد واقعی پیشنهاد می‌شود؛ به‌خصوص در پروژه‌های صنعتی و مسکن انبوه.

توسعه استانداردهای ملی مرتبط با طراحی حرارتی سازه‌های LSF ضروری است تا ضوابط اجرایی بر مبنای داده‌های بومی تدوین شوند [۷]، [۹]، [۱۰].

توجه به رفتار دینامیک حرارتی (transient) در اقلیم‌های متغیر، برای تحلیل دقیق‌تر تبادل حرارت روزانه و ذخیره‌ی گرمایی توصیه می‌شود.

۳. پیشنهاد برای پژوهش‌های آتی

بررسی تلفیق فناوری‌های نانو و بیوکامپوزیت در اجزای LSF برای افزایش مقاومت حرارتی؛

توسعه مدل‌های BIM-انرژی (Energy-Based BIM) برای تحلیل هم‌زمان سازه و مصرف انرژی؛

انجام آزمایش‌های میدانی در شرایط اقلیمی ایران برای اعتبارسنجی مدل‌های عددی موجود؛

بررسی پایداری زیست‌محیطی و چرخه عمر حرارتی (Thermal Life Cycle) در مصالح و اتصالات؛

تحلیل اقتصادی مقایسه‌ای بین سیستم‌های سنتی و LSF از منظر انرژی.

۴. نتیجه‌گیری نهایی

با جمع‌بندی کلی می‌توان گفت که فناوری LSF در صورت رعایت اصول طراحی حرارتی، انتخاب مصالح عایق مناسب و بهره‌گیری از تحلیل عددی پیشرفته، می‌تواند به یکی از گزینه‌های اصلی ساختمان‌های پایدار و کم‌مصرف انرژی در آینده تبدیل شود.

این مرور نظام‌مند با تکیه بر منابع معتبر [۱]–[۱۵] می‌تواند مبنای تدوین دستورالعمل‌های بومی برای طراحی و اجرای بهینه‌ی سازه‌های فولادی سبک در شرایط اقلیمی ایران باشد.

هیچ گونه تعارض منافع توسط نویسندگان بیان نشده است.

مراجع

- [۱]Tahir, M., & Mahendran, M. (2020). Thermal performance of light steel frame walls. *Energy and Buildings*, 212, 109804.
- [۲]Soares, N., Santos, P., Gervásio, H., Costa, J. J., Simões da Silva, L., & Rodrigues, F. (2017). Energy efficiency and thermal performance of lightweight steel-framed (LSF) construction: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 194–209. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.066>
- [۳]Kim, S., & Lee, D. (2022). Phase change material integrated light steel frame systems for energy efficiency. *Applied Thermal Engineering*, 205, 118045.
- [۴]International Energy Agency. (2022). *World energy outlook 2022*. IEA.
- [۵]Bradford, A. D. (2019). Light steel framing in modern construction. *Journal of Structural Engineering*, 145(4), 04019012.
- [۶]Wang, J., Zhang, Y., Li, H., & Chen, Z. (2020). Thermal bridging effects in steel-framed walls. *Building and Environment*, 180, 107039.
- [۷]Statistical Center of Iran. (2022). *Annual report on energy consumption in buildings*. Tehran: Statistical Center of Iran. (Persian)
- [۸]Jafari, S., Hosseini, S. M., & Rahmani, M. (2023). Thermal analysis of light steel frame walls in hot climates. *Journal of Building Physics*, 46(4), 512–529.
- [۹]Rostami, M. (2021). *Heat transfer analysis in light steel frame walls (Master's thesis)*. University of Tehran, Tehran, Iran. (Persian)
- [۱۰]Sadeghi, S. (2020). Optimization of insulation in light steel frame walls. *Iranian Journal of Civil Engineering*, 22(3), 45–58. (Persian)
- [۱۱]Pham, C., Nguyen, T., & Bui, Q. (2023). Thermo-structural simulation of light steel frame components. *Finite Elements in Analysis and Design*, 204, 103764.
- [۱۲]Zhao, B., Liu, X., & Sun, Y. (2021). MATLAB-based building energy modeling for light steel frame systems. *Energy Reports*, 7, 2145–2156.
- [۱۳]Li, D. (2022). Coupled thermal–structural analysis of steel wall systems. *Engineering Structures*, 252, 113640.
- [۱۴]Mahendran, M. (2023). Thermal bridges in light steel framing systems. *Thin-Walled Structures*, 184, 110515.
- [۱۵]Mohammadi, G. (2023). Energy modeling of light steel frame buildings in hot and arid climate of Iran. *Journal of Energy and Buildings*, 12(2), 101–115. (Persian)