

Experimental study on precast HPC slab-steel composite floor with high-strength grout shear key under uniform stacking loading

Sayed Parsa Mirmoghtadaei¹, Davood Mostofinejad^{2*}, Mohammad Reza Eftekhari³

1- Master of Science, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

2- Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

3- Associate Professor, Department of Civil Engineering, Isfahan University of Technology, Isfahan, Iran.

ABSTRACT

In steel structures, selecting a floor system that lowers the structure's self-weight, reduces labor-intensive tasks, and accelerates construction is crucial. Conventional steel-concrete composite floors are among the most commonly used composite floor systems, but the need for steel decking, temporary formwork, and in-situ concreting stops them from being ideal. This study introduces an innovative steel-concrete composite floor system, comprising precast high-performance concrete (HPC) slabs, steel beams with pre-welded shear studs, and high-strength expansive grout as a shear key, in both longitudinal and transverse directions. This composite floor system eliminates the above-mentioned problems of conventional steel-concrete composite floors. Thin HPC precast slabs lower the overall structural weight and seismic forces, facilitate the use of slender structural members, and accelerate construction. For more accurate evaluation of the composite action in the proposed floor system, a composite specimen was subjected to uniform stacking loading, which, unlike most previous research studies, takes advantage of having two spans, multiple precast slabs, and full-scale size. After bearing 15.2 kN/m² of uniform stacking load, the composite specimen not only did not fail, but also did not experience plastic deformation. The maximum deflection of the specimen's middle beam was 6.7% less than that of an equal-sized in-situ steel-concrete composite floor. According to AISC 360-22 and ASCE/SEI 7-22, the composite specimen satisfies the serviceability deflection limit and minimum design loads for most residential and office uses. The proposed composite floor offers a reliable and efficient solution that expedites flooring in steel structures.

ARTICLE INFO

Receive Date: 27 September 2025

Revise Date: 27 October 2025

Accept Date: 13 November 2025

Keywords:

Precast concrete slab

HPC

Steel-concrete composite floor

High-strength grout

Uniform loading

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/jsce.2025.547780.3820

*Corresponding author: Davood Mostofinejad

Email address: dmostofi@cc.iut.ac.ir

مطالعه‌ی تجربی سقف کامپوزیت متشکل از دال پیش ساخته‌ی بتنی با عملکرد بالا، تیر فولادی و گروت پرمقاومت به عنوان کلید برشی تحت بارگذاری گسترده

سید پارسا میرمقتدایی^۱، داود مستوفی نژاد^{۲*}، محمدرضا افتخار^۳

۱- کارشناس ارشد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۲- استاد، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی اصفهان، اصفهان، ایران

چکیده

در سازه‌های فولادی، انتخاب سیستم سقفی که وزن مرده‌ی سازه و میزان عملیات اجرایی را کاهش و سرعت ساخت را افزایش دهد، بسیار حائز اهمیت است. سقف‌های کامپوزیت فولادی-بتنی از رایج‌ترین سیستم‌های سقف کامپوزیت هستند؛ اما وابستگی اجرایی آن‌ها به ورق عرشه فولادی، قالب بندی و بتن ریزی درجا باعث می‌شود که بی نقص نباشند. در این پژوهش سقف کامپوزیت فولادی-بتنی نوینی معرفی شده است که از دال‌های پیش ساخته‌ی بتنی با عملکرد بالا (HPC)، تیرهای فولادی دارای برش گیر و گروت منبسط‌شونده‌ی پرمقاومت به عنوان کلید برشی در دو جهت طولی و عرضی تشکیل شده است. این سیستم مشکلات ذکرشده‌ی سیستم‌های سقف کامپوزیت متداول را برطرف می‌کند. دال‌های پیش ساخته‌ی بتنی نازک با عملکرد بالا با کاهش وزن کل سازه و نیروی زلزله، امکان استفاده از اعضای سازه‌ای ظریف‌تر را فراهم کرده و سرعت ساخت را افزایش می‌دهند. برای ارزیابی دقیق‌تر عملکرد کامپوزیت در سیستم پیشنهادی، یک نمونه‌ی کامپوزیت تحت بارگذاری گسترده قرار گرفت. این نمونه برخلاف اغلب مطالعات پیشین، دارای دو دهانه، چندین دال پیش ساخته و ابعاد تمام مقیاس بود. پس از تحمل ۱۵/۲ کیلو نیوتن بر متر مربع بار گسترده، نمونه‌ی کامپوزیت نه تنها دچار شکست نشد، بلکه تغییرشکل پلاستیک نیز تجربه نکرد. حداکثر تغییر مکان تیر میانی نمونه‌ی کامپوزیت ۶/۷٪ کمتر از یک سقف کامپوزیت فولادی-بتنی با بتن ریزی درجا و دارای ابعاد مشابه بود. بر اساس آیین‌نامه‌های AISC 360-22 و ASCE/SEI 7-22، نمونه‌ی کامپوزیت الزامات حداکثر تغییر مکان مجاز حالت بهره‌برداری و بارگذاری حداقل طراحی برای اغلب ساختمان‌های مسکونی و اداری را برآورده می‌سازد. این سیستم پیشنهادی یک راهکار مطمئن، کارآمد و سریع برای اجرای سقف در سازه‌های فولادی ارائه می‌دهد.

کلمات کلیدی: دال پیش ساخته‌ی بتنی، بتن پرمقاومت با عملکرد بالا (HPC)، سقف کامپوزیت فولادی-بتنی، گروت پرمقاومت، بارگذاری گسترده.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
10.22065/jsce.2025.547780.3820	doi:	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
10.22065/jsce.2025.547780.3820		۱۴۰۵/۰۴/۳۱	۱۴۰۴/۰۸/۲۲	۱۴۰۴/۰۸/۲۲	۱۴۰۴/۰۸/۰۵	۱۴۰۴/۰۷/۰۵
داود مستوفی نژاد dmostofi@cc.iut.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه و تاریخچه تحقیقات

در سراسر جهان، انواع مختلفی از سازه‌ها با صرف مقادیر قابل توجهی مصالح، نیروی کار متعدد و زمان زیاد احداث می‌شوند. همچنین یکی از چالش‌های اصلی در مهندسی سازه، هزینه‌ی بالای ساخت است. دو راهبرد اصلی برای کاهش هزینه، تسریع در زمان ساخت و کاهش وزن سازه می‌باشند. کاهش وزن سازه نه تنها امکان‌پذیری اقتصادی پروژه را بهبود می‌بخشد، بلکه موجب کاهش نیروی زلزله‌ی وارد بر سازه نیز می‌گردد. علاوه بر این، استفاده از اعضای پیش ساخته، دقت و سرعت ساخت را افزایش می‌دهد. هنگامی که این اعضا از مصالح با مقاومت بالا ساخته شوند، امکان ساخت اعضای نازک‌تر و سبک‌تر فراهم می‌شود. مطالعات مختلف نشان داده‌اند که دال‌ها حدود ۴۰ درصد از وزن مرده‌ی کل ساختمان را به خود اختصاص می‌دهند [۱]. در میان سیستم‌های سقف رایج، دال‌های کامپوزیت فولادی-بتنی به عنوان یکی از سبک‌ترین گزینه‌ها شناخته شده‌اند. کاهش وزن واحد سطح این دال‌ها موجب کاهش بار مرده می‌شود. این کاهش وزن می‌تواند از طریق استفاده از بتن‌های پرمقاومت با عملکرد بالا محقق شود که علاوه بر کاهش ضخامت دال، ظرفیت خمشی آن را نیز افزایش می‌دهد.

در تحقیقات اخیر، انواع مختلفی از سقف‌های کامپوزیت فولادی-بتنی پیش ساخته معرفی و بررسی شده‌اند. تن و هم‌کاران (۲۰۲۲) دال کامپوزیت فولادی-بتنی پرمقاومت با عملکرد فوق العاده بالا (UHPC^۱) پیش ساخته‌ی مجهز به نوارهای سوراخ دار (NPBL^۲) را برای پل‌های کابلی با دهانه‌ی بلند پیشنهاد دادند. آزمایش‌های کششی روی نمونه‌های شامل قطعات UHPC پیش ساخته‌ی متصل شده به یکدیگر توسط بتن UHPC درجا، انجام گرفت. این نمونه‌ها در هندسه‌ی ناحیه‌ی اتصال و نوع برش گیر تفاوت داشتند. نمونه‌های با ناحیه‌ی اتصال دندانه‌ای مستطیلی شکل مقاومت کششی بالاتری نسبت به نمونه‌های با ناحیه‌ی اتصال صاف نشان دادند [۲]. هان و هم‌کاران (۲۰۲۴) دال کامپوزیت پیش ساخته‌ی متشکل از تیر خرپایی فولادی و دال هالوکور^۳ را معرفی کردند که با ترکیب این دو جزء و عملکرد آن‌ها به عنوان تیر فولادی، نیاز به تیرهای فرعی در سقف کامپوزیت فولادی-بتنی برطرف می‌گردد. نمونه‌ها تحت بارگذاری گسترده و متمرکز عملکرد مناسبی داشته و الزامات حداقل باربری در حالت حدی بهره برداری^۴ را تأمین نمودند [۳]. پَنگ و هم‌کاران (۲۰۲۳) یک سیستم سقف بتنی پیش ساخته با اتصالات خشک ارائه دادند. نمونه‌ها با تعداد مختلفی از دال‌های پیش ساخته و اتصالات خشک ساخته شده و تحت بارگذاری گسترده توسط بلوک‌های چدنی قرار گرفتند تا کارایی اتصالات مکانیکی در جا به جایی هم‌آهنگ دال‌های مجاور ارزیابی شود [۴]. وَنگ و هم‌کاران (۲۰۲۲) مجموعه‌ای از آزمایش‌های بیرون فشردگی^۵ را برای بررسی عملکرد برشی طولی نوعی اتصال تر بین دال‌های بتنی پیش ساخته و تیر فولادی مجهز به برش گیر انجام دادند. در این روش، آرماتورهای عرضی کوتاه در شیارهای محل اتصال قرار داده شده و سپس بتن‌ریزی درجا صورت می‌گیرد. نتایج نشان داد که عملکرد کامپوزیت مناسبی در مقایسه با دال کامپوزیت فولادی-بتنی درجا، با همان جزئیات طراحی، حاصل می‌شود. قطر گل میخ، مقاومت فشاری بتن درجا و درصد آرماتور عرضی کوتاه از عوامل مؤثر بر مقاومت برشی و الگوی شکست بودند [۵]. علاوه بر این، عملکرد کششی و خمشی همین نوع اتصال تر با استفاده از بتن پرمقاومت با عملکرد فوق العاده بالا برای پر کردن کلید برشی^۶ مورد بررسی قرار گرفت که نتایج بهتری نسبت به استفاده از بتن معمولی در کلید برشی نشان داد [۶-۷]. پژوهشگران همچنین استفاده از دال‌های UHPC پیش ساخته در تیرهای کامپوزیت فولادی-بتنی را برای بهبود سختی خمشی و کنترل ترک خوردگی بررسی کرده‌اند [۸-۱۲]. دِ اولیویرا و هم‌کاران (۲۰۲۵) رفتار تیرهای کامپوزیت فولادی-بتنی متشکل از دال پیش ساخته از جنس UHPC و تیر فولادی با جان سوراخ دار که مجهز به کلید برشی تر از جنس UHPC بودند را تحت لنگر خمشی قرار دادند. استفاده از دال UHPC موجب افزایش سختی خمشی اولیه و ظرفیت نهایی شد و نمونه پس از ترک خوردگی‌های متعدد دچار شکست شد [۱۳].

¹ Ultra-high-performance concrete

² Notched perfbond strips

³ Hollow-core slab

⁴ Serviceability limit state

⁵ Push-out

⁶ Shear key

هدف پژوهش حاضر توسعه‌ی جایگزینی برای سقف‌های کامپوزیت فولادی-بتنی متداول به منظور رفع چالش‌های اشاره شده در ساخت سازه‌های فولادی است. با استفاده از بتن پرمقاومت، ضخامت و به تبع آن وزن واحد سطح دال کاهش می‌یابد. علاوه بر این، استفاده از دال‌های پیش ساخته موجب حذف بتن‌ریزی درجا و در نتیجه تسریع فرآیند ساخت می‌شود. سیستم سقف کامپوزیت پیشنهادی شامل دال‌های نازک بتنی پرمقاومت پیش ساخته با عملکرد بالا و تیرهای فولادی با برش گیرهای از پیش جوش شده است. برای نخستین بار، از گروت پرمقاومت به عنوان کلید برشی استفاده شده است تا با پر کردن فضای بین دال‌های پیش ساخته، بال فوقانی تیر فولادی و برش گیرها عملکرد کامپوزیت مناسبی ایجاد شده و انتقال برش از دال بتنی پیش ساخته به تیر فولادی میسر شود.

برخلاف اغلب پژوهش‌ها بر روی دال‌های کامپوزیت، نمونه‌ی آزمایش شده در این تحقیق دارای دو دهانه و مقیاس واقعی است که امکان ارزیابی دقیق‌تر عملکرد کامپوزیت میان اجزای مختلف سقف و شرایطی نزدیک‌تر به سازه‌ای واقعی را فراهم می‌آورد. استفاده از نمونه‌ای دو دهانه و شامل چندین دال پیش ساخته، این امکان را ایجاد می‌کند تا کارایی گروت به عنوان کلید برشی تر در انتقال نیروی برشی در هر دو راستای طولی و عرضی مورد بررسی قرار گیرد.

۲- برنامه‌ی آزمایشگاهی

۲-۱- بارگذاری گسترده

انتخاب روش بارگذاری مناسب برای ارزیابی رفتار سیستم‌های سقف کامپوزیت امری حائز اهمیت است. برای نمونه‌های چند دهانه که از اجزای پیش ساخته تشکیل شده‌اند، اعمال بار باید به گونه‌ای انجام گیرد تا از نامعینی سازه‌ای جلوگیری شده و توزیع متقارن بار تضمین گردد. در مطالعات مختلف، روش‌های گوناگونی برای اعمال بار گسترده‌ی کنترل شده که شرایط بارگذاری واقعی را شبیه سازی می‌کند به کار رفته است.

یکی از روش‌های متداول بارگذاری گسترده، بارگذاری توسط بلوک گذاری است که در آن بلوک‌های ساخته شده از بتن، سنگ، فولاد یا سایر مصالح چگال، به صورت مرحله‌ای بر سطح نمونه قرار داده می‌شوند. این روش دارای مزایایی همچون اجرای ساده، به ویژه روی سطوح تخت مانند تیرها، دال‌ها و صفحات، و نیز امکان اعمال بار به صورت تدریجی و کنترل شده است که شباهت زیادی به بارهای بهره برداری دارد. با این حال، این روش نیاز به نیروی کار قابل ملاحظه‌ای دارد و اجرای آن در نمونه‌های دارای اشکال نامنظم یا سطوح با مساحت بزرگ دشوارتر است [۱۴].

روش دیگر، بارگذاری گسترده با استفاده از محفظه‌ی خلأ است. در این روش، یک کیسه یا پوشش پلاستیکی انعطاف‌پذیر به سطح نمونه متصل شده و هوای داخل محفظه‌ی بین پوشش و سطح نمونه تخلیه می‌شود. بدین ترتیب، فشار منفی یکنواختی بر سطح ایجاد می‌گردد. این روش برای نمونه‌های نازک، انعطاف‌پذیر یا دارای هندسه‌ی پیچیده مناسب است. با این وجود، استفاده از تجهیزات خاص شامل پمپ‌های خلأ و درزگیرهای هوا بند، اجرای این روش را پرهزینه‌تر و پیچیده‌تر از بارگذاری توسط بلوک گذاری می‌سازد [۱۵].

روش دیگر اعمال بار گسترده، استفاده از کیسه‌های لاستیکی مقاوم پر شده با هوا یا آب است که بتوانند بارهای نقطه‌ای یا خطی را به بار گسترده تبدیل کنند. این کیسه‌ها قابلیت تطابق با سطوح منحنی یا نامنظم را دارند. با این حال، در آزمایش‌های طولانی مدت، نشتی هوا یا آب می‌تواند چالش‌زا باشد و همچنین ساخت کیسه‌های بزرگ مقیاس فرآیندی پیچیده و پرهزینه است [۱۶].

همچنین، برخی پژوهشگران بارگذاری گسترده را از طریق اعمال بارهای نقطه‌ای متعدد شبیه سازی کرده‌اند. هرچه تعداد بارهای نقطه‌ای بیشتر باشد، شباهت بار اعمال شده به بار گسترده افزایش می‌یابد. با این حال، این روش می‌تواند منجر به ایجاد نامعینی در نمونه شده و در نتیجه روند آزمایش را غیرقابل پیش بینی سازد [۱۷].

در پژوهش حاضر، بارگذاری گسترده از طریق چیدمان بلوک‌های سنگی انجام گرفته است. جزئیات مربوط به مشخصات بلوک‌ها و روش اجرای بارگذاری در ادامه تشریح می‌گردد.

۲-۲-۲- مشخصات مصالح

۲-۲-۲-۱- طرح اختلاط بتن

در این پژوهش، برای ساخت دال‌های پیش ساخته، از بتن پرمقاومت با عملکرد بالا (HPC) استفاده شده است. در طرح اختلاط این بتن (جدول ۱) از ماسه با اندازه‌ی دانه‌ی بین ۰ تا ۵ میلی متر به عنوان درشت دانه و از ماسه‌ی سیلیسی به عنوان ریز دانه استفاده شده است. مواد سیمانی شامل سیمان پرتلند تیپ ۱-۳۲۵ و میکرو سیلیس بودند. افزودن میکرو سیلیس باعث افزایش مقاومت فشاری و دوام، کاهش نفوذ پذیری، افزایش مقاومت در برابر محیط‌های سولفاته و کلریدی، و کاهش مقدار کل مواد سیمانی مورد نیاز می‌شود [۱۸-۲۰]. به منظور جبران نسبت پایین آب به سیمان و حفظ کارایی، از فوق روان کننده‌ای بر پایه‌ی پلی کربوکسیلات اتر با نام تجاری Fosroc Auramix 4450 استفاده گردید.

جدول ۱: طرح اختلاط بتن پرمقاومت با عملکرد بالا (HPC) (kg/m^3).

ماسه‌ی ۰-۵	ماسه‌ی سیلیسی	میکرو سیلیس	سیمان	فوق روان کننده	آب	آب / مواد سیمانی (درصد)
۱۳۷۰	۲۴۰	۸۲	۵۰۸	۱۱/۸	۲۲۱	۳۷

به منظور اختلاط بتن HPC، ابتدا سنگ دانه‌ها به صورت خشک با یکدیگر مخلوط شدند، سپس سیمان به آن‌ها افزوده شد. پس از اختلاط کامل این سه جزء، میکرو سیلیس همراه با بخشی از آب اختلاط به صورت جداگانه ترکیب شد تا ژل میکرو سیلیس تشکیل گردد و سپس به مخلوط اصلی اضافه شد. پس از اطمینان از یکنواختی مخلوط، آب باقی مانده‌ی حاوی فوق روان کننده، با احتیاط به مخلوط اضافه گردید. لازم است پس از افزودن فوق روان کننده، فرآیند اختلاط حداقل به مدت پنج دقیقه ادامه یابد تا توزیع یکنواخت سنگ دانه‌ها و کارایی مورد نظر حاصل شود.

بر اساس استاندارد ASTM C39M-24 [۲۱]، با میانگین گیری از سه نمونه‌ی استوانه‌ای با ابعاد 100×200 میلی متر، مقاومت فشاری ۲۸ روزه‌ی HPC برابر با ۶۷ مگا پاسکال اندازه‌گیری شد. از آن‌جا که HPC بتنی خودمتراکم است، آزمایش جریان اسلامپ طبق استاندارد ASTM C1611M-21 [۲۲] جهت بررسی کارایی انجام گرفت و مقدار جریان اسلامپ بتن HPC برابر با ۵۵۰ میلی متر به دست آمد.

۲-۲-۲-۲- میلگرد دال‌های پیش ساخته

در دال‌های پیش ساخته، از میلگردهای فولادی طولی و عرضی با قطرهای ۱۰ و ۸ میلی متر به کار گرفته شده است. این میلگردها دارای رده‌ی مقاومتی (A-III (NSS – Normal Strength Steel) بودند. بر اساس استانداردهای ASTM D3039M-17 [۲۳] و ASTM E8M-24 [۲۴]، تنش تسلیم، تنش حداکثر و تنش نهایی این میلگردهای فولادی به ترتیب برابر با ۴۷۱، ۶۰۲ و ۵۱۰ مگا پاسکال به دست آمد.

۲-۲-۲-۳- گروت پرمقاومت

برای پر کردن فضای بین دال‌های پیش ساخته‌ی بتنی، گل‌میخ‌ها و تیرهای فولادی، از گروت منبسط شونده‌ی پرمقاومت با نام تجاری Dezoflow FH-1000 استفاده شد [۲۵]. وظیفه‌ی اصلی این گروت، به عنوان کلید برشی، انتقال برش از دال‌های پیش ساخته به گل‌میخ‌ها است تا عملکرد مرکب بتن و فولاد اتفاق افتد و سقف به عنوان یک سیستم یکپارچه عمل کند. هم‌چنین مقاومت فشاری این گروت برابر با ۷۵/۵ مگا پاسکال اندازه‌گیری شد که بیش‌تر از مقاومت فشاری بتن HPC استفاده شده در دال‌های پیش ساخته است. برای ارزیابی کارایی گروت، آزمایش اسلامپ توسط میز جریان و طبق استانداردهای ASTM C1437-20 [۲۶] و ASTM C230M-23 [۲۷]

انجام گرفت. در این آزمایش، گروت در قالب مخروطی شکل ریخته شد و پس از برداشتن قالب و پخش شدن بتن روی صفحه‌ی فلزی، درصد افزایش قطر بتن نسبت به قطر داخلی قاعده‌ی پایینی قالب (۱۰۰ میلی متر) به عنوان جریان اسلامپ در نظر گرفته شد که این افزایش قطر برابر با ۱۲۵ درصد ثبت گردید.

۲-۲-۴- برش گیرها

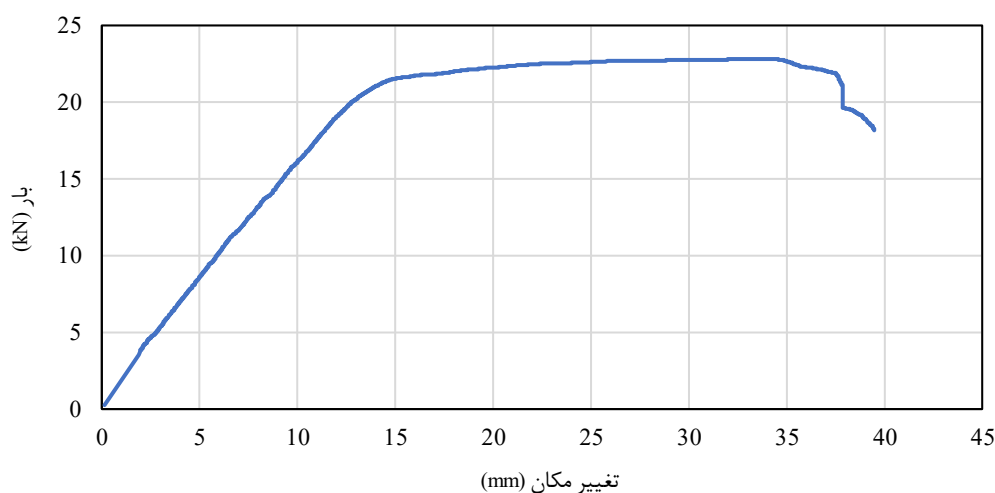
در این پژوهش، برش گیرهای از نوع گل میخ یکی از مهم‌ترین اجزای سیستم سقف هستند و وظیفه‌ی مهم انتقال برش از گروت به تیر فولادی را بر عهده دارند. گل میخ‌های استفاده شده دارای قطر ۱۹ میلی متر و ارتفاع ۵۰ میلی متر هستند. به دلیل ضخامت ۴۰ میلی متری دال‌های بتنی پیش ساخته، نیاز است تا ارتفاع گل میخ‌ها از ۴۰ میلی متر کم‌تر باشد تا در گروت مدفون شوند. به همین دلیل ۱۵ میلی متر انتهایی گل میخ‌ها برش داده شده است تا ارتفاع کلی آن‌ها به ۳۵ میلی متر برسد.

۲-۳- آزمایش خمش چهار نقطه‌ای دال پیش ساخته بتنی

با هدف سنجش رفتار خمشی دال پیش ساخته بتنی مورد استفاده در نمونه‌ی کامپوزیت، نمونه‌ای مشابه با ابعاد $1000 \times 460 \times 40$ میلی متر تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفت. در این نمونه مانند دال‌های نمونه‌ی کامپوزیت از بتن HPC و ۳ عدد میلگرد طولی سایز ۱۰ با رده‌ی مقاومتی A-III استفاده شد. در این آزمایش از جک هیدرولیکی با سرعت بارگذاری یک میلی متر در دقیقه استفاده شد. هم‌چنین سه عدد جا به جایی سنج زیر نمونه قرار داده شد و از روبروی نمونه و زیر نمونه عکس برداری صورت گرفت.

بر اساس شکل ۱ و جدول ۲، حداکثر بار قابل تحمل این نمونه و تغییر مکان متناظر با آن به ترتیب برابر با $22/8$ کیلو نیوتن و $34/6$ میلی متر است و مقدار انرژی جذب شده‌ی دال که سطح زیر منحنی بار - تغییر مکان است، تا نقطه‌ی تسلیم برابر با ۱۸۸ و تا نقطه‌ی نهایی برابر با ۷۲۵ کیلو نیوتن میلی متر به دست آمده است. در شکل ۲ تصویر نحوه‌ی شکست نمونه آورده شده است.

با بررسی منحنی بار-تغییر مکان و تصویر ترک خوردگی می‌توان نتیجه گرفت که نمونه شکستی نرم همراه با ترک خوردگی‌های متعدد را تجربه کرده و با باز شدن ترک زیر یکی از نقاط بارگذاری به شکست رسیده است.



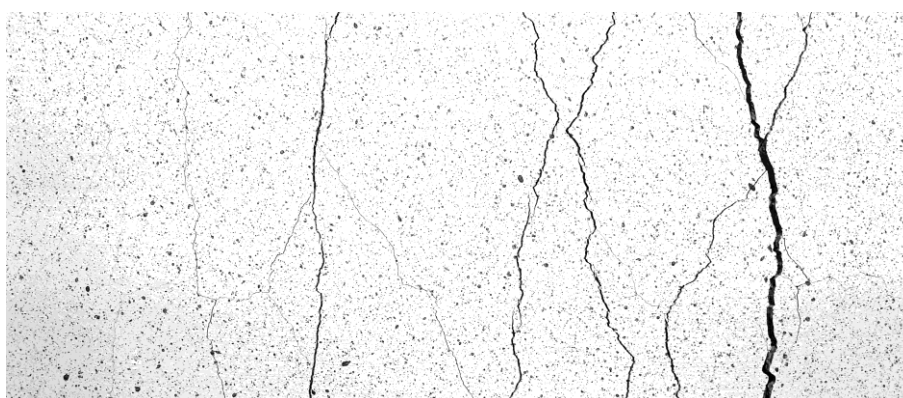
شکل ۱: منحنی بار-تغییر مکان دال پیش ساخته بتنی نمونه‌ی کامپوزیت تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای.

جدول ۲: نتایج آزمایش خمش چهار نقطه‌ای دال پیش ساخته‌ی نمونه‌ی کامپوزیت

انرژی جذب شده (kN.mm)		تغییر مکان (mm)				بار (kN)	
تا نقطه‌ی نهایی	تا نقطه‌ی تسلیم	نهایی	حداکثر	تسلیم	نهایی	حداکثر	تسلیم
۷۲۵	۱۸۸	۳۹/۵	۳۴/۶	۱۵/۳	۱۸/۲	۲۲/۸	۲۱/۶



(الف)



(ب)

شکل ۲: تصاویر شکست دال پیش ساخته‌ی نمونه‌ی کامپوزیت تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای. (الف) روبروی نمونه و (ب) زیر نمونه.

۲-۴- نمونه‌ی کامپوزیت تحت بارگذاری گسترده توسط بلوک‌گذاری

۲-۴-۱- مراحل ساخت نمونه‌ی کامپوزیت

در آزمایش‌های مرتبط با مهندسی سازه، استفاده از نمونه‌های مقیاس شده به جای نمونه‌های تمام مقیاس امری رایج است. متداول‌ترین روش مقیاس کردن نمونه، روش باکینگهام^۱ می‌باشد که در آن ضریب مقیاس هندسی به صورت نسبت طول نمونه‌ی تمام مقیاس (Prototype) به طول نمونه‌ی مقیاس شده (Model) تعریف می‌شود [۲۸]. پس از بررسی مقاطع مختلف تیرهای فولادی و طول دهانه‌های متفاوت به عنوان نمونه‌ی Prototype و در نظر گرفتن طول نمونه‌ی Model برابر با ۲/۸ متر، تصمیم بر آن شد تا به دلیل دشواری‌های ساخت، افزایش احتمالی خطاهای تولید، و مشکلات موجود در تأمین یا ساخت اجزایی نظیر میلگردهای نازک و تیرهای نوردشده‌ی لاغر، از مقیاس کردن نمونه صرف نظر شود. در نتیجه، نمونه‌ی کامپوزیت با ابعادی نزدیک به عضو سازه‌ای واقعی، برابر با ۲۱۰۰ × ۴۲۲۰ میلی متر ساخته شد.

نمونه‌ی کامپوزیت شامل سه تیر فولادی IPE 140 با گل میخ‌های از پیش جوش شده، ۱۸ دال بتنی پیش ساخته با ابعاد ۴۰ × ۴۶۰ × ۱۰۰۰ میلی متر و گروت پرمقاومت جهت پر کردن فضاهای خالی بین اجزا و ایفای نقش کلید برشی بود. با این هدف که

¹ Buckingham

دال‌های پیش ساخته، گل میخ‌ها را احاطه کنند و فضای کافی برای گروت ریزی در مجاورت گل میخ‌ها وجود داشته باشد، شکل دال‌های پیش ساخته طبق شکل ۳ تغییر نمود.



شکل ۳: دال پیش ساخته‌ی نمونه‌ی کامپوزیت.

به منظور تسهیل فرآیند بارگذاری گسترده و اندازه‌گیری تغییر مکان، نمونه‌ی کامپوزیت روی یک سازه‌ی نگهدارنده نصب شد. این سازه‌ی نگهدارنده با استفاده از مقطع IPE 200 برای تیرها و مقطع 2IPE 140 برای ستون‌ها ساخته شد. برای جلوگیری از نشست در هنگام بارگذاری، از کف ستون‌هایی با ابعاد $250 \times 250 \times 10$ میلی متر استفاده گردید. مهاربندهای فولادی با ابعاد مقطع 40×80 میلی متر در هر دو جهت نصب شدند تا جابه‌جایی‌های خارج از صفحه‌ی نمونه‌ی کامپوزیت محدود شوند.

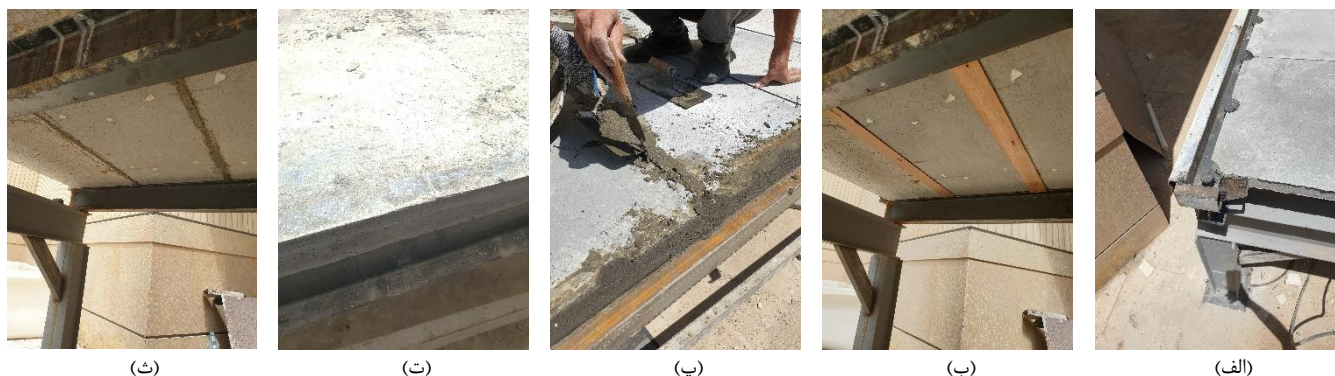
پیش از قرارگیری تیرهای فولادی IPE 140 روی سازه‌ی نگهدارنده، گل میخ‌ها مطابق آیین‌نامه‌ی AISC 360-22^[۲۹] به طور کامل به تیرها جوش داده شدند. در مجموع، ۱۹ گل میخ با قطر ۱۹ میلی متر و ارتفاع ۳۵ میلی متر در فواصل ۲۳۵ میلی متری جوش شدند. کف ستون‌ها با استفاده از رول بولت به زمین متصل شدند. پس از اطمینان از چیدمان دقیق و پایداری تمامی اعضا، تیرهای فولادی به سازه‌ی نگهدارنده جوش شدند به طوری که شرایط تکیه‌گاهی مفصلی تأمین گردد. در مرحله‌ی بعد، دال‌های بتنی پیش ساخته روی تیرهای فولادی IPE 140 قرار داده شدند و فاصله‌ی بین آن‌ها به گونه‌ای تنظیم گردید که فضای کافی برای گروت ریزی بین دال‌ها و اطراف هر گل میخ فراهم گردد. شکل ۴ فرآیند ساخت نمونه‌ی کامپوزیت را نشان می‌دهد.

برای گروت ریزی فضای خالی بین تیر فولادی و دال‌ها و همچنین بین دال‌های مجاور، از قالب‌های فولادی و چوبی استفاده شد. به همین ترتیب، گروت ریزی کف ستون‌ها نیز انجام شد.

عمل‌آوری گروت به مدت یک هفته انجام گرفت، به طوری که سطح نمونه‌ی کامپوزیت روزانه دو بار از آب با دمای اتاق پوشانده شد تا رطوبت کافی حفظ گردد. فرآیند گروت ریزی در شکل ۵ نمایش داده شده است.



شکل ۴: مراحل ساخت نمونهی کامپوزیت. (الف) تیر و ستون سازهی نگهدارنده، (ب) جوش دادن گل‌میخ‌ها روی تیرهای IPE140، (پ) نصب سازهی نگهدارنده، (ت) جایگذاری دال‌های پیش ساخته روی تیرهای IPE140 و (ث) نمونهی کامپوزیت پس از جایگذاری دال‌های پیش ساخته.



شکل ۵: مراحل گروت ریزی نمونهی کامپوزیت. (الف) قالب گروت ریزی طولی، (ب) قالب گروت ریزی عرضی، (پ) گروت ریزی، (ت) گروت ریزی طولی پس از باز کردن قالب و (ث) گروت ریزی عرضی پس از باز کردن قالب.

۲-۴-۲- مراحل انجام آزمایش بارگذاری گسترده توسط بلوک گذاری

پیش از اتصال جا به جایی سنج‌ها به دستگاه ثبت داده، باید از کالیبره بودن جا به جایی سنج‌ها و واقعی بودن اعداد خروجی آن اطمینان حاصل نمود. به منظور کالیبره کردن آن‌ها، باید ضریب مخصوص به هر جا به جایی سنج را در دستگاه ثبت داده اصلاح نمود. به این منظور ابتدا ضخامت واقعی تعدادی ورق فولادی با ضخامت‌های متفاوت توسط دستگاه اندازه‌گیری کولیس و جا به جایی سنجی که قصد کالیبره کردن آن وجود دارد، سنجیده می‌شود. با دانستن ضخامت ورق‌ها به هر دو روش، نموداری رسم می‌شود که محور افقی آن را خوانش‌های دستگاه اندازه‌گیری کولیس و محور عمودی آن را ضخامت ورق‌ها که توسط جا به جایی سنج به دست آمده‌اند، تشکیل می‌دهد. با تقسیم ضریب فعلی ثبت شده در دستگاه ثبت داده به شیب نمودار رسم شده، ضریب کالیبره‌ی صحیح جا به جایی سنج به دست می‌آید.

برای اندازه‌گیری تغییر مکان دال‌های بتنی پیش ساخته و تیرهای فولادی، ۹ عدد جا به جایی سنج (LVDT) که با نام تجاری OPKON LPS 100 [۳۰] شناخته می‌شود، به پایه‌های فلزی نصب و در زیر نمونهی کامپوزیت قرار داده شدند. سه عدد جا به جایی سنج زیر تیرهای فولادی و شش عدد دیگر زیر دال‌های پیش ساخته‌ی بتنی جانمایی شدند. کلیه جا به جایی سنج‌ها به دستگاه ثبت داده با نام تجاری TML TDS-540 [۳۱] متصل گردیدند. به منظور مستندسازی تصویری فرآیند بارگذاری، سه دوربین رو به روی نمونه و در طرفین آن و یک دوربین زیر نمونه قرار گرفتند. نمای کلی آرایش دستگاه‌ها و تجهیزات آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. بار

گسترده به وسیله بلوک‌هایی از جنس سنگ گرانیب با ابعاد $50 \times 200 \times 200$ میلی متر، چگالی تقریبی ۳۰۰۰ کیلوگرم بر مترمکعب و وزن متوسط هر بلوک ۶ کیلو گرم اعمال گردید. به دلیل چگالی بالای سنگ گرانیب نسبت به سایر سنگ‌ها یا بتن، تعداد بلوک‌های موردنیاز و مدت زمان آزمایش به طور مؤثری کاهش می‌یابد. بلوک‌های سنگی که از پیش در اطراف نمونه قرار گرفته بودند، توسط دو کارگر روی نمونه کامپوزیت قرار داده شدند. هر لایه از بلوک‌ها در سه مرحله بارگذاری شد و در پایان هر مرحله، خوانش جا به جایی سنج‌ها ثبت گردید و ترک‌های به وجود آمده زیر نمونه علامت گذاری شدند.

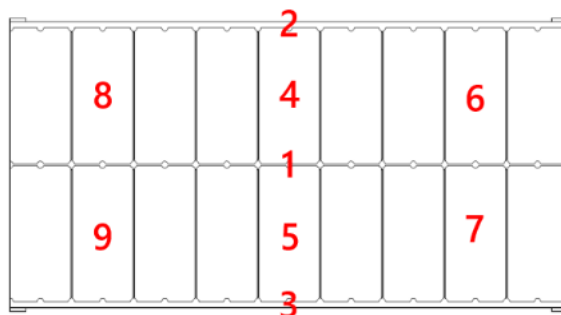


شکل ۶: نمای کلی آرایش دستگاه‌ها و تجهیزات آزمایش بارگذاری گسترده‌ی نمونه‌ی کامپوزیت

۳- نتایج آزمایش بارگذاری گسترده‌ی نمونه‌ی کامپوزیت

وزن کل بلوک‌های سنگی برابر با ۱۳۷۱۶ کیلو گرم معادل $134/5$ کیلو نیوتن ($15/2$ کیلو نیوتن بر متر مربع) بود. بارگذاری گسترده در ۳۲ مرحله انجام شد و ۱۱ لایه بلوک سنگی روی نمونه قرار گرفت. جا به جایی سنج‌های شماره ۱، ۲ و ۳ که وسط دهانه و زیر تیرهای فولادی نصب شده بودند، حداکثر تغییر مکان برابر با به ترتیب $21/9$ میلی متر، $16/54$ میلی متر و $17/92$ میلی متر را ثبت کردند. طبق انتظار، بیشترین تغییر مکان را تیر فولادی میانی که سهم بیشتری از بار را نسبت به دو تیر کناری تحمل می‌کرد تجربه نمود. اختلاف تغییر مکان وسط دهانه‌ی دو تیر جانبی $7/7$ درصد اندازه‌گیری شد که میزان خطای قابل قبولی است.

شش جا به جایی سنج دیگر زیر دال‌های بتنی پیش ساخته جانمایی شدند؛ به طوری که جا به جایی سنج‌های شماره ۴ و ۵ تغییر مکان دو دال واقع در امتداد مرکز دهانه و جا به جایی سنج‌های شماره ۶، ۷، ۸ و ۹ تغییر مکان دال‌های جانبی را ثبت نمودند. حداکثر تغییر مکان ثبت شده توسط جا به جایی سنج‌های شماره ۴ و ۵ به ترتیب $19/9$ میلی متر و 22 میلی متر بود که از میانگین حداکثر تغییر مکان دال‌های جانبی بیش تر و مشابه حداکثر تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر فولادی میانی بود. محل نصب جا به جایی سنج‌ها در شکل ۷ و داده‌های ثبت شده توسط جا به جایی سنج‌ها در جدول ۳ مشخص است.



شکل ۷: محل قرارگیری جا به جایی سنج‌ها زیر نمونه‌ی کامپوزیت.

بر اساس منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌ی کامپوزیت (شکل ۸)، دال‌های جانبی رفتار خمشی یکسانی نشان دادند که بیان‌گر تقارن بارگذاری گسترده، شکست متقارن نمونه‌ی کامپوزیت، و کیفیت ساخت یکنواخت دال‌های پیش ساخته است. میانگین حداکثر تغییر مکان چهار دال جانبی برابر با ۱۲/۲۲ میلی متر به دست آمد. همچنین منحنی بار-تغییر مکان ثبت شده توسط جا به جایی سنج شماره ۵، مشابه جا به جایی سنج شماره ۱ بود. در صورت عدم تحقق عملکرد کامپوزیت، انتظار می‌رفت تغییر مکان ثبت شده توسط جا به جایی سنج شماره ۵ بزرگ‌تر باشد، زیرا دال پیش ساخته‌ی میانی ناگزیر بود سهم بیشتری از بار ۱۵/۲ کیلو نیوتن بر متر مربع را تحمل کند. وضعیت نهایی نمونه پس از بارگذاری گسترده در شکل ۹ و شکل ۱۰ ارائه شده است.

۳-۱- بررسی ترک خوردگی و خیز بلند مدت نمونه‌ی کامپوزیت

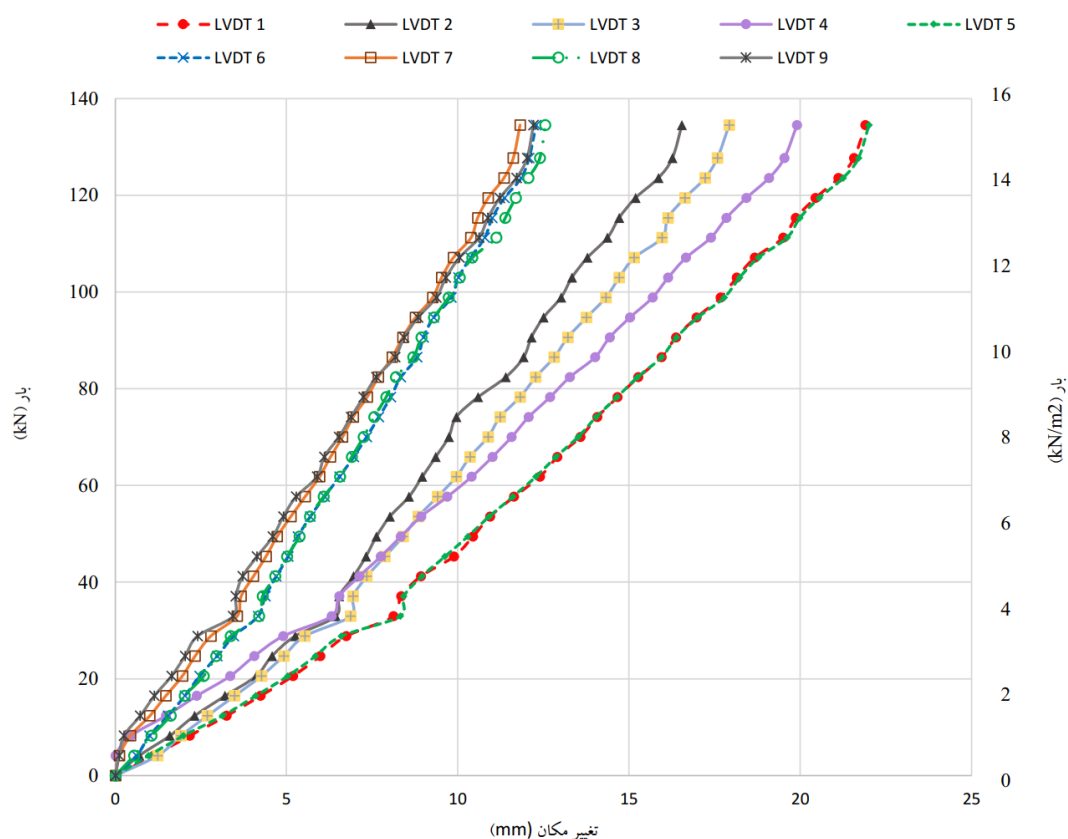
در مرحله‌ی دوازدهم بارگذاری (۵/۶ کیلو نیوتون بر متر مربع) دو ترک خمشی با عرض ۰/۳ میلی متر زیر دال‌های پیش ساخته مشاهده شد. تا مرحله‌ی پانزدهم (۷ کیلو نیوتون بر متر مربع) تعداد ریز ترک‌ها افزایش یافت. در مرحله‌ی هجدهم (۸/۴ کیلو نیوتون بر متر مربع) ترک‌های بیشتری در دال‌های ترک خورده پدیدار شد. در مرحله‌ی بیست و یکم (۹/۸ کیلو نیوتون بر متر مربع) عرض ترک‌ها افزایش یافت و این اتفاق در مرحله‌ی بیست و چهارم (۱۱/۲ کیلو نیوتون بر متر مربع) نیز مشاهده شد. در مرحله‌ی بیست و هفتم (۱۲/۵ کیلو نیوتون بر متر مربع) یک ریز ترک از یک دال پیش ساخته به دال مجاور انتقال یافت که عملکرد مناسب گروت عرضی بین دو دال را نشان می‌دهد (شکل ۱۰-ز). در مراحل نهایی بارگذاری، گسترش ترک‌ها ادامه پیدا کرد. پس از اعمال ۱۵/۲ کیلو نیوتون بر متر مربع بار گسترده، ترک خوردگی‌های نمونه‌ی کامپوزیت در محدوده‌ی تغییر شکل‌های الاستیک رخ داد که این ترک‌ها در مرز بین گروت و دال‌های بتنی پیش ساخته نیز مشاهده شدند.

برای بررسی خیز بلندمدت نمونه‌ی کامپوزیت، نخ‌های پلاستیکی در امتداد زیر دال‌های نمونه‌ی کامپوزیت و بالای جان تیرهای فولادی جانبی به مدت یک هفته کشیده شدند. اندازه‌گیری روزانه‌ی فاصله‌ی بین نمونه و نخ نشان داد که در این مدت خیز اضافی ایجاد نشد.

۳-۲- مقایسه حداکثر تغییر مکان محاسباتی و حاصل از آزمایش نمونه‌ی کامپوزیت

برای تأیید عملکرد کامپوزیت نمونه، حداکثر تغییر مکان حاصل از آزمایش بارگذاری گسترده با مقدار محاسباتی حداکثر تغییر مکان سقف کامپوزیت مشابهی با فرض عملکرد کامپوزیت کامل تحت بارگذاری یکسان مقایسه شد. حداکثر تغییر مکان وسط دهانه‌ی تیر فولادی میانی به عنوان مبنا انتخاب گردید. برای محاسبه‌ی حداکثر تغییر مکان از رابطه‌ی زیر استفاده شد:

$$\Delta = \frac{5}{384} \times \frac{wl^4}{E_s I_{tr}} \quad (1)$$



شکل ۸: منحنی بار-تغییر مکان نمونه‌ی کامپوزیت.

در این رابطه W بار وارد بر نواری به عرض یک متر از نمونه، l طول نمونه، E_s مدول الاستیسیته‌ی فولاد و I_{tr} ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته است. به منظور محاسبه‌ی ممان اینرسی مقطع تبدیل یافته، عرض موثر مقطع کامپوزیت از رابطه‌ی $b_{tr} = \frac{b_e}{n}$ به دست می‌آید که b_e عرض موثر مقطع و n نسبت مدول الاستیسیته‌ی فولاد به بتن است. b_{tr} برابر با ۲۰۹ میلی متر است. در نتیجه پس از محاسبه‌ی y_{tr} ، I_{tr} برابر با 1763 cm^4 به دست می‌آید. بر این اساس، حداکثر تغییر مکان محاسباتی برابر با $18/66$ میلی متر برآورد می‌شود.

در طول آزمایش بارگذاری گسترده، تیر سازه‌ی نگهدارنده دچار خیز ناخواسته‌ای شد. این خیز با استفاده از ریسمان کشی اندازه‌گیری و برابر با $4/5$ میلی متر ثبت شد (شکل ۱۱). بنابراین حداکثر تغییر مکان خالص تیر فولادی میانی با کسر این مقدار از حداکثر تغییر مکان ثبت شده ($21/9$ میلی متر) محاسبه گردید که برابر با $17/4$ میلی متر به دست آمد. حداکثر تغییر مکان $17/4$ میلی متر $6/7$ درصد کمتر از حداکثر تغییر مکان محاسباتی ($18/66$ میلی متر) بوده که نشان‌دهنده‌ی عملکرد بهتر سقف کامپوزیت معرفی شده نسبت به سقف کامپوزیت فولادی-بتنی مشابه با بتن ریزی درجا می‌باشد.

۳-۳- الزامات حالت حدی بهره‌برداری نمونه‌ی کامپوزیت

در ساختمان‌هایی با سقف کامپوزیت فولادی-بتنی، الزامات حالت حدی بهره‌برداری به منظور حفظ کارکرد ساختمان و تأمین راحتی ساکنان در شرایط استفاده‌ی عادی رعایت می‌شوند. بنابراین، خیز قائم تیرها یا سقف‌ها ناشی از بارهای بهره‌برداری نباید موجب اختلال در سرویس‌دهی سازه گردد [۳۲]. بر اساس آیین‌نامه‌ی AISC 360-22 [۲۹]، حداکثر تغییر مکان مجاز برابر با $1/360$ طول دهانه است و دو ترکیب بار مخصوص به الزامات حالت حدی بهره‌برداری شامل بار مرده و زنده پیشنهاد شده است: ترکیب بار $D+L$ و $D+0.5L$.

جدول ۳: نتایج آزمایش بارگذاری گسترده‌ی نمونه‌ی کامپوزیت

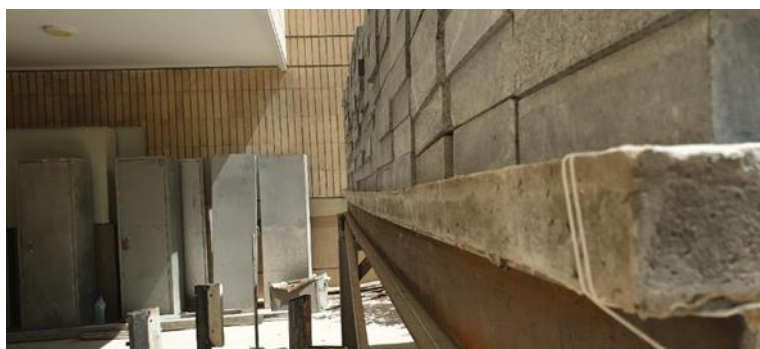
LVDT 9 (mm)	LVDT 8 (mm)	LVDT 7 (mm)	LVDT 6 (mm)	LVDT 5 (mm)	LVDT 4 (mm)	LVDT 3 (mm)	LVDT 2 (mm)	LVDT 1 (mm)	بار (kN)	گام
.
۰/۱۱	۰/۵۴	۰/۱۲	۰/۶۲	۰/۹۷	۰/۰۰	۱/۲۳	۰/۷۰	۱/۱۳	۴/۱۲	۱
۰/۲۵	۱/۰۵	۰/۴۴	۱/۰۰	۱/۹۹	۰/۴۶	۱/۹۱	۱/۵۹	۲/۱۷	۸/۲۴	۲
۰/۷۲	۱/۶۱	۱/۰۰	۱/۵۳	۳/۱۳	۱/۴۷	۲/۶۸	۲/۳۱	۳/۲۵	۱۲/۳۶	۳
۱/۱۴	۲/۰۲	۱/۴۷	۲/۰۳	۴/۱۰	۲/۳۷	۳/۴۸	۳/۲۰	۴/۲۴	۱۶/۴۸	۴
۱/۶۴	۲/۵۸	۱/۹۶	۲/۴۶	۵/۰۴	۳/۳۵	۴/۲۷	۴/۱۱	۵/۱۹	۲۰/۵۹	۵
۲/۰۴	۲/۹۴	۲/۳۳	۲/۹۷	۵/۸۴	۴/۰۶	۴/۹۲	۴/۵۷	۵/۹۸	۲۴/۷۱	۶
۲/۴۰	۳/۳۶	۲/۷۹	۳/۴۶	۶/۶۰	۴/۹۰	۵/۵۳	۵/۲۵	۶/۷۴	۲۸/۸۳	۷
۳/۴۴	۴/۱۹	۳/۵۵	۴/۱۷	۸/۳۲	۶/۳۱	۶/۸۷	۶/۴۳	۸/۱۲	۳۲/۹۵	۸
۳/۵۱	۴/۳۰	۳/۶۷	۴/۳۸	۸/۴۲	۶/۵۴	۶/۹۴	۶/۵۳	۸/۳۴	۳۷/۰۷	۹
۳/۷۱	۴/۶۷	۴/۰۳	۴/۷۰	۸/۹۵	۷/۱۲	۷/۳۴	۶/۹۵	۸/۹۲	۴۱/۱۹	۱۰
۴/۱۳	۵/۰۱	۴/۴۰	۵/۰۴	۹/۶۲	۷/۷۵	۷/۸۷	۷/۳۲	۹/۸۸	۴۵/۳۱	۱۱
۴/۶۰	۵/۳۸	۴/۷۲	۵/۳۳	۱۰/۲۹	۸/۳۳	۸/۴۰	۷/۶۲	۱۰/۴۴	۴۹/۴۳	۱۲
۴/۹۰	۵/۶۸	۵/۱۲	۵/۶۹	۱۰/۹۱	۸/۹۳	۸/۸۴	۸/۰۱	۱۰/۹۴	۵۳/۵۴	۱۳
۵/۲۸	۶/۰۸	۵/۵۴	۶/۱۱	۱۱/۶۰	۹/۶۹	۹/۴۱	۸/۵۷	۱۱/۶۴	۵۷/۶۶	۱۴
۵/۸۹	۶/۵۶	۵/۹۶	۶/۵۴	۱۲/۲۸	۱۰/۴۰	۹/۹۵	۸/۹۶	۱۲/۳۹	۶۱/۷۸	۱۵
۶/۱۰	۶/۹۰	۶/۲۸	۶/۹۶	۱۲/۸۶	۱۱/۰۱	۱۰/۳۵	۹/۳۵	۱۲/۹۰	۶۵/۹۰	۱۶
۶/۵۳	۷/۲۵	۶/۶۳	۷/۳۴	۱۳/۵۱	۱۱/۵۷	۱۰/۸۸	۹/۷۳	۱۳/۵۸	۷۰/۰۲	۱۷
۶/۸۸	۷/۵۵	۶/۹۴	۷/۶۹	۱۴/۰۴	۱۲/۰۷	۱۱/۲۳	۹/۹۵	۱۴/۰۷	۷۴/۱۴	۱۸
۷/۲۴	۷/۹۱	۷/۳۵	۸/۰۴	۱۴/۶۵	۱۲/۶۹	۱۱/۸۲	۱۰/۵۹	۱۴/۶۶	۷۸/۲۶	۱۹
۷/۶۲	۸/۱۹	۷/۶۷	۸/۳۳	۱۵/۲۴	۱۳/۲۷	۱۲/۲۷	۱۱/۴۰	۱۵/۲۶	۸۲/۳۸	۲۰
۸/۱۷	۸/۷۰	۸/۰۸	۸/۸۱	۱۵/۹۵	۱۴/۰۱	۱۲/۸۱	۱۱/۹۲	۱۵/۹۵	۸۶/۴۹	۲۱
۸/۴۳	۸/۹۴	۸/۳۹	۹/۰۰	۱۶/۳۸	۱۴/۴۳	۱۳/۲۱	۱۲/۱۵	۱۶/۳۷	۹۰/۶۱	۲۲
۸/۸۴	۹/۳۰	۸/۷۶	۹/۲۹	۱۷/۰۰	۱۵/۰۲	۱۳/۷۶	۱۲/۵۰	۱۶/۹۷	۹۴/۷۳	۲۳
۹/۳۷	۹/۷۳	۹/۲۶	۹/۸۱	۱۷/۷۸	۱۵/۶۹	۱۴/۳۲	۱۳/۰۱	۱۷/۶۷	۹۸/۸۵	۲۴
۹/۶۵	۱۰/۰۶	۹/۵۲	۱۰/۰۲	۱۸/۲۳	۱۶/۱۴	۱۴/۷۱	۱۳/۳۳	۱۸/۱۴	۱۰۲/۹۷	۲۵
۱۰/۰۵	۱۰/۴۲	۹/۸۷	۱۰/۳۷	۱۸/۷۷	۱۶/۶۶	۱۵/۱۵	۱۳/۷۸	۱۸/۶۷	۱۰۷/۰۹	۲۶
۱۰/۶۲	۱۱/۱۲	۱۰/۳۸	۱۰/۷۸	۱۹/۶۱	۱۷/۳۹	۱۵/۹۶	۱۴/۳۷	۱۹/۵۰	۱۱۱/۲۱	۲۷
۱۰/۸۸	۱۱/۳۸	۱۰/۵۸	۱۱/۰۰	۱۹/۹۹	۱۷/۸۴	۱۶/۱۴	۱۴/۷۱	۱۹/۸۷	۱۱۵/۳۳	۲۸
۱۱/۲۲	۱۱/۶۹	۱۰/۸۹	۱۱/۳۶	۲۰/۵۵	۱۸/۴۳	۱۶/۶۳	۱۵/۱۸	۲۰/۴۴	۱۱۹/۴۴	۲۹
۱۱/۷۱	۱۲/۰۶	۱۱/۳۵	۱۱/۸۵	۲۱/۲۵	۱۹/۰۸	۱۷/۲۲	۱۵/۸۵	۲۱/۱۱	۱۲۳/۵۶	۳۰
۱۲/۰۲	۱۲/۳۹	۱۱/۶۲	۱۲/۰۸	۲۱/۷۰	۱۹/۵۳	۱۷/۵۸	۱۶/۲۶	۲۱/۵۶	۱۲۷/۶۸	۳۱
۱۲/۲۱	۱۲/۵۵	۱۱/۸۲	۱۲/۲۹	۲۲/۰۰	۱۹/۹۰	۱۷/۹۲	۱۶/۵۴	۲۱/۹۰	۱۳۴/۵۱	۳۲



(الف)



(ب)



(پ)



(ت)



(ث)



(ج)

شکل ۹: تصاویر نمونه‌ی کامپوزیت پس از بارگذاری گسترده. (الف) نمونه‌ی کامپوزیت از رو به رو، (ب) حداکثر خیز نمونه‌ی کامپوزیت، (پ) نمای کناری یک دهانه از نمونه‌ی کامپوزیت، (ت) ترک خمشی در یکی از دال‌های پیش ساخته‌ی نمونه‌ی کامپوزیت، (ث) سطح نمونه‌ی کامپوزیت پس از باربرداری و (ج) ترک ریز بین دال پیش ساخته و گروت.

اولین ترکیب بار برای حالت‌های حدی بهره برداری شامل تغییر شکل‌های قابل رویت، ترک‌های قابل تعمیر، آسیب به پوشش داخلی سازه و سایر اثرات کوتاه مدت مورد استفاده قرار می‌گیرد. ترکیب بار دوم برای حالت‌های بهره برداری مرتبط با خزش، نشست یا سایر آثار بلند مدت و دائمی به کار می‌رود.

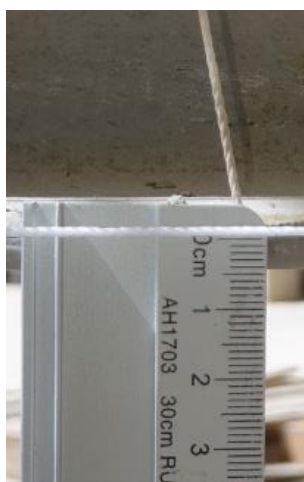
برای نمونه‌ی کامپوزیت معرفی شده، حداکثر تغییر مکان مجاز برابر با $11/5$ میلی متر است که متناظر با $6/43$ کیلو نیوتون بر متر مربع بار گسترده می‌باشد. با در نظر گرفتن وزن خود نمونه ($1/26$ کیلو نیوتون بر متر مربع) به عنوان بار مرده، حداکثر بار زنده‌ی مجاز، بر اساس دو ترکیب بار $D+L$ و $D+0.5L$ ، به ترتیب برابر با $5/17$ کیلو نیوتون بر متر مربع و $10/34$ کیلو نیوتون بر متر مربع است. مقایسه‌ی این مقادیر با بارهای زنده‌ی پیشنهادی در آیین‌نامه‌ی ASCE/SEI 7-22 [32] نشان می‌دهد که سقف کامپوزیت معرفی شده می‌تواند ضمن برآورده ساختن معیارهای حالت حدی بهره برداری، به عنوان سیستم سقف اکثر کاربری‌های مسکونی و اداری استفاده شود. بدیهی است استفاده از مقاطع قوی‌تر در نمونه‌ی کامپوزیت منجر به افزایش ظرفیت باربری با رعایت الزامات حالت حدی بهره برداری خواهد شد.



شکل ۱۰: تصاویر ترک خوردگی دال‌های پیش ساخته‌ی نمونه‌ی کامپوزیت پس از بارگذاری گسترده. (الف) دال پیش ساخته‌ی زیر جا به جایی سنج شماره ۴، (ب) دال پیش ساخته‌ی زیر جا به جایی سنج شماره ۵، (پ) دال پیش ساخته‌ی زیر جا به جایی سنج شماره ۶، (ت) دال پیش ساخته‌ی زیر جا به جایی سنج شماره ۷، (ث) دال پیش ساخته‌ی زیر جا به جایی سنج شماره ۸، (ج) دال پیش ساخته‌ی زیر جا به جایی سنج شماره ۹ و (چ) انتقال ترک از یک دال پیش ساخته به دال پیش ساخته‌ی مجاور توسط گروت عرضی.

سقف کامپوزیت فولادی-بتنی معرفی شده مزایای متعددی نسبت به سقف‌های کامپوزیت فولادی-بتنی متداول دارد. وزن دال‌های پیش ساخته از جنس بتن HPC برابر با $1/08$ کیلو نیوتون بر متر مربع است که حدود ۵۴ درصد کمتر از وزن دال‌های بتنی درجا

در سقف‌های کامپوزیت فولادی-بتنی عرشه فولادی (۲/۳۵ کیلو نیوتون بر متر مربع) می‌باشد. این کاهش قابل توجه وزن موجب کاهش نیروی زلزله‌ی جذب شده توسط سازه می‌گردد و امکان استفاده از مقاطع ظریف‌تر سازه‌ای را فراهم می‌سازد. علاوه بر این، ماهیت پیش ساخته بودن این نوع سقف، تولید اعضای بتنی با مقاومت فشاری بالا و دقت ساخت بالاتر را ممکن می‌سازد. با بهره‌گیری از دال‌های پیش ساخته، نیاز به بتن ریزی درجا، قالب بندی و آرماتور بندی در سازه‌های فولادی حذف می‌گردد که این امر منجر به افزایش سرعت ساخت، کاهش نیروی انسانی مورد نیاز و کاهش هزینه می‌شود. هم‌چنین استفاده از بتن HPC، نفوذپذیری در محیط‌های مهاجم را کاهش می‌دهد که افزایش دوام سقف سازه را به دنبال دارد.



(ب)



(الف)

شکل ۱۱: خیز تیر سازه‌ی نگهدارنده‌ی نمونه‌ی کامپوزیت. (الف) خیز ناخواسته‌ی تیر سازه‌ی نگهدارنده و (ب) فاصله‌ی بین ریسمان و سطح زیرین بال پایینی تیر سازه‌ی نگهدارنده

۴- نتیجه گیری

هدف از پژوهش انجام شده بررسی رفتار یک سیستم سقف نوین کامپوزیت فولادی-بتنی متشکل از دال‌های پیش ساخته از جنس بتن پرمقاومت با عملکرد بالا (HPC)، تیرهای فولادی با گل میخ‌های از پیش جوش شده و گروت پر مقاومت به عنوان کلید برشی بود. پس از دستیابی به طرح اختلاط بتن HPC، نمونه‌ای از دال پیش ساخته‌ی مورد استفاده در نمونه‌ی کامپوزیت تحت آزمایش خمش چهار نقطه‌ای قرار گرفت و رفتار خمشی آن بررسی شد. برای سنجش صحت عملکرد کامپوزیت سقف کامپوزیت فولادی-بتنی معرفی شده، نمونه‌ای بزرگ مقیاس طراحی و ساخته شد و تحت بارگذاری گسترده توسط بلوک گذاری قرار گرفت. نتایج به دست آمده به شرح زیر است:

۱. نمونه‌ی کامپوزیت با وجود تحمل ۱۵/۲ کیلو نیوتن بر متر مربع بار گسترده، تنها دچار ترک‌های ریز شد و تغییر شکل‌های پلاستیک از خود نشان نداد.
۲. با مقایسه‌ی حداکثر تغییر مکان حاصل از آزمایش و حداکثر تغییر مکان محاسباتی نمونه‌ی کامپوزیت با فرض عملکرد کاملاً کامپوزیت مقطع، مشخص گردید که نتایج آزمایشگاهی ۶/۷٪ حداکثر تغییر مکان کمتری نشان داده است.

۳. سقف کامپوزیت فولادی-بتنی معرفی شده الزامات حالت حدی بهره برداری را برای اکثر کاربری‌های مسکونی و اداری برآورده می‌سازد، به طوری که بر اساس دو ترکیب بار حالت حدی بهره برداری $D + L$ و $D + 0.5L$ ، می‌تواند به ترتیب ۵/۱۷ کیلو نیوتون بر متر مربع و ۱۰/۳۴ کیلو نیوتون بر متر مربع بار زنده تحمل کند.

در تحقیقات آینده برای بهبود عملکرد سقف کامپوزیت فولادی-بتنی معرفی شده می‌توان تغییراتی را در طراحی اعمال نمود. با تغییر شکل مقطع دال پیش ساخته از مستطیلی به کنگره‌ای شکل، سختی مقطع افزایش می‌یابد و نیمی از قسمتی از بتن که در کشش عملکردی ندارد حذف می‌شود. همچنین استفاده از الیاف مقرون به صرفه به منظور بهبود شکل پذیری دال‌های پیش ساخته و ساخت دال‌های پیش ساخته از بتن بدون سیمان برای به حداقل رساندن آسیب‌های محیط زیستی ارزشمند است. علاوه بر این می‌توان اتصال میان گروت و دال‌های پیش ساخته را با تعبیه‌ی میلگردهای بیرون زده در دال و شیارزنی کناره‌های دال بهبود بخشید.

مراجع

- [1] Block, P., Calvo Barentin, C., Ranaudo, F. and Paulson, N. (2020). *Imposing challenges, disruptive changes: rethinking the floor slab*. In: *The Materials Book*. Berlin: Ruby Press, pp.214–219.
- [2] Tan, X., Fang, Z., Peng, Z., Zheng, H., Tang, S. and Liao, Y. (2022). Tensile behavior of a prefabricated Steel-UHPC composite deck system with notched perfobond strips. *Engineering Structures*, 268, p.114737. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.114737>
- [3] Han, C.X., He, H.L., Luo, Q.J., Zhao, Y.L. and Zhang, J.C. (2024). Experimental and theoretical study on static performance of prefabricated steel-bar truss frame-precast concrete composite hollow-core slabs. *Structures*, 61, p.105971. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2024.105971>
- [4] Pang, R., Zhang, L., Zhang, T., Dang, L. and Wang, W. (2023). Experimental study and numerical simulation on the transverse force transmission mechanism of discretely connected precast RC floor. *Structures*, 56, p.104842. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.07.032>
- [5] Wang, H., Liu, X.G., Yue, Q.R. and Zheng, M.Z. (2022). Shear resistance of a novel wet connection for prefabricated composite beams under shear-bending coupling loading. *Journal of Building Engineering*, 45, p.103636. <https://doi.org/10.1016/j.job.2021.103636>
- [6] Wang, H., Wang, N., Liu, X.G., Yue, Q.R., Yan, J.L. and Zhang, Y. (2024). Effects of UHPC shear key on strengthening shear performances of wet joint in prefabricated composite beams. *Engineering Structures*, 299, p.117130. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.117130>
- [7] Yan, J.L., Liu, H., Zhang, Y., Yue, Q. and Liu, X.G. (2024). Tensile and flexural performances of prefabricated slabs with wet UHPC connection. *Journal of Building Engineering*, 93, p.109870. <https://doi.org/10.1016/j.job.2024.109870>
- [8] Fang, S., Zhang, S., Cao, Z., Zhao, G., Fang, Z., Ma, Y. and Jiang, H. (2023). Effects of stud aspect ratio and cover thickness on push-out performance of thin full-depth precast UHPC slabs with grouped short studs: Experimental evaluation and design considerations. *Journal of Building Engineering*, 67, p.105910. <https://doi.org/10.1016/j.job.2023.105910>
- [9] Fang, Z., Fang, H., Huang, J., Jiang, H. and Chen, G. (2022). Static behavior of grouped stud shear connectors in steel-precast UHPC composite structures containing thin full-depth slabs. *Engineering Structures*, 252, p.113484. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2021.113484>
- [10] Benedetty, C.A., dos Santos, V.B., Krahl, P.A., Rossi, A., de Andrade Silva, F., Cardoso, D.C.T. and Martins, C.H. (2023). Flexural and shear behavior of steel-UHPC composite beams: a review. *Engineering Structures*, 293, p.116649. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2023.116649>
- [11] Zhang, Y., Cai, S., Zhu, Y., Fan, L. and Shao, X. (2020). Flexural responses of steel-UHPC composite beams under hogging moment. *Engineering Structures*, 206, p.110134. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.110134>
- [12] Zhu, Y., Zhang, Y., Hussein, H.H. and Cai, S. (2020). Flexural study on UHPC-steel composite beams with joints under negative bending moment. *Journal of Bridge Engineering*, 25(10), p.04020084. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)BE.1943-5592.0001619](https://doi.org/10.1061/(ASCE)BE.1943-5592.0001619)

- [13] de Oliveira, V.M., dos Santos, V.B., Rossi, A., Benedito, A.V., Krahl, P.A., Martins, C.H., de Andrade Silva, F. and Cardoso, D.C.T. (2025). Steel-UHPC composite castellated beams under hogging bending: Experimental and numerical investigation. *Engineering Structures*, 331, p.120012. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2025.120012>
- [14] Lopes, E. and Simoes, R. (2008). Experimental and analytical behaviour of composite slabs. *Steel and Composite Structures*, 8(5), pp.361–388. <https://doi.org/10.12989/SCS.2008.8.5.361>
- [15] Melcher, J., Karmazinova, M., Krsik, J. and Krivakova, J. (2016). Verification of experiment of vacuum loading on slab. In: *Advances and Trends in Engineering Sciences and Technologies II: Proceedings of the 2nd International Conference on Engineering Sciences and Technologies*. High Tatras Mountains, Slovak Republic: CRC Press, pp.201. <https://doi.org/10.1201/9781315393827-36>
- [16] Shen, G.L. (2001). *Performance evaluation of new corrugated-type embossments for composite deck*. PhD thesis. Virginia Tech. Available at: <http://hdl.handle.net/10919/34452> [Accessed 8 September 2025].
- [17] John, K., Ashraf, M., Weiss, M. and Al-Ameri, R. (2023). Experimental study and numerical modelling of a novel two-way steel-concrete composite slab. *Structures*, 57, p.105096. <https://doi.org/10.1016/j.istruc.2023.105096>
- [18] Hamada, H.M., Abed, F., Katman, H.Y.B., Humada, A.M., Al Jawahery, M.S., Majdi, A., Yousif, S.T. and Thomas, B.S. (2023). Effect of silica fume on the properties of sustainable cement concrete. *Journal of Materials Research and Technology*, 24, pp.8887–8908. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2023.05.147>
- [19] Mostofinejad, D., Bahmani, H. and Afshar, J. (2023). Prediction of mechanical properties of high-performance concrete (HPC) reinforced with steel fibers. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 47(4), pp.1971–1993. <https://doi.org/10.1007/s40996-023-01126-6>
- [20] Sanjuán, M.Á., Argiz, C., Gálvez, J.C. and Moragues, A. (2015). Effect of silica fume fineness on the improvement of Portland cement strength performance. *Construction and Building Materials*, 96, pp.55–64. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.07.092>
- [21] ASTM International. (2024). *ASTM C39/C39M-24: Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://www.astm.org> [Accessed 8 September 2025].
- [22] ASTM International. (2021). *ASTM C1611/C1611M-21: Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://www.astm.org> [Accessed 8 September 2025].
- [23] ASTM International. (2017). *ASTM D3039/D3039M-17: Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://www.astm.org> [Accessed 8 September 2025].
- [24] ASTM International. (2024). *ASTM E8/E8M-24: Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://www.astm.org> [Accessed 8 September 2025].
- [25] Iran Concrete Technical Specialized Clinic Group. (2025). *Dezoflow FH-1000*. Tehran (IR). Available at: <https://clinicbeton.com> [Accessed 8 September 2025].
- [26] ASTM International. (2020). *ASTM C1437-20: Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://www.astm.org> [Accessed 8 September 2025].
- [27] ASTM International. (2023). *ASTM C230/C230M-23: Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement*. West Conshohocken, PA: ASTM International. Available at: <https://www.astm.org> [Accessed 8 September 2025].
- [28] Noor, F.A. and Boswell, L.F. (1992). *Small scale modelling of concrete structures*. London: Elsevier Applied Science.
- [29] American Institute of Steel Construction (AISC). (2022). *ANSI/AISC 360-22: Specification for structural steel buildings*. Chicago, IL: American Institute of Steel Construction.
- [30] Opkon Optik Elektronik A.S. (2025). *OPKON LPS 100*. Available at: <https://www.opkon.com.tr/Content/product/pdf/pdf-6f5cef66.pdf> [Accessed 8 September 2025].
- [31] Tokyo Measuring Instruments Laboratory Co., Ltd. (TML). (2025). *Data Logger TDS-540*. Available at: https://www.tml.jp/eng/documents/Catalog/TDS-540_E3011F.pdf [Accessed 8 September 2025].
- [32] American Society of Civil Engineers (ASCE). (2022). *ASCE/SEI 7-22: Minimum Design Loads and Associated Criteria for Buildings and Other Structures*. Reston, VA: ASCE. <https://doi.org/10.1061/9780784415788>