

Comparison of the Behavior of RC Slab Repaired with Cement-Based Mortars Containing Nanoparticles and CFRP Sheets under Monotonic Loading and Fatigue

hossein Nematian jelodar^{1*}, Ata Hojat kashani², Rahmat Madandoust³, Abbas Akbarpour⁴, seyed azim hosseini⁵

¹ Assistant Professor, Department of civil Engineering, Chalus Branch, Islamic Azad University, Chalus, Iran.

² Assistant Professor, Department of civil Engineering, Chalus Branch, Islamic Azad University, Chalus,, Iran.

³ Professor,, Department of civil Engineering, University of Guilan,, Rasht., Iran.

⁴ Assistant Professor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

⁵ Associate Proffessor, Department of Civil Engineering, South Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran

ABSTRACT

It is important to repair damaged buildings due to various factors, especially earthquake loads and fatigue. In recent years, extensive research has been done on the repair and strengthening of concrete buildings in the construction industry. In this the Experimental study, circular fiber concrete slabs was made according to the ASTM C1550 standard and The concrete mixing design was based on the target compressive strength of 45 MPa with macrosynthetic fibers equal to 0.5% of the concrete volume, and after Curing for a period of 28 days have been subjected to monotonic loading, then cracked fiber concrete slabs were repaired with repair mortars, CFRP sheet separately and again subjected to monotonic loadings, fatigue with 10000 cycles and also Post-Fatigue Monotonic loading. Mortars include two types of cement-based mortars with 2% Nano-silica + 8% Micro-silica (NS2SF8) and 0.75% polyvinyl alcohol fibers + 10% Micro-Silica (PVA0.75SF10). CFRP sheets have been used in two designs including sheet and full. The behavior of slabs including displacement, bending capacity, type and propagation of cracks has been investigated and compared. The results have shown that the recovery of flexural capacity of slabs repaired with CFRP1, CFRP2 sheets and the slab repaired with PVA0.75SF10 and NS2SF8 repair mortars was 118, 96, 65 and 52%, respectively, compared to the control sample. Fatigue loading has also reduced the capacity of slabs

ARTICLE INFO

Receive Date: 24 January 2024

Revise Date: 07 May 2024

Accept Date: 05 June 2024

Keywords:

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: [10.22065/jsce.2024.436367.3331](https://doi.org/10.22065/jsce.2024.436367.3331)

*Corresponding author:

Email address:

مقایسه رفتار دال بتن آرمه، ترمیم و تقویت شده با ملات‌های سیمانی حاوی نانوذرات و ورق‌های CFRP تحت بارگذاری تدریجی و خستگی

حسین نعمتیان جلودار^{1*}، عطا حجت‌کاشانی²، رحمت‌مدندوست³، عباس اکبرپور²، سیدعظیم‌حسینی⁴

۱- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد چالوس، چالوس، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

۳- استاد، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

۴- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران جنوب، تهران، ایران

چکیده

ترمیم و تقویت ساختمان‌های آسیب دیده در اثر عوامل مختلف بالاخص بارگذاری‌های زلزله و خستگی امری مهم می‌باشد. در سال‌های اخیر تحقیقات گسترده در خصوص ترمیم و تقویت ساختمان‌های بتنی در صنعت ساختمان انجام شده است. در این تحقیق که براساس مطالعات آزمایشگاهی استوار بوده، دال‌های بتن الیافی دایروی شکل بر اساس استاندارد *ASTM C1550* که تاکنون ترمیم این دال‌ها کار نشده، با طرح اختلاط بتن براساس مقاومت فشاری هدف 45 مگاپاسگال متشکل از الیاف مصنوعی (ماکروسینتتیک فورتا) برابر 0/5 درصد حجم بتن، ساخته شده و بعد از عمل‌آوری رطوبتی به مدت 28 روز تحت بارگذاری تدریجی (مونوتونیک) قرار گرفته شده‌اند، سپس دال‌های بتن الیافی ترک خورده با ملات‌های ترمیمی، ورق‌های الیاف کربن (CFRP) بصورت جداگانه ترمیم شده و مجدداً تحت بارگذاری‌های تدریجی (مونوتونیک) قرار گرفته‌اند. همچنین دال‌های ترمیم شده با ملات‌های ترمیمی تحت بارگذاری خستگی با تعداد 10000 سیکل و بارگذاری تدریجی پس از خستگی نیز قرار گرفته شده‌اند. ملات‌های ترمیمی شامل دو نوع ملات پایه سیمانی با ترکیبات نانوسیلیس 2 درصد + میکروسیلیس 8 درصد (NS2SF8) و الیاف پلی ونیل الکل 0/75 درصد + میکروسیلیس 10 درصد (PVA0/75SF10) بوده‌اند. ورق‌های الیاف کربن (CFRP) هم در دو طرح شامل مشبک و کامل استفاده گردیده است. رفتار دال‌ها شامل تغییر مکان قائم مرکز دال، ظرفیت خمشی دال، نوع و نحوه انتشار ترک و میزان جذب انرژی دال‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج نشان داده است که بازیابی ظرفیت خمشی دال‌های ترمیم شده با ورق‌های الیاف کربن با طرح‌های 1 CFRP، 2 CFRP و دال ترمیم شده با ملات‌های ترمیمی PVA0/75SF10 و NS2SF8 به ترتیب برابر 118، 96، 65 و 52 درصد نسبت به نمونه شاهد بوده است. دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10، تحت اثر بارگذاری تدریجی، دارای بیشترین تغییر مکان قائم برابر 25/3 میلی‌متر نسبت به دیگر دال‌های ترمیم شده بوده و دارای الگوی رفتاری بهتر در محدوده بعد از مقاومت نهایی (Post-Peak)، نسبت به دیگر دال‌ها از خود نشان داده است. بارگذاری خستگی در دال‌های ترمیم شده با ملات‌های ترمیمی PVA0/75SF10 و NS2SF8 باعث کاهش میزان انرژی جذب شده به ترتیب برابر 79 درصد و 52 درصد نسبت به نمونه شاهد گردیده است.

کلمات کلیدی: بتن الیافی، ملات‌های ترمیمی، نانوذرات، الیاف PVA، بارگذاری‌های تدریجی و خستگی

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/jsce.2024.436367.3331	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	https://doi.org/10.22065/jsce.2024.436367.3331	1403/11/30	1403/11/30	1403/03/16	1403/02/18	1402/11/04
حسین نعمتیان جلودار					* نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	
hnematiyan@iauc.ac.ir						

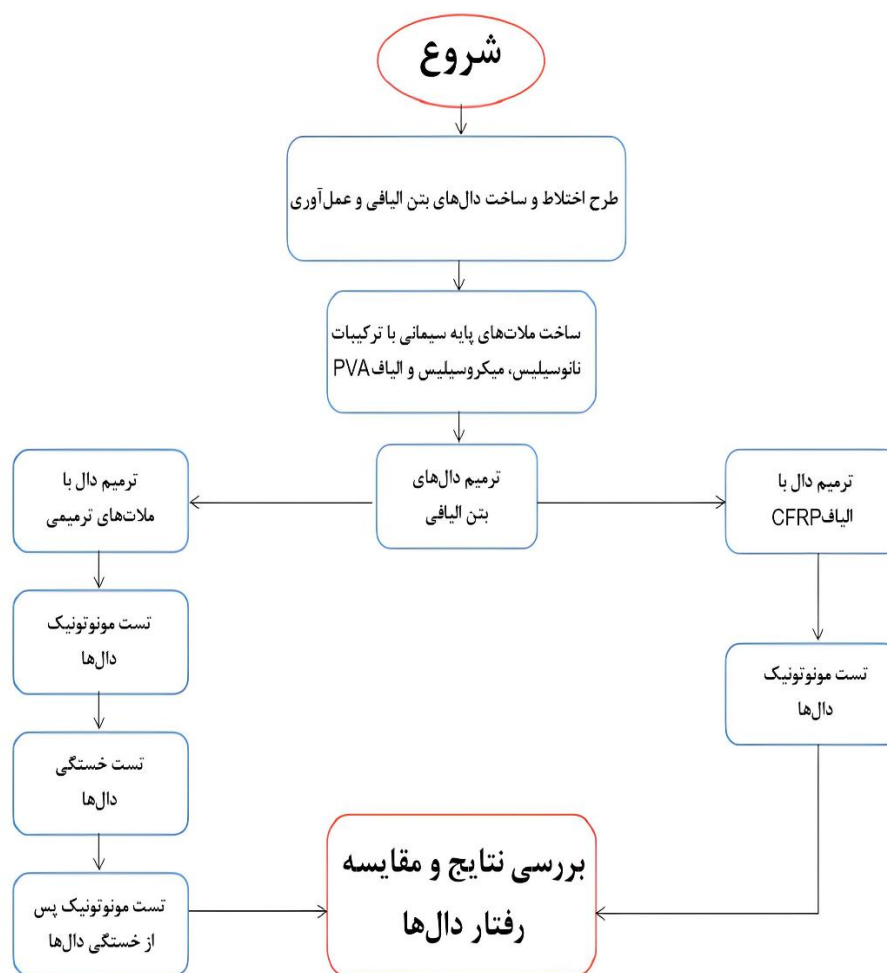
1- مقدمه

از اواسط دهه‌ی 1960 میلادی، آزمایشات و مطالعات متعددی برای بررسی عملکرد سازه‌های بتنی انجام شده است. توجه به مقاوم‌سازی برای بالابردن عملکرد سازه و اتصالات نیز مورد توجه محققین قرار گرفته است. از طرفی نقص در طراحی و اجرا موجب شده است تا سازه‌های بتنی در طول زمان دچار آسیب شوند [1]. یکی از موارد مهم، مصالح بوده بطوریکه مصالح نوین موجود در صنعت ساختمان باید یک یا تعدادی از موارد ظرفیت برشی، خمشی یا محوری، شکل‌پذیری مناسب برای بهبود عملکرد لرزه‌ای، دوام یا پایداری در برابر شرایط محیطی، افزایش عمر گسیختگی، سختی لازم برای کاهش تغییرشکل‌ها تحت اعمال بارهای طراحی و بدون ضریب را دارا باشند. مصالح مرکب با مقاومت بالا، برای بیش از 40 سال در صنعت ساختمان مورد استفاده قرار می‌گرفتند و یکی از ارجح‌ترین مصالح برای تعمیر سازه‌های بتنی هستند. از آنجاییکه این نوع مصالح به طور قابل توجهی سبک می‌باشند، پردازش و نصب آنها در سیستم‌های سازه‌ای به طور قابل ملاحظه‌ای آسان بوده و در بیشتر حالات به تجهیزات سنگینی جهت نصب نیاز ندارند. کامپوزیت‌ها دارای مقاومت بالایی در برابر خردگی هستند. اگرچه مصالح آنها گران می‌باشند، لکن قیمت نهایی تعمیر سازه با این روش مناسب است چرا که به علت سهولت نصب مدت زمان اجرا را کاهش می‌دهد [2]. استفاده از نانو و الیاف در صنعت ساختمان کاربرد زیادی داشته و استفاده از الیاف¹ EVA در ملات‌های پایه سیمانی باعث افزایش مقاومت فشاری و مقاومت خمشی به ترتیب برابر 33 درصد و 63 درصد گردیده است [3]. استفاده نانو سیلیس و نانومواد کربن باعث افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی در خمیر سیمان گردیده است [4]. همچنین الیاف شیشه خواص ملات را بهبود بخشیده و باعث افزایش مقاومت‌های فشاری نمونه‌ها گردیده است [5]. از پوسته صدف بعنوان مواد پرکننده در ملات استفاده شده است و نتایج نشان داده است که زمان گیرش و اسلامپ با کاهش اندازه ذرات پوسته کاهش یافته است [6]. همچنین سرعت بارگذاری نیز باعث افزایش مقاومت‌های فشاری و خمشی ملات حاوی الیاف گردیده است [7]. استفاده از انواع الیاف مصنوعی در بتن و ملات باعث افزایش مقاومت پیوستگی نمونه‌ها به میزان 85 درصد نسبت به نمونه‌های بدون الیاف گردیده است [8]. همچنین در مطالعات آزمایشگاهی مشخص گردید که وجود الیاف پلی ونیل الکل (PVA) در ترکیبات دوتایی و سه‌تایی، برای نمونه‌هایی که میزان الیافشان برابر 0/75 درصد بوده‌اند، ترک روی پل در آنها حفظ گردیده است [9]. یکی از عوامل مخرب سازه‌های بتنی، حرارت بالا می‌باشد و در همین راستا در مطالعه آزمایشگاهی نشان داده شده است که حرارت بالا باعث پوسته پوسته شدن بتن‌های الیافی متشکل از الیاف مصنوعی (ماکروسینتتیک فورتا) نگردیده ولی باعث کاهش ظرفیت دال به میزان 89/3 درصد و همچنین باعث کاهش جذب انرژی دال بتن الیافی نسبت به نمونه شاهد گردیده است. [10].

در این مطالعه آزمایشگاهی، دال بتن الیافی دایروی شکل براساس استاندارد ASTM C1550 [11]، ساخته شده و تحت نیروی تدریجی تا آستانه خرابی، بارگذاری گردیده است. سپس دال فوق توسط دو نوع ملات ترمیمی انتخاب شده از مرجع شماره [9] و ورق‌های الیاف کربن (CFRP)، ترمیم گردیده است. ملات‌های ترمیمی شامل ملات پایه سیمانی با ترکیبات نانو سیلیس 2 درصد + میکروسیلیس 8 درصد (NS2SF8) و ملات پایه سیمانی با ترکیبات الیاف پلی ونیل الکل 0/75 درصد + میکروسیلیس 10 درصد (PVA0/75SF10) بوده است. دال‌های ترمیم شده تحت بارگذاری تدریجی قرار گرفته و رفتار دال‌ها شامل ظرفیت خمشی، نوع و عرض ترک‌ها، تغییرمکان قائم مرکز دال و میزان جذب انرژی با نمونه شاهد مقایسه گردیده شده است. در ادامه، تعدادی دیگر از دال‌های ترمیم شده با ملات‌های ترمیمی تحت بارگذاری خستگی با تعداد 10000 سیکل قرار گرفته و بعد از آن مجدداً تحت بارگذاری تدریجی پس از خستگی قرار گرفته شده و مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته‌اند. از آنجاییکه آزمایش خستگی در دال‌های ترمیم شده با ورق‌های الیاف کربن (CFRP)، نیاز به تعداد سیکل‌های بالا بوده و این امکان برای دستگاه در آزمایشگاه محل انجام آزمایش مقدور نبوده و انجام نگردیده است. موضوع ترمیم دال بتنی الیافی دایروی شکل که ترمیم اینگونه دال تاکنون کار نگردیده بعنوان نوآوری این کار آزمایشگاهی بوده و هدف بررسی و مقایسه دال ترمیم شده با ملات‌های ترمیمی و الیاف‌های کربن بوده است.

2- برنامه آزمایشگاهی

فلوچارت کار آزمایشگاه شامل ساخت دال‌های بتن الیافی و ملات‌های ترمیمی، عملیات ترمیم و عمل‌آوری دال‌ها و انجام آزمایشات در شکل 1 نشان داده شده است.



شکل 1: فلوچارت کار آزمایشگاهی

2-1- مشخصات فیزیکی مصالح:

مصالح در این تحقیق در دو بخش بوده که بخش اول برای ساخت دال‌های بتن الیافی و بخش دوم برای ساخت ملات‌های ترمیمی و ورق‌های الیاف کربن (CFRP) بوده است. مصالح برای ساخت دال شامل سیمان، مصالح سنگی، آب، الیاف مصنوعی (ماکروسینتتیک) و مواد فوق‌روان‌کننده بوده و مصالح برای ساخت ملات‌های ترمیمی شامل سیمان، ماسه سیلیس استاندارد، نانوسیلیس، میکروسیلیس، الیاف پلی‌ونیل‌الکل (PVA)، آب و مواد فوق‌روان‌کننده بوده است. در وسط لایه ترمیم از مش فایبرگلاس نیز استفاده شده است. مصالح سیمان، آب و مواد فوق‌روان‌کننده برای ساخت بتن دال و ملات ترمیمی مشترک بوده است. سیمان از پرتلند نوع یک و از کارخانه سیمان دلیجان با مشخصات وزن مخصوص و نرمی به ترتیب برابر 3090 کیلوگرم بر سانتیمتر مکعب و 3299000 سانتیمتر مربع بر کیلوگرم بوده و دلیل خاصی

برای استفاده از سیمان پرتلند نوع یک نبوده و از مش‌های فایبرگلاس موجود در بازار استفاده شده است. آب مصرفی برای تهیه بتن و ملات ترمیمی، آب آشامیدنی تهران بوده و فوق‌روان‌کننده نسل سوم بر پایه کربوکسیلات‌های اصلاح شده اتر با نام تجاری PS-10 به میزان نیم درصد وزن سیمان استفاده شده است. مشخصات فوق‌روان‌کننده در جدول 1 آمده است.

جدول 1: مشخصات فوق‌روان‌کننده [9]

کلراید (پی.پی.ام)	چگالی (کیلوگرم بر مترمکعب)	حالت فیزیکی	رنگ	طبیعت یونی	ترکیبات شیمیایی
Max 500	1090 at 20°C	مایع	قهوه ای روشن	آینونی	پلیمرهای اصلاح شده پلی کربوکسیلیک اسید

مصالح سنگی برای تهیه بتن با درصد شکستگی 45 درصد از معدنی واقع در غرب تهران تهیه گردیده است. مقادیر وزن مخصوص، درصد رطوبت و جذب آب برای شن به ترتیب برابر 2582 کیلوگرم بر مترمکعب، 0/942 درصد و 1/9 درصد بوده و مقادیر وزن مخصوص، درصد رطوبت، جذب آب و نرمی برای ماسه به ترتیب برابر 2536 کیلوگرم بر مترمکعب، 2/35 درصد، 3/2 درصد و 3/4 بوده است. دانه‌بندی مصالح سنگی شامل شن به میزان 50 درصد و ماسه به میزان 50 درصد براساس استاندارد طرح مخلوط بتن ایران [12] بوده و مشخصات دانه بندی در جدول 2 آمده است.

جدول 2: دانه بندی شن و ماسه برای ساخت بتن الیافی [9]

اندازه الک م.م	19	12/5	9/5	4/75	2/38	1/19	0/6	0/3	0/15
درصد عبوری شن	100	64	25/1	5/5	-	-	-	-	-
درصد عبوری ماسه	100	100	100	95/9	65/1	45/3	30/8	15	4/2
50 درصد شن + 50 درصد ماسه	100	82	62/55	50/7	32/55	22/65	15/4	7/5	2/1
دامنه مجاز	100	75-90	84-62	38-70	56-23	43-14	8-31	20-4	2-10
درصد های موثر برای تعیین نرمی	0	-	37/45	49/3	67/45	77/35	84/6	92/5	97/9

برای مسلح نمودن بتن دال، از الیاف مصنوعی (ماکروسینتتیک فورتا) با مشخصات وزن مخصوص، طول الیاف، مقاومت کششی، کرنش نهایی، رنگ به ترتیب برابر 910 کیلوگرم بر مترمکعب، 54 میلیمتر، 693 مگاپاسکال، 11/2 درصد، خاکستری و شکل الیاف به صورت مونوفیلامنت و فیبری استفاده شده و برای ساخت ملات ترمیمی از الیاف پلی ونیل الکل (PVA) با مشخصات وزن مخصوص، طول الیاف، قطرالیاف، مقاومت کششی، مدول الاستیسیته و کرنش نهایی به ترتیب برابر 1300 کیلوگرم بر مترمکعب، 6 میلیمتر، 16 میکرومتر، 1600 مگاپاسکال، 40 گیگاپاسکال و 7 درصد مطابق شکل 2 استفاده شده است.



ب-الیاف PVA برای ساخت ملات ترمیمی

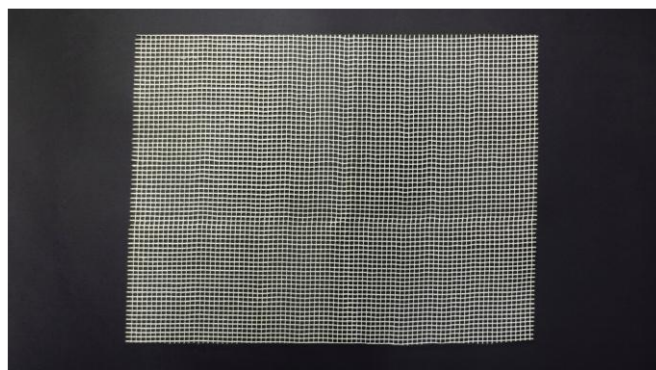
الف-الیاف ماکروسینتتیک فور تا برای ساخت بتن الیافی

شکل 2: الف-الیاف مصنوعی (ماکروسینتتیک)، ب-الیاف پلی ونیل الکل (PVA) [9]

در ساخت ملات‌های ترمیمی از ماسه سلیس استاندارد براساس استاندارد شماره 3040 ایران [13] و نانوسیلیس کلونیدی با مشخصات قطر برابر 15 نانومتر، سطح مخصوص برابر 170000 مترمربع بر کیلوگرم، درصد جامد برابر 18 درصد، چگالی برابر 1120 کیلوگرم بر مترمکعب، خلوص بالای 98 درصد، ویسکوسیته کمتر از 10 و با PH برابر 8/5 استفاده شده و میکروسیلیس نیز با چگالی 2160 کیلوگرم بر مترمکعب و با نرمی 199980000 سانتیمترمربع بر کیلوگرم استفاده گردیده است. برای افزایش کارایی و مقاومت کششی ملات‌های ترمیمی از مش فایبرگلاس به ضخامت 0/48 میلیمتر و با چشمه‌های 4 × 4 میلیمتر در وسط ضخامت ملات ترمیمی استفاده شده است. مشخصات مش فایبرگلاس در جدول 3 و تصویر آن در شکل 3 آمده است. همچنین برای ترمیم دال بتن الیافی از ورق‌های کربن (CFRP) با ضخامت برابر 0/11 میلیمتر، وزن مخصوص 1810 کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت کششی 3500 مگاپاسکال، مدول الاستیسیته برابر 215 گیگاپاسکال و کرنش نهایی برابر 1/4 درصد استفاده شده است. چسب بکار رفته در این بخش از نوع اپوکسی (Epoxy Dur 300) با وزن مخصوص 1160 کیلوگرم بر مترمکعب، مقاومت کششی 45 مگاپاسکال و از دیاد طول 15 درصد استفاده گردیده است.

جدول 3: مشخصات مش فایبرگلاس بکار گرفته شده در ملات‌های ترمیمی [9]

رنگ	مقاومت کششی (کیلوگرم بر 5 سانتیمتر)	وزن مترمربع (کیلوگرم)	ضخامت (میلیمتر)	عرض مش فایبرگلاس (میلیمتر)
سفید	16040	0/122	0/48	1000



شکل 3: مش فایبرگلاس بکار گرفته شده در ملات‌های ترمیمی [9]

2-2- طرح اختلاط و ساخت نمونه‌ها

طرح اختلاط بتن برای مقاومت فشاری هدف ۴۵ مگاپاسکال و با الیاف مصنوعی (ماکروسینتتیک فورتا) 0/5 درصد حجم بتن، نسبت آب به سیمان ۰/۴۴۸، آب آزاد به میزان ۱۷۹ لیتر، مواد فوق‌روان‌کننده به میزان ۰/۵ درصد وزن سیمان برای اسلامپ ۱۲ سانتیمتر و با وزن بتن برابر ۲۳۱۴ کیلوگرم بر مترمکعب براساس روش طرح مخلوط بتن ایران در جدول ۴ آمده است. دال براساس استاندارد ASTM C1550 با قطر برابر ۷۵۰ میلیمتر و ضخامت برابر ۷۵ میلیمتر بوده و تعداد دال‌های دایروی شکل ساخته شده برابر ۸ دال مطابق شکل ۴، بوده است.

جدول ۴: مشخصات و میزان مصالح مصرفی برای یک مترمکعب بتن الیافی [۹]

ردیف	نوع مصالح	مقدار (kg)
1	شن	873
2	ماسه	856
3	سیمان	400
4	آب	179
5	الیاف ماکروسینتتیک فورتا	4/55
6	فوق‌روان‌کننده	2

3-2- نگهداری و عمل‌آوری نمونه‌ها

نمونه‌ها بعد از مدت ۲۴ ساعت از قالب خارج شده و با آب در دمای ثابت 20 ± 1 درجه سانتیگراد، عملیات عمل‌آوری رطوبتی و با استفاده از گونی و خیساندن با آب به مدت ۲۸ روز اقدام گردیده است.



شکل ۴: ساخت نمونه‌های دال بتن الیافی دایروی شکل براساس استاندارد ASTM C1550

طرح اختلاط ملات‌های ترمیمی شامل ملات پایه سیمانی بر اساس استاندارد شماره 393 ایران با ترکیبات نانوسیلیس 2درصد+ میکروسیلیس 8درصد (NS2SF8) و ملات پایه سیمانی با ترکیبات الیاف پلی ونیل الکل 0/75درصد+میکروسیلیس 10درصد (PVA0/75SF10) و ساخت آنها برگرفته از مرجع شماره [9] بوده و مشخصات طرح اختلاط در جدول 5 آمده است.

جدول 5: طرح اختلاط ملات‌های پایه سیمانی برگرفته از مرجع شماره [9]

ردیف	نوع ملات ترمیمی	ماسه سیلیس گرم	سیمان گرم	آب گرم	نانوسیلیس گرم	میکروسیلیس گرم	الیاف PVA گرم	فوق‌روان‌کننده گرم
1	NS2SF8	1350	405	184	50	36	--	3/2
2	PVA0/75SF10	1350	405	225	--	45	8/78	17/01

4-2- ترمیم دال‌های بتن الیافی دایروی شکل:

دال‌های بتن الیافی با استفاده از ملات‌های ترمیمی و ورق کربن (CFRP) بصورت جداگانه ترمیم و تقویت شده‌اند. از طرفی براساس استاندارد DIN EN 1504 [14]، که یکی از استانداردهای مطرح در زمینه تعمیر و ترمیم می‌باشد، لایه ترمیم با ضخامت بیش از 3 میلیمتر باید در دو لایه انجام گردد. در همین راستا بعد از آماده‌سازی سطح کار ابتدا لایه اول ملات ترمیمی پهن شده و سپس مش فایبرگلاس به ضخامت 0/45 میلیمتر روی لایه اول قرار گرفته و در نهایت لایه دوم ملات ترمیمی پهن، تسطیح و در نهایت سطح کار پرداخت گردیده شده و با ضخامت کل لایه ترمیمی برابر 7 میلیمتر اجرا گردیده است. ترمیم دال با ورق کربن (CFRP) در دو طرح، شامل طرح مشبک (طرح 1) که در دو لایه عمود بر هم با نوارهای به عرض 100 میلیمتر و طرح کامل (طرح 2) در یک لایه انجام گردیده است. نمونه‌هایی از ترمیم دال در شکل 5 آمده است. کلیه عملیات طرح اختلاط، ساخت، عمل‌آوری و ترمیم نمونه‌ها در آزمایشگاه‌های بتن، مقاومت مصالح و مکانیک سنگ دانشگاه امیرکبیر انجام پذیرفته است.



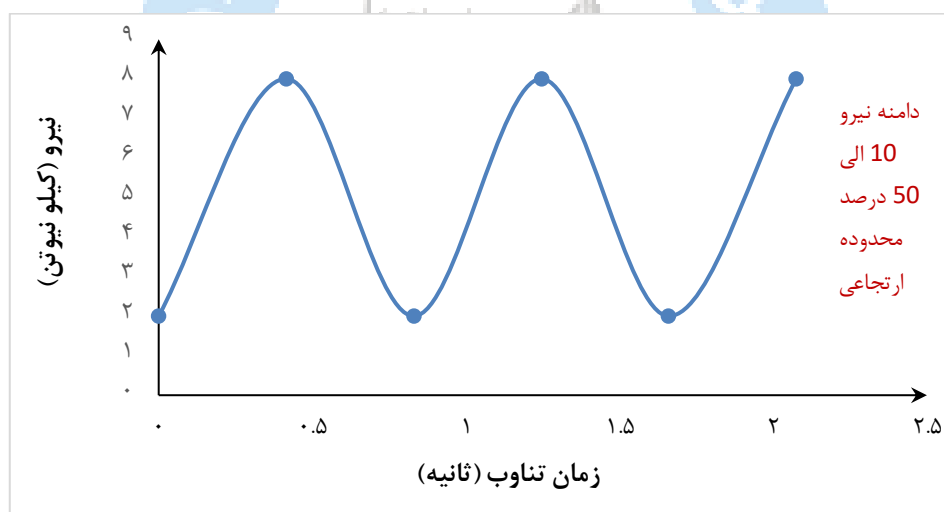
الف- با ملات ترمیمی NS2SF8 ب- با ورق کربن (CFRP) بصورت مشبک (طرح 1)

شکل 5: ترمیم دال بتن الیافی

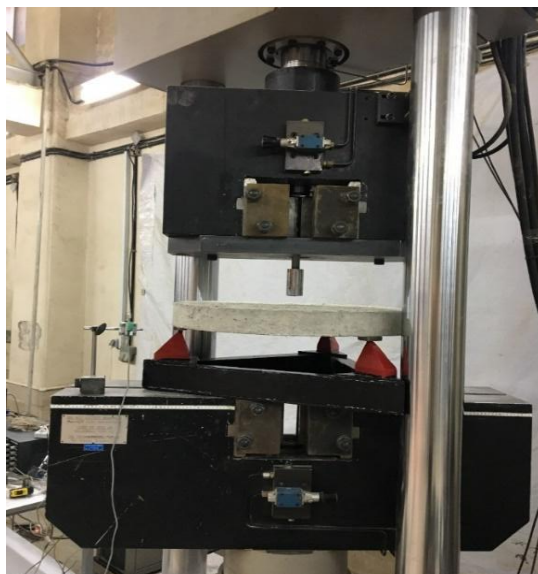
2-5- بارگذاری های تدریجی (مونوتونیک) و خستگی

برای انجام آزمایش های تدریجی (مونوتونیک)، خستگی و مونوتونیک پس از خستگی^۲ دال های بتن یافی سازه پایه (نمونه شاهد) و ترمیم شده از دستگاه Dartec9600 ساخت کشور انگلستان واقع در آزمایشگاه مکانیک سنگ دانشگاه امیرکبیر با ظرفیت ۱۰۰ تن استفاده گردیده است. بارگذاری تدریجی به صورت کنترل-تغییرمکان بوده و براساس استاندارد ASTM C1550 نرخ بارگذاری وارد بر مرکز نمونه جهت جلوگیری از ترک زود هنگام، حداکثر 0/066 میلیمتر بر ثانیه بوده که در این تحقیق با یک روند سعی و خطا آزمایشگاهی، برای جلوگیری از بروز ترک زود هنگام نرخ بارگذاری برابر ۰/۰۰۴ میلیمتر بر ثانیه در نظر گرفته شده است.

بارگذاری خستگی به صورت کنترل-نیرو (بارگذاری و باربرداری) با فرکانس و دامنه ثابت بوده و با سیکل بالا^۳ با تعداد سیکل بیش از 10000 بوده که برای محدوده ارتجاعی (الاستیک) استفاده گردیده است [15]. با توجه به اینکه در مقالات مختلف، بارگذاری خستگی در محدوده کمتر از تنش تسلیم توصیه گردیده، از اینرو در این کار آزمایشگاهی دامنه بارگذاری بین ۱۰ الی ۵۰ درصد محدوده ارتجاعی در نظر گرفته شده است. بارگذاری خستگی به شکل سینوسی با داده برداری برای هر 0/1 ثانیه یکبار بوده و فرکانس را تا حد توان دستگاه بالا برده تا دامنه های مورد نظر در محدوده ارتجاعی انجام پذیرد در همین راستا بار سینوسی با فرکانس ۱/۲ هرتز انجام پذیرفته است. دامنه نیرو در بارگذاری خستگی در شکل 6 نشان داده شده است. نمونه ای از آزمایش دال بتن یافی با دستگاه Dartec9600 در شکل 7 آمده است. در تحقیق حاضر، بارگذاری خستگی برای نمونه های دال ترمیم شده با ملات های ترمیمی بکار گرفته شده و از آنجاییکه تست خستگی در دال های ترمیم شده با ورق های الیاف کربن (CFRP)، نیاز به تعداد سیکل های بیش از 10000 سیکل بوده و این شرایط برای دستگاه موجود در آزمایشگاه مقدور نبوده است.



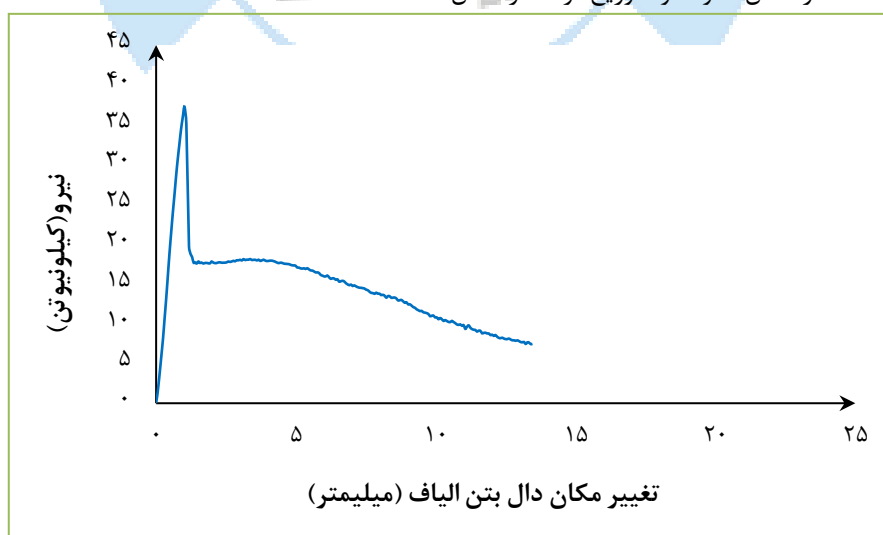
شکل 6: جزئیات بارگذاری خستگی



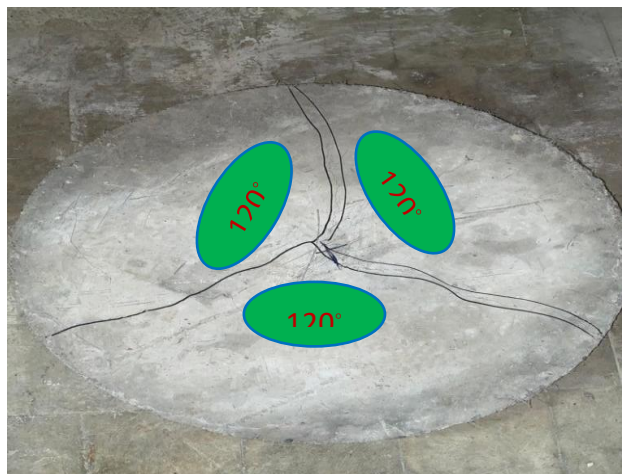
شکل 7: آزمایش خمشی دال بتن الیافی دایروی شکل نمونه شاهد دستگاه Dartec9600

3- آزمایشات دال بتن الیافی

دال‌های بتن الیافی دایروی شکل در ابتداء تحت بارگذاری تدریجی قرار گرفته و پارامترهای نیرو، تغییرمکان قائم مرکز دال، شکل توزیع ترک و مقادیر عرض ترک در هنگام بارگذاری و میزان جذب انرژی مورد بررسی قرار گرفته‌اند. نیرو به صورت تدریجی تا مرز خرابی دال ادامه داده شده است. حداکثر نیروی قائم برابر 37/26 کیلونیوتن در تغییرمکان قائم برابر 1 میلیمتر بوده و زمان آزمایش تا لحظه خرابی برابر 219 ثانیه و با عرض ترک 14 میلیمتر ثبت گردیده است. رفتار دال‌ها به صورت ترد و شکننده بوده و تعداد 3 ترک بصورت شعاعی از مرکز دال ثبت گردیده که با الگوی ترک در استاندارد ASTM C1550 مطابقت داشته است. نمودار نیرو-تغییرمکان قائم مرکز دال بتن الیافی نمونه شاهد در شکل 8 و نحوه توزیع ترک در شکل 9 آمده است.

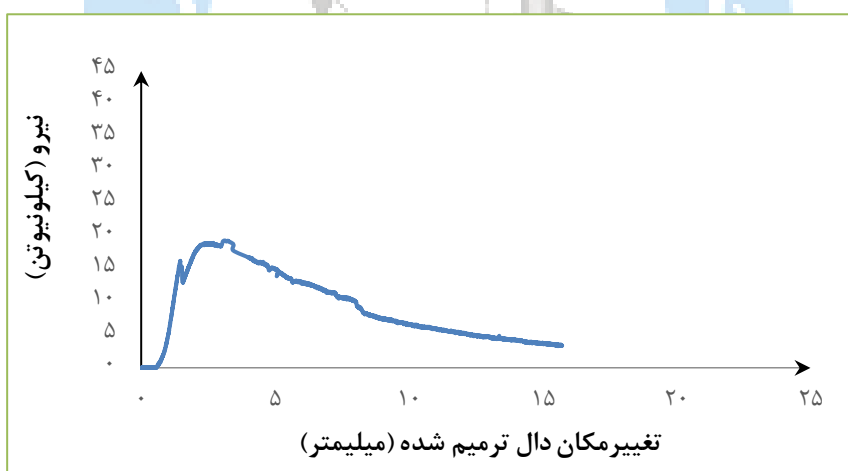


شکل 8: نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی دایروی شکل نمونه شاهد

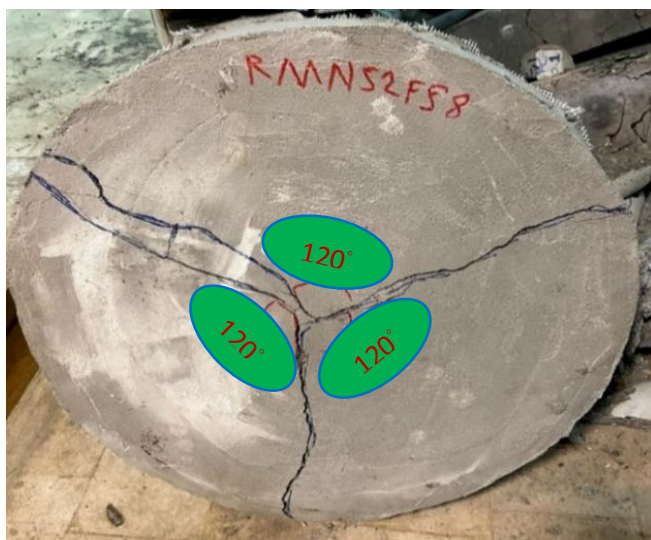


شکل 9: شکل ترک شعاعی در دال بتن الیافی دایروی شکل نمونه شاهد

نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 تحت بارگذاری تدریجی در شکل 10 آمده است. حداکثر نیرو برابر 19/31 کیلونیوتن در تغییر مکان برابر 3/1 میلیمتر حاصل گردیده است. سپس با شیب ملایم از نیرو کاسته شده است. رفتار دال به صورت شکل پذیر بوده و از مرکز دال سه ترک و با زاویه‌های 120 درجه به سمت لبه دال مطابق شکل 11 گسترش یافته است. زمان شروع بارگذاری تا لحظه گسیختگی به مدت 3181 ثانیه و عرض ترک در این مدت برابر 12 میلیمتر بوده بدست آمده است. نتایج این ترمیم نشان داده که زمان خرابی دال ترمیم شده حدود 14/5 برابر بیشتر از نمونه شاهد بوده و تغییر مکان قائم دال در لحظه خرابی 2/7 میلیمتر بیشتر از تغییر مکان نمونه شاهد بدست آمده است.



شکل 10: نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 تحت بارگذاری تدریجی

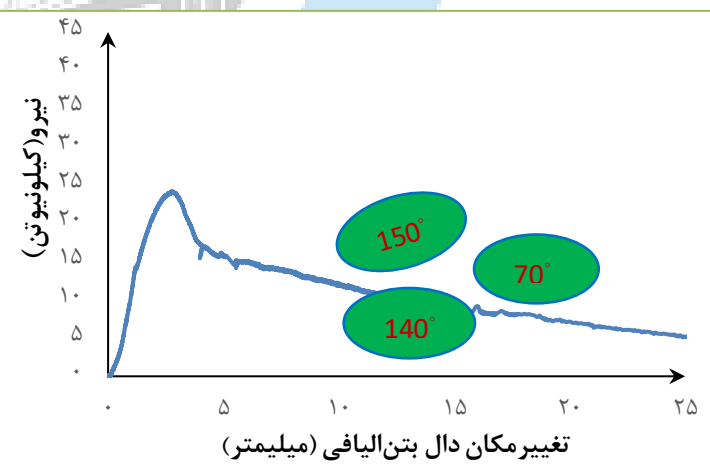


شکل 11: شکل ترک شعاعی در دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 تحت بارگذاری تدریجی

برای دال بتن الیافی دایروی شکل ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 تحت بارگذاری تدریجی، حداکثر نیرو برابر ۲۴/۱۷ کیلونیوتن در تغییرمکان قائم برابر ۲/۸۱ میلیمتر در زمان ۷۰۰ ثانیه حاصل گردیده و سپس با شیب متوسط از نیرو کاسته شده است. رفتار دال به صورت شکل پذیر بوده و از مرکز دال ۳ ترک و با زاویه‌های ۱۵۰، ۱۴۰، ۷۰ درجه به سمت لبه دال گسترش یافته است. مدت زمان بارگذاری برابر ۴۱۳۸ ثانیه و عرض ترک در این مدت برابر ۱۲ میلیمتر بوده است. همچنین تغییرمکان قائم دال در لحظه خرابی به میزان ۱۲/۳ میلیمتر بیشتر از تغییرمکان نمونه شاهد بدست آمده است. نمودار نیرو-تغییرمکان در شکل ۱۲ و گسترش ترک در شکل ۱۳ آمده است.



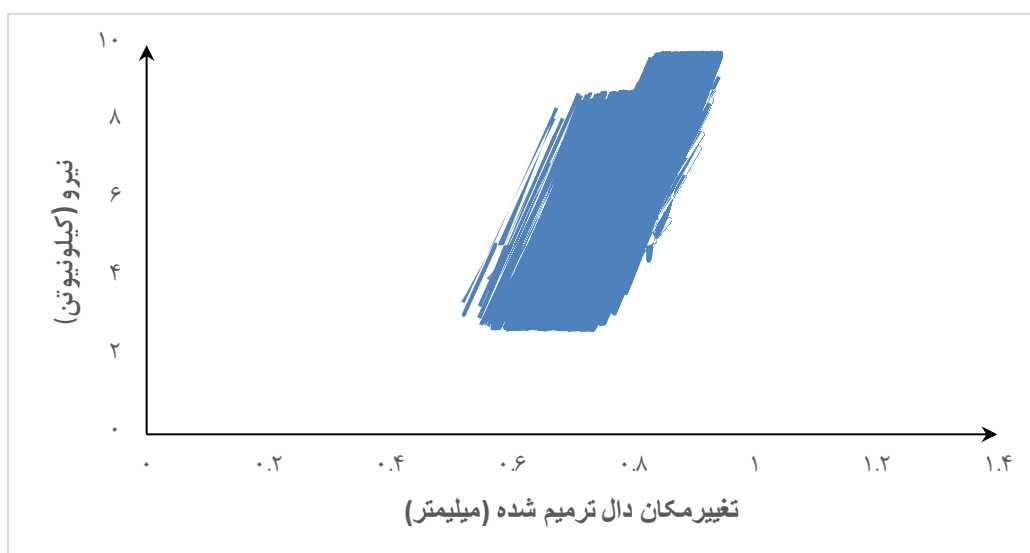
شکل ۱۲: نمودار نیرو-تغییرمکان دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 تحت بارگذاری تدریجی



شکل ۱۳: شکل ترک شعاعی در دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 تحت بارگذاری تدریجی

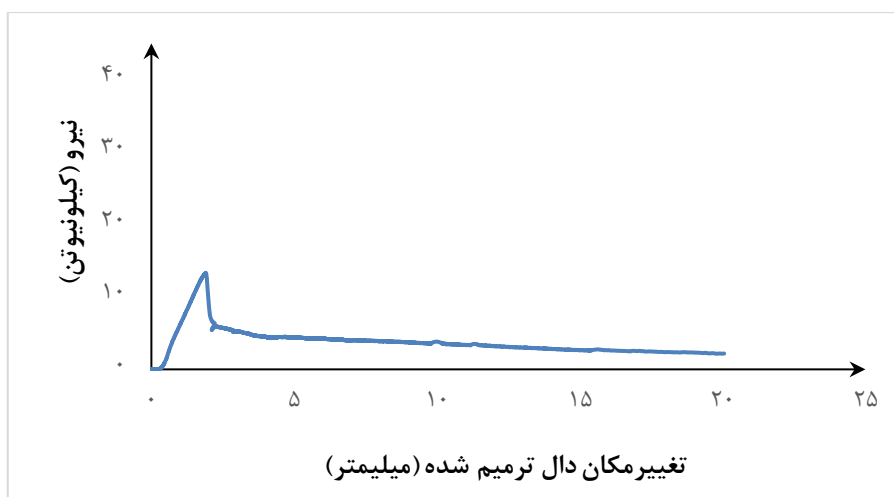
در این مرحله دال‌های بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 و NS2SF8 تحت بارگذاری خستگی قرار گرفته شده‌اند. نیروی خستگی در دامنه ۱۰ الی ۵۰ درصد محدوده ارتجاعی دال‌های ترمیم شده بوده که این محدوده دال ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 برابر حداقل ۲ کیلونیوتن و حداکثر ۸ کیلونیوتن و برای دال ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 برابر حداقل

2/5 کیلونیوتن و حداکثر 10 کیلونیوتن در نظر گرفته شده است. نتایج این بخش برای دال ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 نشان داده که حداکثر تغییرمکان قائم دال در طی 10000 سیکل بارگذاری خستگی برابر 1/1 میلیمتر بوده و در طی انجام آزمایش هیچ گونه ترکی در دال مشاهده نگردیده است. این نتایج برای دال ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 برابر 0/95 میلیمتر ثبت شده و همچنین در طی انجام آزمایش هیچ گونه ترکی نیز در دال مشاهده نگردیده است. نمودار نیرو-تغییرمکان دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 تحت بارگذاری خستگی در شکل 14 برای تعداد 10000 سیکل آورده شده است.

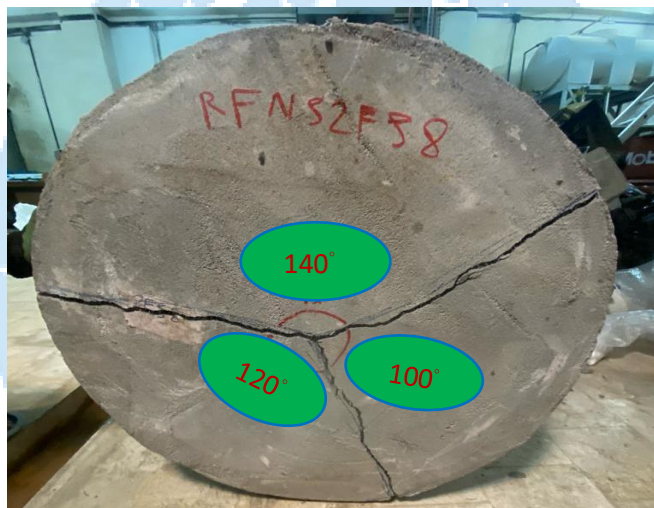


شکل 14: نمودار نیرو-تغییرمکان دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 تحت بارگذاری خستگی با تعداد 10000 سیکل

نمودار نیرو-تغییرمکان دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 تحت بارگذاری تدریجی پس از خستگی در شکل 15 نشان داده شده است. حداکثر نیرو برابر 13/31 کیلونیوتن در تغییرمکان قائم 1/9 میلیمتر و در زمان 478 ثانیه به دست آمده است. رفتار دال شکل پذیر بوده و از مرکز دال 3 ترک شعاعی با زاویه‌های 10، 120، 140 درجه به سمت لبه دال مطابق شکل 16 گسترش یافته و عرض ترک در زمان 2743 ثانیه برابر 14 میلیمتر بدست آمده است. نتایج نشان داده است که اعمال نیروی خستگی باعث کاهش ظرفیت دال به میزان 31 درصد گردیده است.

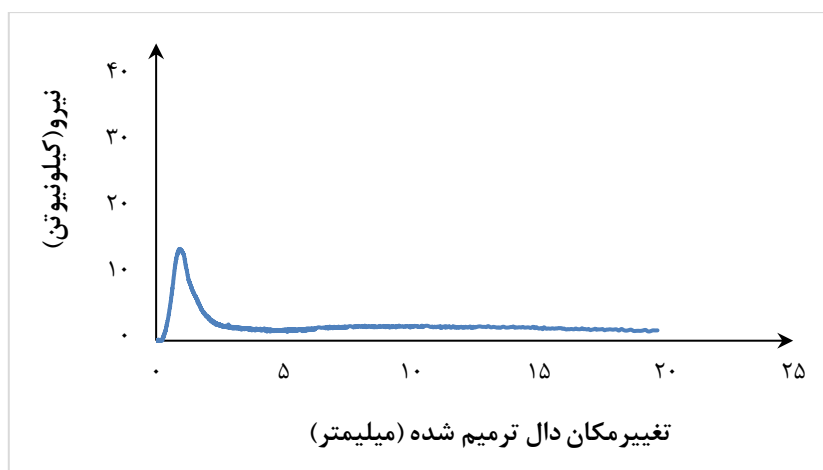


شکل 15: نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 تحت بارگذاری تدریجی پس از خستگی

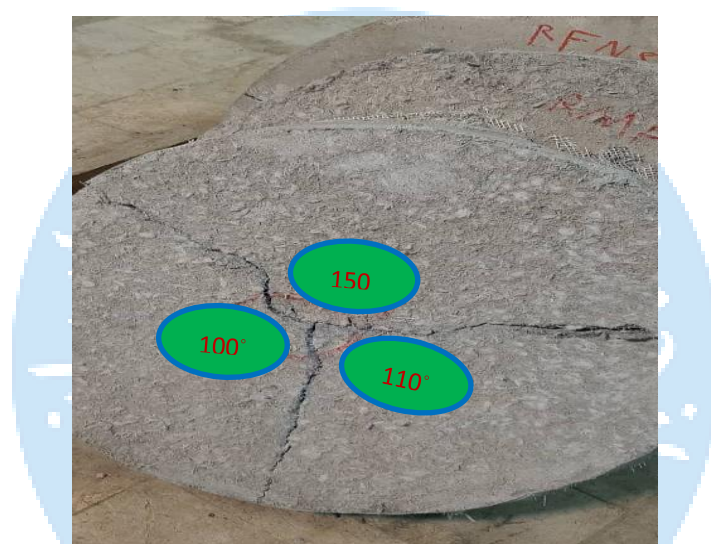


شکل 16: شکل ترک شعاعی دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 تحت بارگذاری تدریجی پس از خستگی

نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی دایروی، ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 تحت بارگذاری تدریجی پس از خستگی در شکل 17 و حداکثر نیرو برابر 13/9 کیلو نیوتن در تغییر مکان قائم 0/95 میلیمتر و در زمان 236 ثانیه بدست آمده است. رفتار دال شکل پذیر بوده و از مرکز دال تعداد سه ترک شعاعی با زاویه های 150، 110، 100 درجه به سمت لبه دال مطابق شکل 18 گسترش یافته و عرض ترک در زمان 1881 ثانیه پایانی بارگذاری برابر 6/9 میلیمتر ثبت شده است. نتایج نشان داده است که اعمال نیروی خستگی باعث کاهش ظرفیت دال به میزان 42/5 درصد گردیده است. همچنین نتایج تست بارگذاری تدریجی پس از خستگی دال های ترمیم شده نشان داده که دال ترمیم شده با ملات ترمیمی با الیاف (PVA) دارای ظرفیت خمشی بیشتری نسبت به ملات ترمیمی NS2SF8 بوده است.

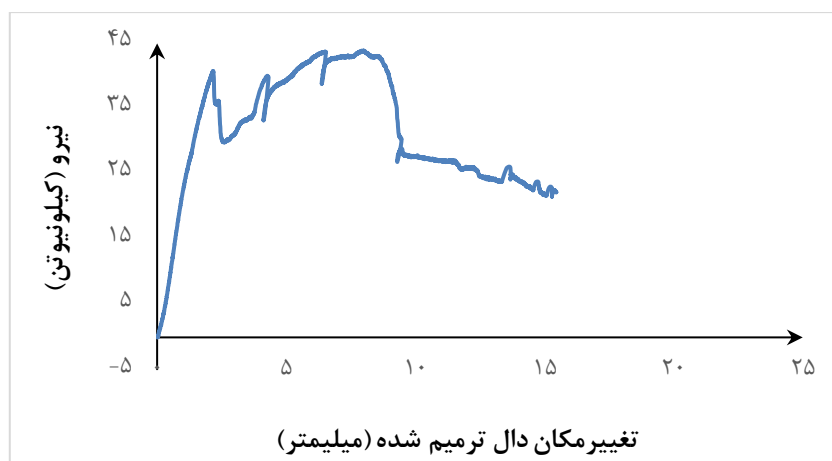


شکل 17: نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 تحت بارگذاری تدریجی پس از خستگی

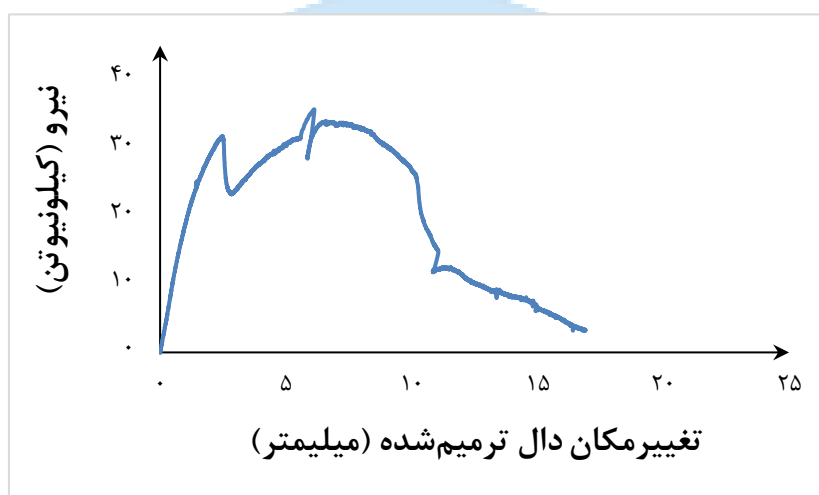


شکل 18: شکل و ترک شعاعی دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 تحت بارگذاری تدریجی پس از خستگی

نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی دایروی شکل ترمیم شده با ورق کربن CFRP1 (طرح 1، مشبک) تحت بارگذاری تدریجی در شکل 19 آمده است. حداکثر نیرو برابر ۴۳/۹ کیلونیوتن در تغییر مکان قائم ۸ میلیمتر و در زمان ۱۹۸۷ ثانیه به دست آمده است. رفتار دال شکل پذیر بوده و تغییر مکان برابر ۱۵/۴۶ میلیمتر در نیروی نظیر برابر ۲۲/۲۳ کیلونیوتن و در زمان ۳۸۴۲ ثانیه ثبت گردیده است و آخرین آزمایش، نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی دایروی شکل ترمیم شده با ورق کربن CFRP2 (طرح ۲، کامل) تحت بارگذاری تدریجی در شکل 20 آمده است. حداکثر نیرو برابر ۳۵/۶۶ کیلونیوتن در تغییر مکان ۶/۱۳ میلیمتر و در زمان ۱۴۷۸ ثانیه بدست آمده است. در دو موقعیت در زمان‌های ۶۱۹ ثانیه از شروع بارگذاری با تغییر مکان قائم برابر ۲/۴۷ میلیمتر و در ۱۴۷۸ ثانیه با تغییر مکان قائم ۶/۱۳ میلیمتر با کاهش نیرو مواجه شده، بطوریکه شیب منفی منحنی در نقطه اول بیشتر از نقطه دوم بوده است. رفتار دال شکل پذیر بوده و تغییر مکان قائم در لحظه آخر برابر ۱۶/۹۲ میلیمتر با نیروی برابر ۳/۳ کیلونیوتن در زمان بارگذاری ۴۲۴۷ ثانیه بوده است.



شکل 19: نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی ترمیم شده با CFRP تحت بارگذاری تدریجی (طرح 1، مشبک)

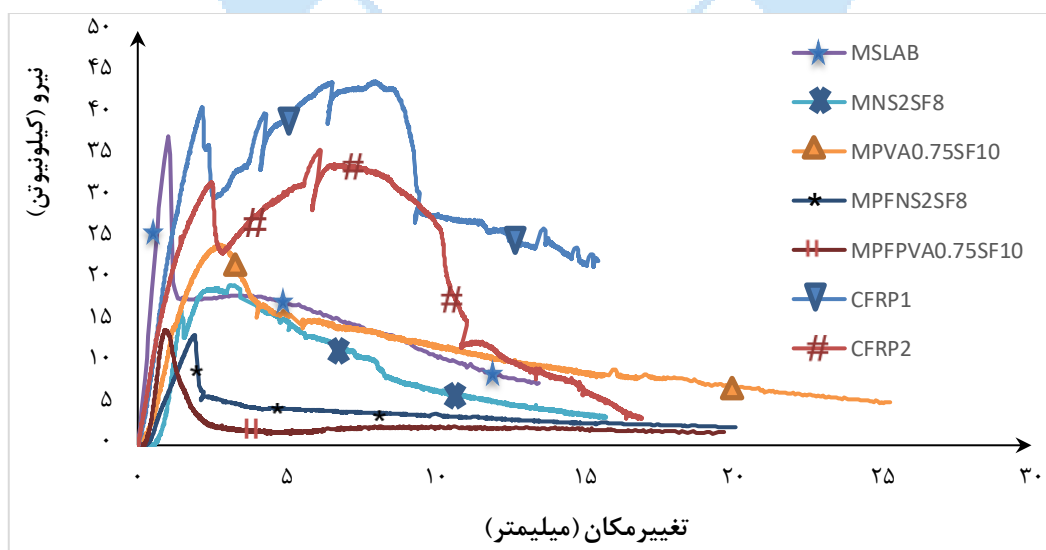


شکل 20: نمودار نیرو-تغییر مکان دال بتن الیافی ترمیم شده با CFRP تحت بارگذاری تدریجی (طرح 2، کامل)

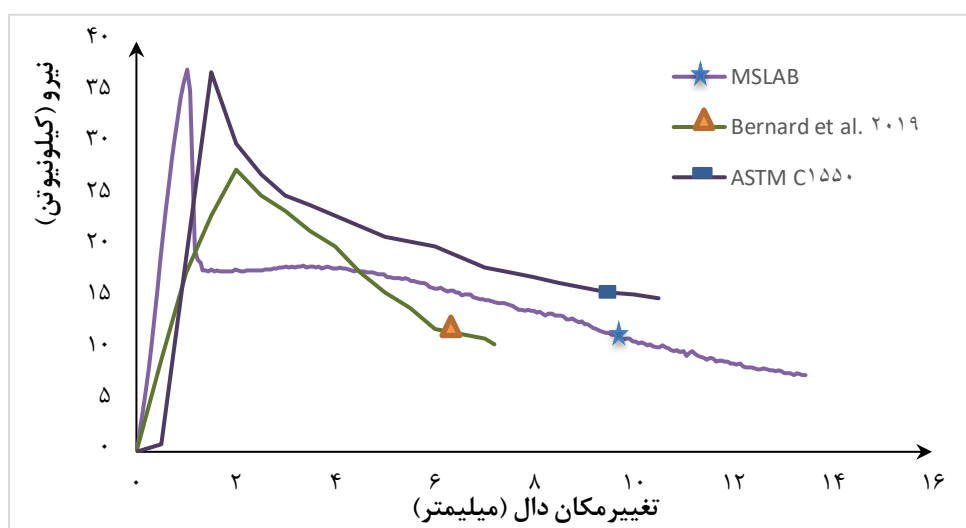
خلاصه نتایج آزمایشات خمشی دال‌های بتن الیافی در جدول 6 و نمودار مقایسه‌ای نیرو-تغییر مکان دال‌های نمونه شاهد و ترمیم شده در شکل 21 آورده شده است. مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان دال نمونه شاهد با کار مطالعاتی دیگران شامل استاندارد ASTM 1550 C و مرجع [16] در شکل 22 آمده است. مشخصات مقاومت فشاری بتن و میزان الیاف مصنوعی (ماکروسینتتیک) مصرفی در کار مطالعاتی برنارد به ترتیب برابر 55 مگاپاسگال و 1 درصد حجم بتن بوده است.

جدول 6: خلاصه نتایج آزمایشات خمشی دال‌های بتن الیافی

ردیف	دال بتن الیافی	تعداد نمونه	نوع بارگذاری	ظرفیت دال (کیلو نیوتن)	کل جذب انرژی دال (ژول)	تغییر مکان دال در لحظه ترک اولیه	تغییر مکان دال در لحظه پایان آزمایش	عرض نهایی ترک (میلیمتر)	مقاومت نسبت به نمونه شاهد(%)
1	نمونه شاهد (MSLAB)	2	تدریجی (مونوتونیک)	37/26	184	1	13	14	100
2	MNS2SF8	1	تدریجی	19/31	178	3/1	15/7	12	52
3	MPVA0/75SF10	1	تدریجی	24/17	290	2/81	25/3	12	65
4	FNS2SF8	1	خستگی	8	--	--	1/1	--	--
5	FPVA0/75SF10	1	خستگی	10	--	--	0/95	--	--
6	MPFNS2SF8	-	تدریجی پس از خستگی	13/31	86	1/9	20	14	69
7	MPFPVA0/75SF10	-	تدریجی پس از خستگی	13/9	61	0/95	19/7	6/9	57/5
8	CFRP1	1	تدریجی	43/9	492	2	15/46	--	118
9	CFRP2	1	تدریجی	35/66	334	2/47	16/92	--	96



شکل 21: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان دال‌های بتن الیافی



شکل 22: مقایسه نمودار نیرو-تغییر مکان دال‌های بتن الیافی نمونه شاهد با ASTM C1550 و مرجع [16] تحت بارگذاری تدریجی

4- بحث

دال‌های بتن الیافی ترمیم شده در حالت‌های CFRP1، CFRP2، PVA0/75SF10 و NS2SF8 با بارگذاری تدریجی، مطابق شکل 21، نشان داده است که ظرفیت خمشی دال‌ها به ترتیب برابر 43/9 کیلونیوتن (118 درصد)، 35/66 کیلونیوتن (96 درصد)، 24/17 کیلونیوتن (65 درصد) و 19/31 کیلونیوتن (52 درصد) نسبت به نمونه شاهد بوده است. دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 دارای بیشترین تغییر مکان قائم برابر 25/3 میلی‌متر نسبت به دیگر دال‌های ترمیم شده بوده است. نتایج ترمیم دال با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 نشان داده است که زمان خرابی حدود 19 برابر بیشتر از نمونه شاهد و حدود 1/3 برابر بیشتر نسبت به دال ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 بوده است که این امر در هنگام وقوع زلزله بدلیل تاخیر در خرابی سازه حائز اهمیت می‌باشد. رفتار دال ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10، در محدوده بعد از مقاومت نهایی (Post-Peak) دارای الگوی رفتاری بهتر نسبت به دیگر دال‌ها از خود نشان داده است.

در کلیه آزمایشات، ترک‌های شعاعی در دال بتن الیافی ایجاد شده بود که در مقایسه با استاندارد ASTM C1550 (بند 7-5 در صفحه 3 استاندارد)، که تعداد ترک‌های شعاعی، حداقل 3 ترک آمده، مطابقت داشته است. تعداد ترک‌های شعاعی در دال بتن الیافی ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 برابر 4 ترک مشاهده گردیده است. بررسی‌ها نشان داده است که زوایای ترک‌های ایجاد شده در دال‌های ترمیم شده، همان زوایای ترک در آزمایش بارگذاری تدریجی (قبل از ترمیم دال‌ها) بوده است.

بارگذاری خستگی باعث کاهش ظرفیت‌های دال ترمیم شده گردیده است، این اثر کاهش بر روی دال‌های ترمیم شده با ملات‌های ترمیمی NS2SF8 و PVA0/75SF10 به ترتیب برابر 13/31 کیلونیوتن (31 درصد) و 13/9 کیلونیوتن (42/5 درصد) بوده است. در این آزمایش دال ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10، تاثیر کاهشی بیشتری از خود نشان داده است.

میزان کل جذب انرژی براساس منحنی‌های نیرو-تغییر مکان شکل 21 محاسبه گردیده است. بیشترین میزان کل جذب انرژی مربوط به دال ترمیم شده در حالت CFRP1 با 492 ج و میزان کل جذب انرژی برای دیگر دال‌های ترمیم شده شامل NS2SF8، PVA0/75SF10، CFRP2 به ترتیب برابر 334 ج، 290 ج و 178 ج بدست آمده است. بررسی‌ها نشان داده است که اعمال بارگذاری خستگی با تعداد 10000 سیکل در دال‌های ترمیم شده با ملات‌های ترمیمی PVA0/75SF10 و NS2SF8 باعث کاهش میزان انرژی جذب شده به ترتیب برابر 79 درصد و 52 درصد گردیده است. همچنین مطالعه این بخش نشان داده است که ترک‌های با عرض کم و کوچک، تاثیری کمی بر میزان جذب انرژی کل داشته است. میزان کل جذب انرژی دال نمونه شاهد تحقیق حاضر با استاندارد 1550

ASTM C و کار مطالعاتی برنارد به ترتیب برابر 184j، 206j و 119j بوده که جذب انرژی دال نمونه شاهد حدود 55 درصد بیشتر از کار مطالعاتی برنارد بوده است.

5- نتیجه گیری

در این مطالعه آزمایشگاهی، دال‌های بتن الیافی دایروی با قطر 750 و ضخامت 75 میلیمتر بر اساس استاندارد ASTM C1550 با دو نوع ملات پایه سیمانی حاوی نانوذرات و الیاف پلی ونیل الکل (PVA) و همچنین ورق‌های کربن (CFRP) ترمیم گردیده و جمعا به تعداد 8 دال تحت بارگذاری‌های تدریجی (مونوتونیک)، خستگی و مونوتونیک پس از خستگی قرار گرفته شده است. رفتار دال‌ها که ترمیم شده آن تاکنون کمتر کار شده، مورد بررسی و مقایسه قرار گرفته شده و اهم نتایج به شرح ذیل ارائه گردیده است:

- 1- بازایی ظرفیت خمشی دال‌های ترمیم شده با ورق کربن در طرح‌های CFRP¹، CFRP² و با ملات‌های ترمیمی PVA0/75SF10 و NS2SF8 در حالت بارگذاری تدریجی (مونوتونیک) به ترتیب برابر 118، 96، 65 و 52 درصد بوده است.
- 2- دال ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10، با تغییرمکان قائم برابر 25/3 میلیمتر در مقایسه با دیگر دال‌های ترمیم شده بیشترین تغییرمکان قائم را داشته است.
- 3- زمان خرابی در دال ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 در مقایسه با دیگر دال‌ها بیشترین بوده بطوریکه این زمان حدود 19 برابر بیشتر از نمونه شاهد و حدود 1/3 برابر بیشتر نسبت به دال ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 بوده است که این امر در هنگام وقوع زلزله بدلیل تاخیر در خرابی سازه حائز اهمیت می‌باشد.
- 4- دال ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10، در محدوده بعد از مقاومت نهایی (Post-Peak) دارای الگوی رفتاری بهتری نسبت به دیگر دال‌ها از خود نشان داده است.
- 5- بارگذاری خستگی در دال ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10، تاثیر کاهشی بیشتری نسبت به دال ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 داشته است.
- 6- بهترین روش ترمیم از لحاظ میزان کل جذب انرژی، مربوط به دال ترمیم شده در حالت CFRP¹ با 492j و بهترین روش ترمیم از لحاظ رفتار بعد از مقاومت نهایی (Post-Peak)، تغییرمکان قائم و زمان خرابی، دال ترمیم شده با ملات ترمیمی PVA0/75SF10 بوده است. همچنین بدترین روش ترمیم، دال ترمیم شده با ملات ترمیمی NS2SF8 بوده است.

مراجع:

- [1] Jalaian, M. Shariatmadar, H. (2024). The Effect of Concrete Strength on the Performance of the External Concrete Beam-To-Column Joint Reinforced by Fiber-Reinforced-Polymers (FRP) Using the Near-Surface-Mounted Method (NSM). *Journal of Structural and Construction Engineering*. 10(12), 21.
- [2] Hojatkashani, A. and Jahangiri, M. (2018). *Analysis and Design Advanced Reinforced Concrete Structures*. First Edition, Tehran: Simaye Danesh, 396.
- [3] Kim, MO. (2020). Influence of Polymer Types on the Mechanical Properties of Polymer-Modified Cement Mortars. *Journals of Applied Sciences*. 10(3), 12.
- [4] Karakouzian, M. Farhangi, V. Farani, MR. Joshaghani, A. Zadehmohamad, M. Ahmadzadeh, M. (2021). Mechanical Characteristics of Cement Paste in the Presence of Carbon Nanotubes and Silica Oxide Nanoparticles: An Experimental Study. *Journal of Materials*. 14(6), 14.
- [5] Malek, M. Jackowski, M. Lasica, W. Kadela, M. Wachowski, M. (2021). Mechanical and Material Properties of Mortar Reinforced with Glass Fiber: An Experimental Study. *Journal of Materials*. 14(3), 14.
- [6] Liao, Y. Shi, H. Zhang, S. Da, B. Chen, D. (2021). Particle Size Effect of Oyster Shell on Mortar: Experimental Investigation and Modeling. *Journal of Materials*. 14(22), 15.
- [7] Chen, H. Huang, X. He, R. Zhou, Z. Fu, C. Wang, J. (2021). Mechanical Properties of Polypropylene Fiber Cement Mortar under Different Loading Speeds. *Journal of Sustainability*. 13(7), 17.

- [8] Nematian Jelodar, H. Hojatkashani, A. Madandoust, R. Akbarpour, A. Hosseini, SA. (2024). The Effect of PVA Fibers and Nano-Particles on the Bonding Strength of Fiber Reinforced Concrete. *Journal of Analysis of Structure and Earthquake*, 20(4), 11.
- [9] Nematian Jelodar, H. Hojatkashani, A. Madandoust, R. Akbarpour, A. Hosseini, SA. (2022). Experimental Investigation on the Mechanical Characteristics of Cement-Based Mortar Containing Nano-Silica, Micro-Silica, and PVA Fiber. *Journal of Processes*, 10 (9), 15.
- [10] Nematian Jelodar, H. Hojatkashani, A. Madandoust, R. Akbarpour, A. Hosseini, SA. (2023). Experimental study of fiber concrete slab behavior against high electric heat. *Journal of Advanced Structural Engineering*. 13 (1), 12.
- [11] American Society for Testing and Materials. (2012). Test method for flexural toughness of fiber Reinforced concrete, using centrally loaded round panel. ASTM C1550. USA, 14.
- [12] Building and Housing Research Center. (2008). The National Method for Concrete Mix Design. Tehran: BHRC, 21.
- [13] Institute of Standards and Industrial Research of Iran, (3040). 1 St- Revision. (2005). Reference Sand for Determination of Flexural and Compressive Strengths Cement Specification and Test Methods. Tehran: ISIRI, 7.
- [14] Deutsches Institut für Normung. (2008). Products and systems for the protection and repair of concrete structures, structures and nano-structural repair. DIN EN 1504-3. Germany, 27.
- [15] Anderson, TL. (2017). *Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications*. 4th Edition. United State: Taylor and Francis, 640.
- [16] Bernard, ES. Winterberg, R. Hajizadeh, MR. (2019). Field Comparison of the Durability of Reinforced Concrete with Macrosynthetic Fibers and Steel Fibers after Cracking in Corrosive Environments. In: *Fist National Conference on Durability*. Tehran: Building and Housing Research Center, 15.

