

## بررسی دوام بتن با الیاف ترکیبی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان به کمک مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی

محمد رضا اصفهانی \*

استاد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

مهرداد رجب زاده

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، موسسه آموزش عالی اقبال لاهوری، مشهد، ایران.

احمد رضا رمضانی

دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد، مشهد، ایران.

### چکیده

بتن با الیاف ترکیبی که از افزودن حداقل دو نوع مختلف از الیاف به بتن حاصل می‌شود، به دلیل خصوصیات مکانیکی برتر مورد توجه طراحان قرار گرفته است. در این پژوهش تأثیر استفاده از الیاف فولادی، شیشه، پلی پروپیلن و همچنین افزودنی حباب‌زا بر روی دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان، مقاومت‌های فشاری و کششی به عنوان پارامترهای تأثیرگذار در عملکرد سازه‌های بتنی بررسی شده است. به منظور بررسی دوام نمونه‌ها، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی و همچنین کاهش وزن نمونه‌ها به عنوان اصلی‌ترین پارامترهای موجود برای سنجش دوام در ۳ مرحله‌ی پیش از شروع آزمایش، حین انجام آزمایش و پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان بررسی و با یکدیگر مقایسه شده‌اند. بهترین عملکرد در برابر این چرخه‌ها مربوط به نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن، ۱ درصد الیاف فولادی و حباب‌زا می‌باشد. در این نمونه مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی پس از ۳۰۰ چرخه تنها ۵ درصد کاهش یافته است؛ حال آنکه در نمونه فاقد الیاف این میزان به ۳۰ درصد می‌رسد. همچنین در نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی ۱۳ درصد کاهش یافته است و این کاهش در نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن تقریباً ۶ درصد می‌باشد. از طرفی دیگر، استفاده از حباب‌زا می‌تواند باعث بهبود مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی تا ۱۲۰ درصد شود. لازم به ذکر است، بررسی هم‌زمان تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی و میزان کاهش وزن در یک نمونه می‌تواند اطلاعات دقیق‌تری از دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان را نمایان سازد.

واژه‌های کلیدی: بتن با الیاف ترکیبی، چرخه‌های ذوب و یخبندان، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی، کاهش وزن، افزودنی حباب‌زا.

\* نویسنده مسئول: esfahani@um.ac.ir

## ۱- مقدمه

روش‌های مخرب (آزمایش مقاومت فشاری) و روش‌های غیر مخرب (اندازه‌گیری مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی و میزان کاهش وزن نمونه) پس از انجام این چرخه‌ها می‌باشد.

به دلیل گستردگی سطح روسازهای بتنی و قرار داشتن آن‌ها در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان و استفاده از مواد یخ‌زدا در فصول سرما، بررسی دوام آن‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد. در همین راستا معمولاً برای بهبود مقاومت بتن در برابر پوسته‌پوسته شدن از مواد پوزولانی استفاده می‌شود [۱۷-۱۹]. تحقیقات انجام شده در رابطه با چگونگی تاثیر الیاف فولادی بر روی مقاومت بتن در برابر پوسته‌پوسته شدن در اثر چرخه‌های ذوب و یخبندان، نتایجی متفاوت و گاهی متناقض را نشان می‌دهد، به گونه‌ای که برخی تاثیر آن را مثبت [۲۰ و ۲۱]، برخی منفی [۲۲] و برخی آن را بی‌تاثیر [۲۳] قلمداد می‌کنند. برکوسکی و کوزیر [۲۴] به بررسی تاثیر الیاف فولادی و پلی‌پروپیلن بر روی مقاومت بتن در برابر پوسته‌پوسته شدن در اثر اعمال چرخه‌های ذوب و یخبندان پرداختند. مطابق نتایج بدست آمده، استفاده از الیاف پلی‌پروپیلن با حجم ۰/۵ تا ۱ درصد، بیشترین تاثیر را در کاهش پوسته‌پوسته شدن سطح بتن داشته‌است.

ژین و همکاران [۲۵] به بررسی تاثیر استفاده از الیاف کربن بر مقاومت بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان و همچنین بررسی تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی پرداختند. با توجه به نتایج بدست آمده، نرخ کاهش مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌ها پس از طی تعداد مشخصی از چرخه‌های ذوب و یخبندان با افزایش درصد الیاف کربن کاهش یافته است. جانگ و همکاران [۲۶] به بررسی تاثیر استفاده از حباب‌زا و الیاف PVA بر دوام بتن پرداختند. مطابق نتایج بدست آمده در این پژوهش می‌توان مشاهده کرد که افزودن این الیاف باعث کندتر شدن روند کاهش مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌های بتنی طی چرخه‌های ذوب و یخبندان شده است. رمزی و همکاران [۲۷] نیز در تحقیقات خود به تاثیر افزودن حباب‌زا بر میزان دوام نمونه‌های بتنی در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان پرداخته‌اند. با توجه به نتایج ارائه شده، با افزایش درصد حباب‌زا، کاهش وزن نمونه‌ها در اثر چرخه‌های ذوب و یخبندان به حدود صفر رسیده است. ونگ و همکاران [۲۸] به بررسی تاثیر افزودن خاکستر بادی و سیلیس بر مقاومت بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان پرداخته‌اند؛ نتایج بدست آمده در این پژوهش نشان‌دهنده این نکته می‌باشد که استفاده از سیلیس باعث افزایش

فرآیند ذوب و یخبندان باعث ایجاد خرابی‌های زیادی در المان‌های بتنی شده [۱-۲]، که در نتیجه هزینه‌های زیادی را برای ترمیم و یا جایگزینی این اعضا به وجود می‌آورد. امروزه تحقیقات گسترده‌ای بر روی افزایش دوام بتن انجام می‌شود؛ زیرا بهبود این پارامتر تاثیر قابل توجهی در کاهش هزینه‌های نگهداری سازه‌های بتنی دارد [۳]. تقویت بتن با الیاف، منجر به ظهور کلاس‌های جدید کامپوزیت‌های مبتنی بر سیمان شده‌است [۴-۸]. بتن‌های الیافی دارای رفتارهای مناسبی چون ترک‌خوردگی چندگانه و سخت شدن در بارگذاری‌های کششی و خمشی می‌باشند. همچنین، بتن‌های الیافی با توجه به ظرفیت بارگذاری قابل توجه و ظرفیت جذب انرژی مناسب، توانایی کاربرد لرزه‌ای را نیز دارند. تعدادی از مطالعات به بررسی کاربردهای سازه‌ای بتن‌های الیافی پرداخته‌اند. این تحقیق‌ها شامل تیرهای اتصال [۹-۱۰]، دیوارهای برشی [۱۱]، دیوارهای پرکننده برای ارتقای لرزه‌ای [۱۲] و محل اتصال تیر به ستون [۱۳] می‌باشد. با توجه به پژوهش‌های پیشین، الیاف یک ماده مناسب برای حصول اطمینان از رفتار لرزه‌ای مطلوب و بهبود عملکرد لرزه‌ای در اعضای با رفتارهای برشی و انعطاف‌پذیر می‌باشند [۱۴]. رای و همکاران [۱۵] مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مقاومت خمشی بتن‌های الیافی را بررسی کردند. آن‌ها در آزمایش‌های خود به این نکته دست یافتند که استفاده از الیاف تاثیر بسزایی بر روی بهبود خصوصیات مکانیکی بتن دارد. بتیا و ساپاکیتیاکو [۱۶] با استفاده از ۳ نوع الیاف فولادی نشان دادند که الیاف با قطر بزرگ به دلیل ارزانی، پخش راحت و عدم کاهش قابل توجه کارایی، در بهبود خصوصیات مکانیکی بتن از جمله مقاومت‌های فشاری و کششی مفید هستند.

بررسی دوام بتن به منظور شبیه‌سازی شرایط سازه‌های بتنی در حال بهره‌برداری که در معرض چرخه‌های ذوب و یخبندان طبیعی قرار دارند، می‌تواند اطلاعات مناسبی را برای پیش‌بینی عمر سازه‌ها در اختیار طراحان قرار دهد. دو روش کلی برای ارزیابی عملکرد بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان وجود دارد. یک روش، بررسی مقاومت سطح بیرونی بتن در برابر پوسته‌پوسته شدن پس از انجام چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌باشد که معمولاً با اندازه‌گیری میزان مواد جدا شده از سطح بتن یا ارزیابی بصری سطح نمونه انجام می‌شود. روش دیگر، بررسی کیفیت بافت درونی بتن با کمک

دوام بتن با کمک پارامتر مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی می‌پردازد که می‌تواند اطلاعاتی دقیق‌تری در مورد بافت بتن نسبت به سایر استانداردها ارائه کند. با توجه به اینکه این پارامتر نمی‌تواند به تنهایی اطلاعات مناسبی از میزان خرابی سطح بتن ارائه دهد، بهتر است کاهش وزن نمونه نیز در کنار آن محاسبه و مورد بررسی قرار گیرد. لازم به ذکر است، بیشتر پژوهش‌های انجام شده در گذشته بر روی تخریب سطحی بتن تمرکز دارند و با توجه به ضوابط اجرایی دشوار استاندارد ASTM C666، کمتر از این استاندارد استفاده شده است. لذا در این پژوهش از استاندارد ASTM C666 برای ارزیابی دوام نمونه‌های بتنی حاوی الیاف با درصد‌های متفاوت در حضور مواد یخ‌زدا استفاده شده و اندازه‌گیری مقاومت نمونه‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان با کمک محاسبه مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی و کاهش وزن نمونه‌ها انجام گرفته است.

## ۲- مواد و آزمایش‌ها

در این بخش، مشخصات مصالح مصرفی در آزمایش‌های انجام شده پژوهش حاضر و روش‌های انجام آزمایش‌ها مطابق با استانداردهای موجود ذکر شده است.

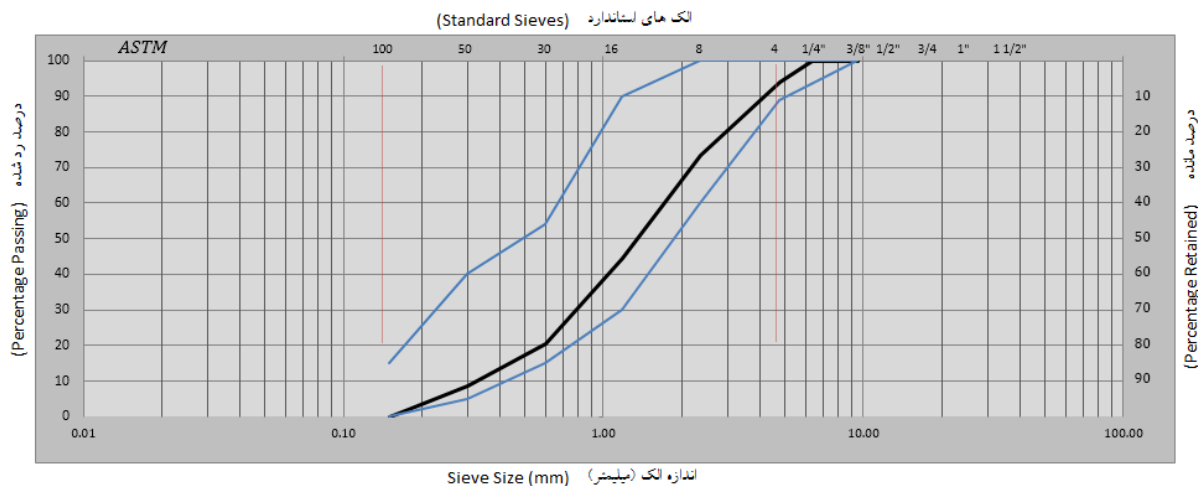
### ۲-۱- مصالح مصرفی

سیمان مصرفی در تمام آزمایش‌ها سیمان پرتلند ضدسولفات متوسط (نوع دو) که مطابقت کامل با استاندارد ASTM C150/C150M-12 [۳۵] دارد، می‌باشد. آب استفاده شده در این پژوهش آب آشامیدنی بوده است. نتایج حاصل از دانه‌بندی شن و ماسه مورد استفاده در آزمایش‌ها به ترتیب در شکل‌های ۱ و ۲ آورده شده است. در این پژوهش برای تقویت نمونه‌ی بتنی از الیاف فولادی، شیشه و پلی‌پروپیلن استفاده شده که مشخصات فنی آن‌ها در جدول ۱ آورده شده است. لازم به ذکر است که درصد‌های ذکر شده‌ی الیاف در این جدول و متن، درصد حجمی در یک متر مکعب بتن می‌باشند. در جدول ۲ طرح اختلاط مورد استفاده در تمام نمونه‌ها آورده شده است. اعداد ذکر شده در جدول بر حسب کیلوگرم بر متر مکعب بوده و این طرح اختلاط با ساخت و آزمایش بر روی نمونه‌هایی که پیش از انجام آزمایش‌های اصلی ساخته شده بودند، بدست آمد.

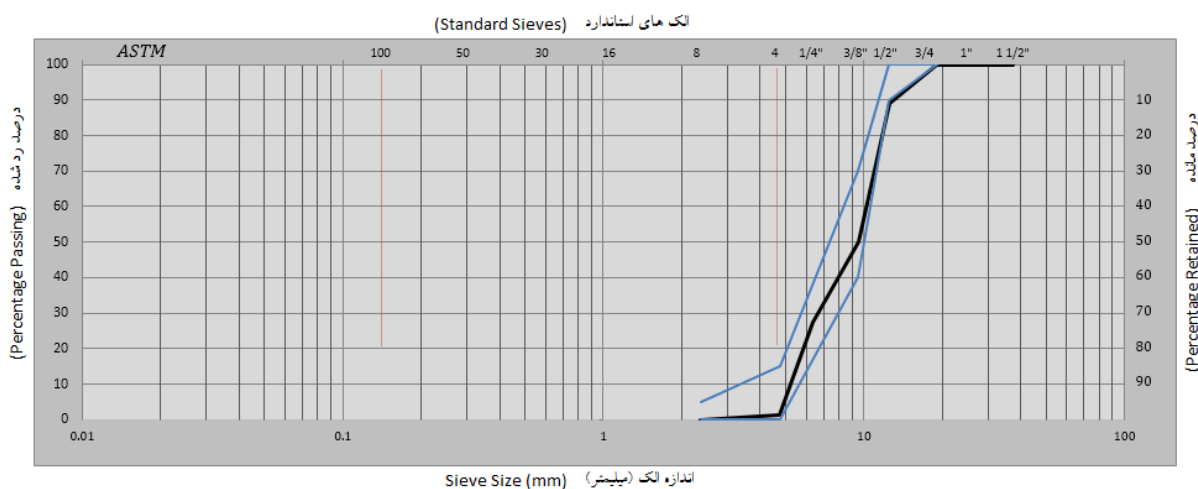
مقاومت بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌شود ولی استفاده بیش از ۴۰ گرم از این ماده نتیجه‌ای عکس داشته و باعث کاهش مقاومت بتن می‌شود. مائو و آیوتا [۲۹]، تاثیر تغییر چگالی مصالح استفاده شده بر مقاومت نمونه‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان را بررسی کردند. طبق نتایج این پژوهش، افزایش چگالی مصالح استفاده شده، تاثیر بسیار زیادی بر روی افزایش مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان دارد؛ همچنین نمونه‌های دارای مصالح با چگالی پایین بعد از ۱۵۰ چرخه به کمترین میزان مجاز مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی رسیده‌اند؛ در حالی که در نمونه‌های حاوی مصالح با چگالی بالاتر، بعد از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان این پارامتر حدود ۱۰ درصد کاهش یافته است.

باید توجه شود که حملات سولفاتی یکی از شایع‌ترین پدیده‌هایی است که باعث کاهش دوام ساختارهای بتنی می‌شود و باید در طراحی سازه‌های بتنی مورد توجه قرار گیرد. کاوسا و همکاران [۳۰] توصیه کرده‌اند که آزمایش‌ها ذوب و یخبندان باید همراه با حمله سولفاتی انجام شود تا شرایط واقعی المان‌های بتنی در حال بهره‌برداری شبیه‌سازی گردد. با این حال، تعداد محدودی از مطالعات در مورد بررسی تاثیر همزمان چرخه‌های ذوب و یخبندان و حملات سولفاتی می‌باشد که دلیل اصلی این موضوع عدم وجود رویکردهای شناخته شده در این حوزه می‌باشد.

چندین روش برای ارزیابی دوام نمونه‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان وجود دارد که شامل استانداردهای ASTM C672 [۳۱]، BS EN1340:2003 [۳۲]، ASTM C1262 [۳۳] و ASTM C666 [۳۴] می‌شود. هر یک از این استانداردها از روش خاصی برای اندازه‌گیری دوام بتن پس از انجام چرخه‌های ذوب و یخبندان بهره می‌برد و دارای کاستی‌هایی نیز می‌باشد. استاندارد ASTM C672 به ثبت مشاهدات بصری پژوهشگر اکتفا کرده که این نوع بررسی ممکن است شامل خطاهای انسانی باشد. استاندارد BS EN 1340:2003 تنها به بررسی میزان مواد جدا شده از سطح بیرونی نمونه در مجاورت محلول نمک طعام ۳ درصد می‌پردازد که بیشتر برای مصالح مورد استفاده در روسازی راه‌ها مانند جداول بتنی کاربرد دارد. استاندارد ASTM C1262 میزان کاهش وزن نمونه و مواد جدا شده از سطح بتن را پس از انجام چرخه‌ها اندازه‌گیری می‌کند که اطلاعات کافی از بافت داخلی بتن ارائه نمی‌دهد. استاندارد ASTM C666 به بررسی



شکل ۱- منحنی دانه بندی ماسه و مقایسه آن با استاندارد ملی ۳۰۲



شکل ۲- منحنی دانه بندی شن و مقایسه آن با استاندارد ملی ۳۰۲

جدول ۱- مشخصات فنی الیاف فولادی، شیشه و پلی پروپیلن

الیاف شیشه	الیاف پلی پروپیلن (PP)	الیاف فولادی	نوع کامپوزیت
۲/۶	۰/۹۱	۷/۸	وزن مخصوص (gr/cm <sup>3</sup> )
۷۰	۵	۲۰۰	مدول الاستیسیته (GPa)
۳	۰/۵	۳	مقاومت کششی (GPa)
۲۰	۳۵	۶۲/۵	قطر الیاف (μm)

جدول ۲- طرح اختلاط مربوط به آزمایش های اصلی (kg/m<sup>3</sup>)

روان کننده	میکروسیلیس	ماسه	شن	آب	سیمان
۲/۵	۲۰	۱۱۷۵	۸۵۰	۱۷۰	۳۵۰

در جدول ۳ نیز مشخصات مربوط به ۲۴ مخلوط مختلف مورد آزمایش در این پژوهش آورده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل برخی مسائل اجرایی و تاثیر بسیار کم یا حتی منفی الیاف در جدول ۳ نیز مشخصات مربوط به ۲۴ مخلوط مختلف مورد آزمایش در این پژوهش آورده شده است. لازم به ذکر است که به دلیل برخی مسائل اجرایی و تاثیر بسیار کم یا حتی منفی الیاف محدود شده است.

جدول ۳- نام‌گذاری نمونه‌ها

افزودنی حباب‌زا	درصد حجمی الیاف پلی پروپیلن	درصد حجمی الیاف شیشه	درصد حجمی الیاف فولادی	نام نمونه <sup>۱</sup>	درصد کل الیاف
-	-	-	-	SOP0G0	-
+	-	-	-	SOP0G0A+	-
-	-	۰/۵	-	G0.50	۰/۵
+	-	۰/۵	-	G0.50A+	۰/۵
-	۰/۵	-	-	P0.50	۰/۵
+	۰/۵	-	-	P0.50A+	۰/۵
-	-	-	۱	S1	۱
+	-	-	۱	S1A+	۱
-	-	۰/۲۵	۰/۷۵	S0.75G0.25	۰/۷۵
+	-	۰/۲۵	۰/۷۵	S0.75G0.25A+	۰/۷۵
-	-	۰/۵	۰/۵	S0.50G0.50	۰/۵
+	-	۰/۵	۰/۵	S0.50G0.50A+	۰/۵
-	۰/۲۵	-	۰/۷۵	S0.75P0.25	۰/۷۵
+	۰/۲۵	-	۰/۷۵	S0.75P0.25A+	۰/۷۵
-	۰/۵	-	۰/۵	S0.50P0.50	۰/۵
+	۰/۵	-	۰/۵	S0.50P0.50A+	۰/۵
-	-	۰/۲۵	۱/۲۵	S1.25G0.25	۱/۲۵
+	-	۰/۲۵	۱/۲۵	S1.25G0.25A+	۱/۲۵
-	-	۰/۵	۱	S1G0.50	۱
+	-	۰/۵	۱	S1G0.50A+	۱
-	۰/۲۵	-	۱/۲۵	S1.25P0.50	۱/۲۵
+	۰/۲۵	-	۱/۲۵	S1P0.50A+	۱/۲۵
-	۰/۵	-	۱	S1P0.50	۱
+	۰/۵	-	۱	S1P0.50A+	۱

<sup>۱</sup> S نماد الیاف فولادی و از نماد P نماد الیاف پلی پروپیلن و از G نماد الیاف شیشه در نام‌گذاری نمونه‌ها می‌باشد، همچنین A+ به عنوان نماد حباب‌زا در نام‌گذاری نمونه‌ها استفاده است.

## ۲-۲- روش‌های آزمایش

متوسط مقاومت‌های فشاری و کششی محاسبه گردید. این آزمایش‌ها با سرعت بارگذاری ۴ kN/s انجام شده است. از میان تمام روش‌های ذکر شده برای بررسی دوام نمونه‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان، با توجه به اینکه استاندارد ASTM C666 مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌های بتنی را پس از انجام چرخه‌های ذوب و یخبندان در حضور مواد یخ‌زدا بررسی می

در آزمایش مقاومت فشاری نمونه‌ها بر اساس استاندارد BS EN 12390 [۳۷]، مکعب‌های با ابعاد ۱۵۰ میلی‌متر و در آزمایش مقاومت کششی بر اساس استاندارد ASTM C496 [۳۶]، نمونه‌های استوانه‌ای بطول ۳۰۰ و قطر ۱۵۰ میلی‌متر ساخته شدند. برای بالا بردن دقت آزمایش‌ها، سه نمونه برای هر یک از ترکیب‌های بتن ساخته و

استاندارد برای ۳۰۰ چرخه به صورت دستی (غیر خودکار) بسیار سخت می‌باشد، دستگاهی تمام خودکار که چرخه‌ها را مطابق با محدوده دمایی مندرج در استاندارد انجام می‌دهد، طراحی و ساخته شد (مطابق شکل ۳). برای اطمینان از کالیبره بودن، پیش از شروع آزمایش اصلی، دستگاه با حداکثر ظرفیت در ۵۰ چرخه کامل مورد آزمایش قرار گرفت. پس از اطمینان از کالیبره بودن دستگاه، نمونه‌های آماده شده، مطابق با شکل ۳ در دستگاه قرار گرفتند. هر چرخه یخ‌زدگی و یخ‌زدایی باید به مدت ۴ ساعت به طول انجامد که دمای نمونه‌ها در حالت یخ‌زدگی به  $18^{\circ}\text{C}$  - و در حالت یخ‌زدایی به  $4^{\circ}\text{C}$  می‌رسد. ۱۲ حسگر دمایی درون محلول آب‌نمک ریخته شده بر روی نمونه‌ها قرار گرفت تا به صورت ۲۴ ساعته دمای آن‌ها کنترل گردد.

کند، این استاندارد بهترین روش برای بررسی دوام المان‌های بتنی با در نظر گرفتن بافت درونی آن‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان و همچنین حملات سولفاتی به حساب می‌آید. لازم به ذکر است، پارامتر مورد استفاده در این استاندارد برای ارزیابی دوام و بررسی شرایط فیزیکی بافت بتن، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی می‌باشد. در این پژوهش آزمایش دوام مطابق با ضوابط استاندارد ASTM C666 بر روی نمونه‌های استوانه‌ای ۲۸ روزه با ارتفاع ۳۰۰ و قطر ۸۰ میلی‌متر انجام شده است. در این آزمایش نمونه‌های بتنی پس از اتمام مرحله عمل‌آوری، درون محفظه‌هایی با ارتفاع ۳۰۵ و قطر ۸۵ میلی‌متر قرار گرفته و فضای اطراف نمونه‌ها و محفظه با محلول آب‌نمک پر شده است. از آنجا که این آزمایش نیازمند دقت بسیار بالایی بوده و امکان فراهم کردن الزامات



شکل ۳- دستگاه اتوماتیک انجام چرخه‌های ذوب و یخبندان

چرخه‌ها به تدریج کاهش می‌یابد. در نتیجه، هر چه این پارامتر پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان بیشتر باشد، به این معنی بوده که نمونه آسیب کمتری دیده و دارای دوام بهتری در برابر چرخه‌ها می‌باشد. همچنین، با اندازه‌گیری جرم نمونه‌ها در هر مرحله و تقسیم بر جرم اولیه، درصد کاهش وزن آن‌ها به عنوان شاخصی دیگر برای ارزیابی دوام به دست آمد.

$$P_C = \left(\frac{n_1^2}{n^2}\right) \times 100 \quad (1)$$

$n$ : فرکانس عبوری از نمونه در صفر چرخه،

$n_1$ : فرکانس عبوری بعد از  $n$  چرخه

$P_C$ : مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی

در آزمایش‌های انجام شده در این پژوهش، نمونه‌ها پیش از شروع چرخه‌ها، بعد از ۱۵۰ چرخه (۲۵ روز پس از شروع آزمایش) و در انتهای آزمایش یعنی بعد از ۳۰۰ چرخه (۵۰ روز پس از شروع آزمایش) مورد بررسی قرار گرفته‌اند. مطابق با شکل ۴، با کمک یک دستگاه التراسونیک (پاندیت) زمان عبور امواج از نمونه‌ها و فرکانس عبوری محاسبه شده و با کمک رابطه (۱) که رابطه ارائه شده در استاندارد ASTM C666 می‌باشد، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی به عنوان شاخصی برای ارزیابی دوام گزارش شده است.

لازم به ذکر است، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌ها در شروع چرخه‌های ذوب و یخبندان برابر ۱ بوده و پس از طی

مختلف بتن الیافی طراحی و از هر طرح ترکیب ۳ نمونه ساخته شده‌است. در جدول ۴، نتایج میانگین مقاومت‌های فشاری و کششی تمام نمونه‌ها گزارش شده‌است. به منظور مقایسه بهتر، عملکرد برخی از ترکیب‌ها در آزمایش مقاومت فشاری در شکل ۵ آورده شده است. همان‌طور که در این شکل مشاهده می‌شود، با افزایش درصد الیاف، مقاومت فشاری نمونه‌ها نیز افزایش می‌یابد. الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن به تنهایی تاثیر قابل توجهی بر روی مقاومت فشاری نمونه‌ها نداشته‌اند. افزودن ۰/۵ درصد الیاف الیاف شیشه و ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن در بتن به ترتیب باعث افزایش مقاومت فشاری بتن به میزان ۴ و ۱ درصد نسبت به بتن فاقد الیاف شده است. در حالی که الیاف فولادی باعث افزایش مقاومت فشاری تا حدود ۲۴ درصد شده‌اند. علت تاثیرگذاری بیشتر الیاف فولادی در مقایسه با الیاف دیگر، می‌تواند مدول الاستیسیته بالاتر این الیاف در مقایسه با سایر الیاف باشد.



شکل ۴ - دستگاه تراسونیک

### ۳- نتایج آزمایشگاهی

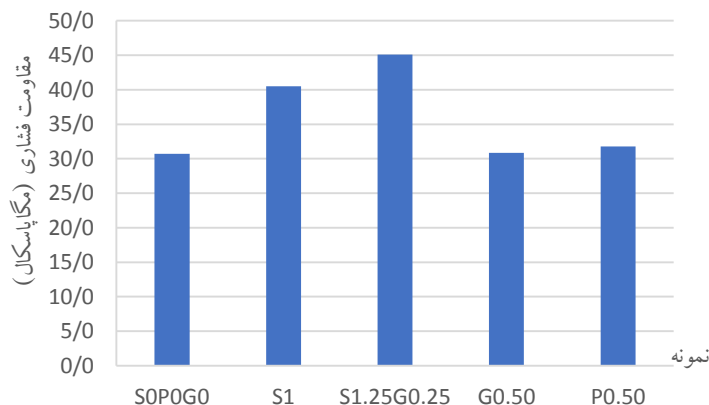
در این بخش نتایج حاصل از آزمایش‌های مقاومت فشاری، کششی و آزمایش ذوب و یخبندان مورد بررسی قرار گرفته است.

### ۳-۱- مقاومت‌های فشاری و کششی

در هر یک از آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی، ۲۴ ترکیب

جدول ۴- مقاومت فشاری و کششی نمونه‌ها

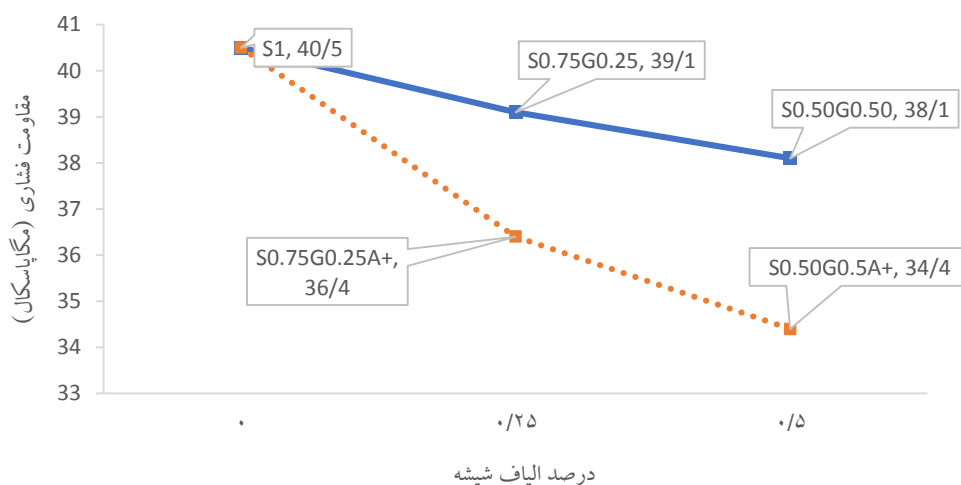
درصد کل الیاف	نام	مقاومت فشاری (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
-	S0P0G0	۳۲/۵	۲/۱۱
	S0P0G0A+	۲۴/۳	۱/۵۹
۰/۵	G0.50	۳۳/۹	۲/۲۴
	G0.50A+	۲۸	۲/۱۷
	P0.50	۳۲/۹	۲/۵۷
	P0.50A+	۲۷	۲/۴۵
۱	S1	۴۰/۵	۲/۷۲
	S1A+	۳۳/۵	۲/۲۸
	S0.75G0.25	۳۹/۱	۳/۱۵
	S0.75G0.25A+	۳۰	۱/۷۲
	S0.50G0.50	۳۸/۱	۳/۱۸
	S0.50G0.50A+	۲۹/۵	۲/۰۶
	S0.75P0.25	۳۳/۴	۲/۵۲
	S0.75P0.25A+	۳۰/۷	۱/۹
	S0.50P0.50	۳۶/۴	۲/۷۸
	S0.50P0.50A+	۳۲/۱	۲/۴۹
۱/۵	S1.25G0.25	۴۵/۱	۴/۶۹
	S1.25G0.25A+	۳۶/۷	۳/۴۳
	S1G0.50	۴۴/۹	۴/۶۴
	S1G0.50A+	۳۶/۴	۳/۳۸
	S1.25P0.50	۳۵/۶	۳/۰۸
	S1P0.50A+	۳۲	۲/۶۷
	S1P0.50	۳۴/۳	۳
	S1P0.50A+	۳۰/۲	۲/۴۶



شکل ۵- مقایسه تاثیر الیاف بر مقاومت فشاری

مطابق شکل ۶، در نمونه‌های حاوی مجموعاً ۱ درصد الیاف فولادی و شیشه، نمونه S1 دارای بالاترین مقاومت فشاری بوده و به ترتیب نمونه‌های S0.5G0.5 و S0.75G0.25 مقاومت‌های فشاری پایین‌تری دارند که این نشان از عملکرد بهتر الیاف فولادی در مقایسه با الیاف شیشه دارد. لازم به ذکر است که این روند در نمونه‌های حاوی الیاف پلی‌پروپیلن و فولادی نیز مشابه می‌باشد. اما در بخش

بعد مشاهده خواهد شد که مقاومت نمونه‌ها در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان از چنین روندی پیروی نمی‌کند و الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن عملکرد بهتری نسبت به الیاف فولادی دارند. از طرف دیگر با مقایسه نمونه‌های حاوی حباب‌زا و فاقد حباب‌زا در شکل ۶، مشاهده می‌شود که میزان مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی حباب‌زا نسبت به نمونه مشابه فاقد حباب‌زا بسیار پایین‌تر می‌باشد.



شکل ۶- مقایسه مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی الیاف فولادی و شیشه

مطابق جدول ۴، نمونه فاقد الیاف دارای مقاومت کششی MPa ۲/۱۱ بوده در حالی که نمونه‌های P0.50 حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن، G0.50 حاوی ۰/۵ درصد الیاف شیشه و نمونه S1.25G0.25 (حاوی ۱/۲۵ درصد الیاف فولادی و ۰/۲۵ درصد الیاف شیشه) به ترتیب دارای مقاومت‌های کششی ۲/۲۴، ۲/۵۷ و ۴/۶۹ مگاپاسکال می‌باشند. نمونه‌های حاوی الیاف، به ویژه نمونه‌های حاوی الیاف ترکیبی عملکرد مناسبی در آزمایش مقاومت کششی از خود نشان داده‌اند. علت این امر ایجاد پلی توسط الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن برای جلوگیری از میکروترک‌ها می‌باشد. از طرفی، الیاف فولادی با ایجاد پلی بر روی ماکروترک‌ها باعث کند کردن انتشار ترک‌ها می‌شوند. مقایسه نمونه S1.25G0.25 با نمونه فاقد الیاف نشان از بهبود حدود دو برابری در مقاومت کششی این نمونه دارد. همچنین می‌توان مشاهده کرد که با افزایش درصد الیاف از ۰/۵ به ۱ و از ۱ به ۱/۵ مقاومت کششی در بتن افزایش یافته است.



### ۲-۳- آزمایش ذوب و یخبندان

۰/۷۱۷ بوده در حالی که این پارامتر در نمونه P0.50A+ حاوی

حباب‌زا و ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن برابر ۰/۹۵۱ بوده که به میزان قابل توجهی بالاتر می‌باشد. در نمونه فاقد الیاف، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان ۲۸ درصد کاهش یافته است. حال آنکه در نمونه حاوی ۰/۵ درصد شیشه، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی ۱۳ درصد کاهش یافته و این کاهش در نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی‌پروپیلن تقریباً ۶ درصد می‌باشد. این امر نشان از تاثیر بالای الیاف شیشه و پلی‌پروپیلن در بهبود دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان دارد.

همانطور که در بخش ۲-۲ به آن اشاره شده، هر چه مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان بیشتر باشد، نمونه آسیب کمتری در برابر این چرخه‌ها دیده و دارای دوام بهتری می‌باشد. در نتیجه مطابق با جدول ۵ مشاهده می‌شود که به طور کلی افزودن حباب‌زا و انواع مختلف الیاف، باعث افزایش دوام نمونه‌های بتنی شده است. اما میزان تاثیرگذاری الیاف با توجه به نوع (فولادی، پلی‌پروپیلن و شیشه) و درصد استفاده‌ی آن‌ها، متفاوت بوده- است. مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه فاقد الیاف و حباب‌زا برابر

جدول ۵- نتایج آزمایش چرخه ذوب و یخبندان

کاهش وزن <sup>۲</sup> (درصد)	وزن نمونه بعد از ۳۰۰ چرخه (gr)	وزن نمونه بعد از ۱۵۰ چرخه (gr)	وزن نمونه در صفر چرخه (gr)	میانگین مدول الاستیسیته	تغییرات مدول الاستیسیته <sup>۲</sup>	مدول الاستیسیته <sup>۱</sup> پس از ۳۰۰ چرخه	مدول الاستیسیته <sup>۱</sup> پس از ۱۵۰ چرخه	نمونه	درصد الیاف در نمونه
۱/۵۰	۴۱۳۱	۴۱۶۳	۴۱۹۴	۰/۷۵۴	۲۸/۲۶	۰/۷۱۷	۰/۸۱۷	SOP0G0	-
۱/۰۰	۳۹۰۳	۳۹۲۰	۳۹۴۳		۲۰/۹۸	۰/۷۹۰	۰/۸۸۷	SOP0G0A+	-
۰/۶۴	۳۹۱۶	۳۹۲۲	۳۹۴۲	۰/۹۱۵	۱۳/۳۴	۰/۸۶۷	۰/۹۱۲	G0.50	۰/۵
۰/۴۲	۳۸۲۰	۳۸۲۶	۳۸۳۶		۹/۸۱	۰/۹۰۲	۰/۹۲۳	G0.50A+	۰/۵
۰/۱۶	۳۷۴۰	۳۷۴۴	۳۷۶۶		۵/۹۲	۰/۹۴۱	۰/۹۸۸	P0.50	۰/۵
۰/۰۶	۳۶۲۸	۳۶۲۹	۳۶۳۰		۴/۹۰	۰/۹۵۱	۰/۹۹	P0.50A+	۰/۵
۱/۵۵	۳۹۸۹	۳۹۹۲	۴۰۵۲	۰/۸۸۴	۱۸/۱۳	۰/۸۱۹	۰/۸۶۱	S1	۱
۱/۱۱	۳۸۴۰	۳۸۴۸	۳۸۸۳		۱۶/۵۰	۰/۸۳۵	۰/۸۸۶	S1A+	۱
۱/۶۰	۳۹۸۹	۴۰۳۱	۴۰۵۴		۱۲/۸۹	۰/۸۷۱	۰/۹۴	S0.75G0.25	۱
۰/۹۵	۳۹۶۷	۳۹۸۵	۴۰۰۵		۷/۶۰	۰/۹۲۴	۰/۹۵	S0.75G0.25A+	۱
۱/۵۳	۳۸۰۱	۳۸۳۶	۳۸۶۰		۱۸/۷۸	۰/۸۱۲	۰/۹۴۲	S0.50G0.50	۱
۰/۸۱	۳۷۹۲	۳۸۱۰	۳۸۲۳		۹/۳۹	۰/۹۰۶	۰/۹۵۲	S0.50G0.50A+	۱
۰/۹۱	۳۸۱۵	۳۸۲۵	۳۸۵۰		۱۰/۰۰	۰/۹۰۰	۰/۹۲	S0.75P0.25	۱
۰/۴۲	۳۷۲۴	۳۷۳۰	۳۷۴۰		۵/۳۳	۰/۹۴۷	۰/۹۶	S0.75P0.25A+	۱
۰/۳۸	۳۸۳۷	۳۸۴۰	۳۸۵۲		۱۴/۰۶	۰/۸۵۹	۰/۹۲۵	S0.50P0.50	۱
۰/۳۱	۳۵۶۴	۳۵۷۰	۳۵۷۵		۵/۸۶	۰/۹۴۱	۰/۹۶۱	S0.50P0.50A+	۱
۰/۹۰	۳۹۵۱	۳۹۶۴	۳۹۸۷	۰/۸۴۲	۱۶/۱۱	۰/۸۳۹	۰/۸۸	S1.25G0.25	۱/۵
۰/۲۷	۳۸۰۴	۳۸۱۰	۳۸۱۵		۱۲/۵۵	۰/۸۷۴	۰/۸۹	S1.25G0.25A+	۱/۵
۲/۰۶	۳۵۷۰	۳۶۰۶	۳۶۴۶		۱۶/۱۱	۰/۸۳۹	۰/۸۷۸	S1G0.50	۱/۵
۱/۷۲	۳۷۲۰	۳۷۵۶	۳۷۸۵		۱۲/۵۵	۰/۸۷۴	۰/۸۹۲	S1G0.50A+	۱/۵
۰/۵۲	۴۰۱۱	۴۰۲۵	۴۰۳۲		۲۳/۳۸	۰/۷۶۶	۰/۹۳	S1.25P0.25	۱/۵
۰/۳۹	۳۸۱۰	۳۸۲۰	۳۸۲۵		۲۲/۱۰	۰/۷۷۹	۰/۹۷۷	S1.25P0.25A+	۱/۵
۰/۲۲	۳۹۷۴	۳۹۸۰	۳۹۸۳		۱۰/۴۰	۰/۸۹۶	۰/۸۶۹	S1P0.50	۱/۵
۰/۱۶	۳۵۰۹	۳۵۱۰	۳۵۱۵		۱۲/۵۵	۰/۸۷۴	۰/۹۰۲	S1P0.50A+	۱/۵

<sup>۱</sup>مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی

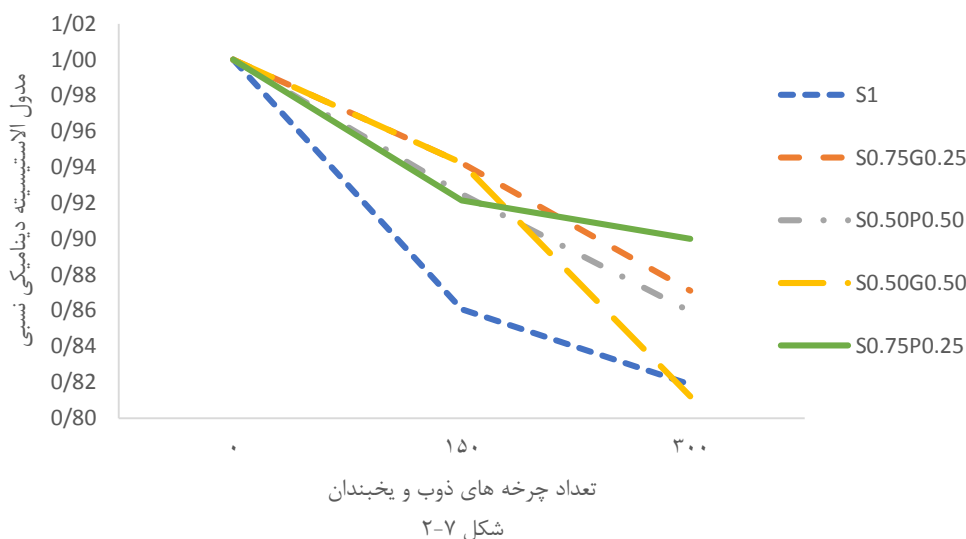
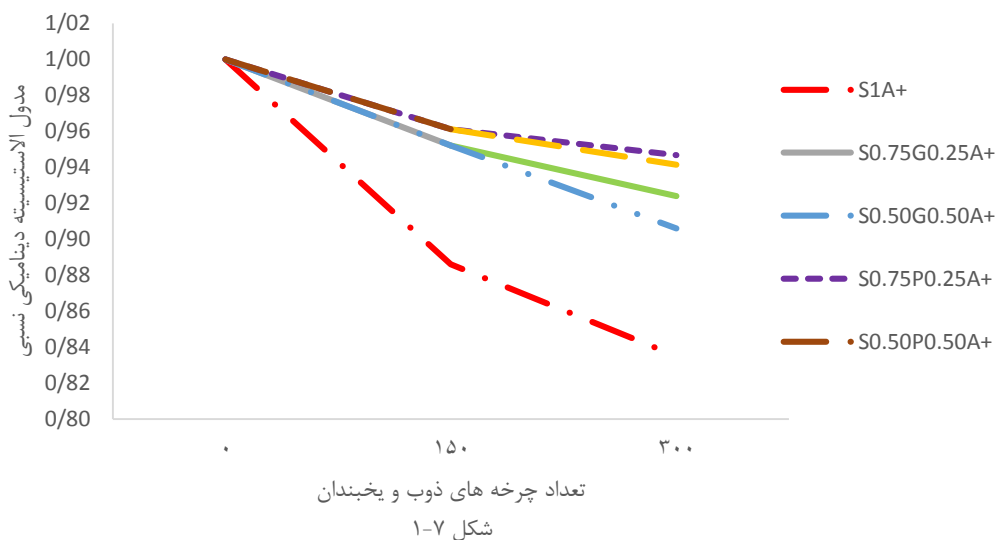
درصد کاهش مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی پس از ۳۰۰ چرخه که همان اختلاف این پارامتر پیش از شروع آزمایش (برابر با ۱) و پس از ۳۰۰ چرخه می‌باشد.

<sup>۲</sup>درصد کاهش وزن نمونه پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان

که با کاهش میزان الیاف فولادی و افزایش میزان الیاف پلی پروپیلن و شیشه، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌ها افزایش یافته است.

استفاده از الیاف فولادی در مقایسه با الیاف پلی پروپیلن و شیشه تاثیر اندکی بر روی افزایش دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان داشته است؛ در حالی که افزودن ۱ درصد از این نوع الیاف باعث افزایش ۴۳ درصد بر مقاومت فشاری و ۶۵ درصد بر مقاومت کششی بتن شده است. لازم به ذکر است، تمام مشاهدات ذکر شده بر مبنای شکل ۱-۷ که مربوط به نمونه‌های دارای حباب‌زا بوده برای نمونه‌های فاقد حباب‌زا که در شکل ۲-۷ آمده‌اند نیز صدق می‌کند.

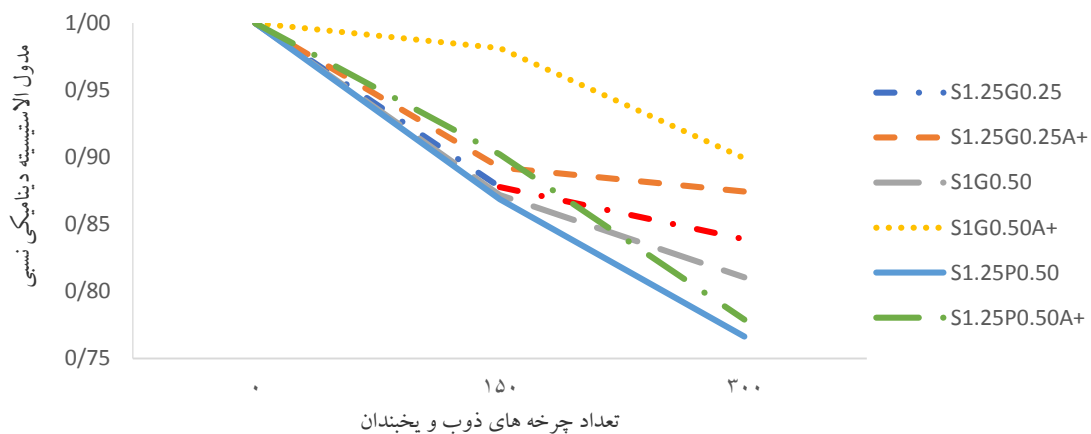
با مقایسه نمونه‌های G0.5 و P0.5 و همچنین نمونه‌های G0.5A+ و P0.5A+ در جدول ۵ مشاهده می‌شود که مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی و در نتیجه مقاومت در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان در نمونه‌های حاوی الیاف پلی پروپیلن در مقایسه با الیاف شیشه بالاتر می‌باشد. مطابق شکل ۱-۷، با مقایسه دو نمونه S0.75G0.25A+ و S0.75P0.25A+ و همچنین مقایسه دو نمونه S0.5G0.5A+ و S0.5P0.5A+ می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌های حاوی الیاف ترکیبی نیز الیاف پلی پروپیلن عملکرد بهتری نسبت به الیاف شیشه داشته‌اند. از طرف دیگر با مقایسه دو نمونه S0.75G0.25A+ و S0.5G0.5A+ و همچنین S0.75P0.25A+ و S0.5P0.5A+ مشاهده می‌شود



شکل ۷- تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی با ۱ درصد الیاف

توجه شود که نمونه  $S0.5P0.5A+$  دارای مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی یکسانی با نمونه  $P0.5A+$  می‌باشد، اما سایر خصوصیات مکانیکی این نمونه از جمله مقاومت فشاری و کششی که در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفتند، بسیار بهتر از نمونه  $P0.5A+$  می‌باشد. یکی از اهداف پژوهش حاضر نیز دستیابی به چنین ترکیبی‌هایی با مجموعه‌ای از خصوصیات مطلوب می‌باشد. پایین‌ترین مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نیز مربوط به نمونه  $S1.25P0.25$  می‌باشد، که با این وجود مدول الاستیسیته آن بالاتر از نمونه‌ی فاقد الیاف می‌باشد. در واقع طبق نتایج این پژوهش، افزودن الیاف به هر میزان و از هر نوع، باعث بهبود دوام بتن شده است.

همانطور که در جدول ۵ مشاهده می‌شود، نمونه‌های حاوی حجم یکسان الیاف در یک گروه قرار گرفته‌اند و میانگین مدول الاستیسیته هر گروه نیز گزارش شده است. نمونه‌هایی که در مجموع حاوی ۰/۵ درصد الیاف بوده با میانگین مدول الاستیسیته ۰/۹۱۵ بهترین عملکرد را داشته و به نوعی درصد بهینه الیاف مورد استفاده برای بهبود دوام بتن می‌باشند. افزودن مجموعاً ۱/۵ درصد الیاف نیز کمترین تاثیر را در افزایش مدول الاستیسیته بتن داشته است در حالی که نمونه‌های این گروه بهترین عملکرد را در آزمایش‌های مقاومت فشاری و کششی داشته‌اند. همچنین در میان تمام نمونه‌ها، نمونه‌های  $P0.5A+$  و  $S0.5P0.5A+$  دارای بالاترین مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی می‌باشند. باید به این نکته



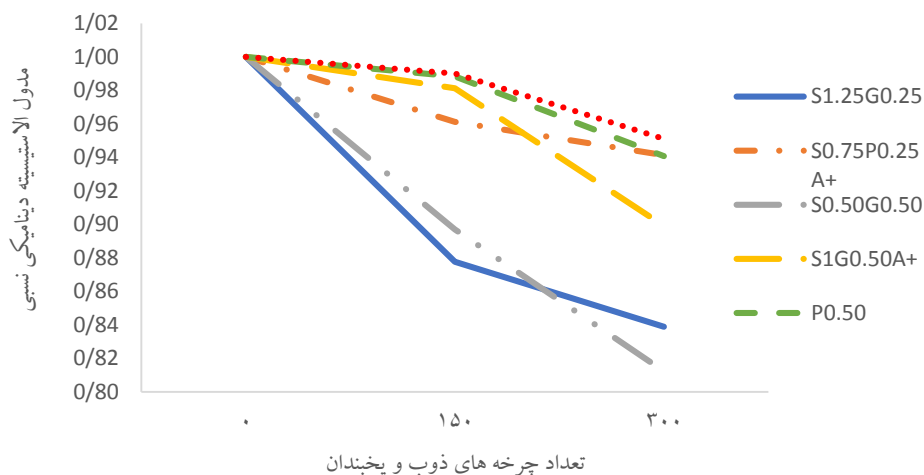
شکل ۸- تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه‌ها با ۱/۵ درصد الیاف

تر)، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی پس از افزودن حباب‌زا به میزان قابل توجهی افزایش یافته است. می‌توان اینگونه بیان کرد که تاثیر حباب‌زا دارای محدودیت بوده و نمی‌تواند بیش از حد مشخصی باعث بهبود دوام بتن شود.

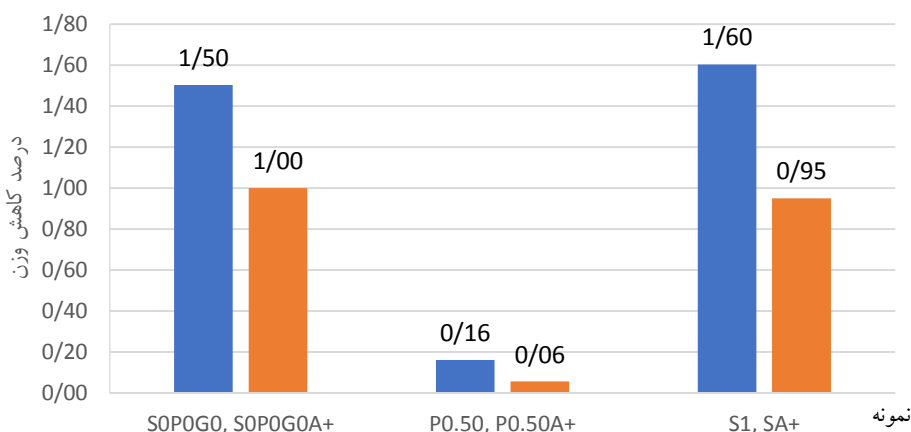
یکی دیگر از پارامترهایی که در آزمون چرخه ذوب و یخبندان مورد بررسی قرار گرفته‌است، میزان مواد جدا شده از نمونه‌ها (کاهش وزن نمونه‌ها) می‌باشد. مطابق انتظار با افزایش تعداد چرخه‌ها، میزان مواد جدا شده از نمونه‌های بتنی افزایش می‌یابد. همانطور که در جدول ۵ می‌توان مشاهده کرد، افزودن الیاف باعث کاهش میزان مواد جدا شده از بتن می‌شود. باید توجه شود که در برخی از نمونه‌ها میزان کاهش وزن متناسب با تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نبوده است. برای مثال در نمونه  $S0.75P0.25$  پارامتر مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی بیشتر از

شکل ۸ به منظور بررسی تاثیر حباب‌زا بر افزایش دوام بتن رسم شده است. با مقایسه تمام نمونه‌های حاوی حباب‌زا و نمونه‌های فاقد حباب‌زا در حجم ثابت الیاف مشاهده می‌شود که حباب‌زا تاثیر مثبتی در این زمینه داشته است. اما نکته قابل توجه این است که تاثیر حباب‌زا وابسته به مقاومت نمونه مشابه خود که فاقد حباب‌زا بوده، می‌باشد. در واقع در نمونه‌های فاقد حباب‌زا با مقاومت پایین‌تر در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان، افزودن حباب‌زا تاثیر زیادی بر افزایش مقاومت داشته است. در حالی که در نمونه‌هایی که مقاومت بالاتری در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان دارند، تاثیر افزودنی حباب‌زا کاهش می‌یابد. برای مثال مطابق شکل ۹، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه  $P0.5$  (نمونه فاقد حباب‌زا با مدول الاستیسیته بتن بالا) پس از افزودن حباب‌زا تغییر چندانی نکرده است؛ حال آنکه در نمونه‌های  $S1G0.5$  و  $S1.25G0.25$  (نمونه‌های فاقد حباب‌زا با مدول الاستیسیته پایین

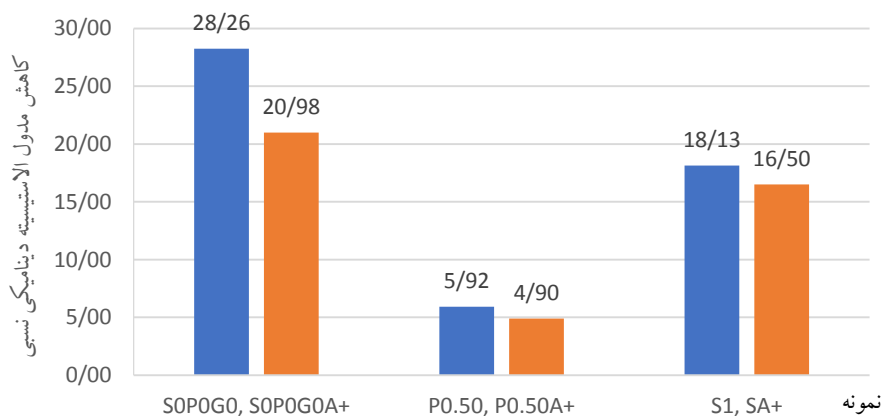
نمونه S0.5P0.5 می باشد (که این نشانگر دوام بهتر نمونه نسبی بررسی شوند؛ در واقع کاهش وزن به عنوان معیاری برای بررسی میزان مواد جدا شده از سطح بتن و مقاومت در برابر پوسته پوسته شدن بوده و مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی به عنوان معیاری برای بررسی میزان آسیب دیدگی بافت درونی بتن پس از دوام نمونه ها، هر دو معیار کاهش وزن و مدول الاستیسیته دینامیکی انجام چرخه های ذوب و یخبندان می باشد.



شکل ۹- تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمونه های حاوی و فاقد حباب زرا



شکل ۱۰- کاهش میزان مواد جدا شده در نمونه های حاوی و فاقد حباب زرا



شکل ۱۱- کاهش تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی در نمونه های حاوی و فاقد حباب زرا

ذوب و یخبندان، مقاومت فشاری و کششی بررسی شده است. طبق مشاهدات این پژوهش نتایج زیر قابل ذکر می‌باشند.

- به طور کلی افزودن الیاف باعث بهبود دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌شود. در نمونه فاقد الیاف، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان ۲۸ درصد کاهش یافته است. حال آنکه در نمونه حاوی ۰/۵ درصد شیشه، مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی ۱۳ درصد کاهش یافته و این کاهش در نمونه حاوی ۰/۵ درصد الیاف پلی پروپیلن تقریباً ۶ درصد می‌باشد. این امر نشان از تاثیر بالای الیاف شیشه و پلی پروپیلن در بهبود دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان دارد.

- استفاده از حباب‌زا به طور کلی باعث بهبود دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌شود. طبق اندازه‌گیری‌های انجام شده بر روی نمونه‌ها پس از ۳۰۰ چرخه ذوب و یخبندان، استفاده از حباب‌زا می‌تواند باعث کاهش مواد جدا شده از بتن تا ۲۵۰ درصد و بهبود مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی تا ۱۲۰ درصد شود. اما باید توجه شود که استفاده از حباب‌زا باعث کاهش شدید مقاومت فشاری و کششی نیز می‌شود. حال آنکه استفاده از درصد‌های بهینه الیاف در کنار حباب‌زا می‌تواند تاثیر منفی این افزودنی را کاهش دهد.

- با توجه به اختلاف‌های مشاهده شده میان روند کاهش وزن و تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی اندازه‌گیری شده پس از آزمایش ذوب و یخبندان برای یک نمونه، می‌توان نتیجه گرفت که پارامتر مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی به تنهایی نمی‌تواند اطلاعات کافی از تاثیر چرخه‌های ذوب و یخبندان ارائه کند و بهتر است در کنار آن کاهش وزن نمونه نیز مورد بررسی قرار گیرد.

- نمونه S1.25G0.25A+ حاوی ۱/۲۵ درصد الیاف فولادی، ۰/۲۵ درصد پلی پروپیلن و حباب‌زا عملکرد قابل توجهی را در تمام آزمایش‌ها ارائه داده است. با وجود تاثیر منفی حباب‌زا بر روی مقاومت‌های فشاری و کششی بتن، در این نمونه مقاومت فشاری و کششی نسبت به نمونه فاقد الیاف و حباب‌زا افزایش داشته است و همچنین دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان نیز به میزان قابل توجهی بهبود یافته است.

در شکل ۱۰ میزان مواد جدا شده نمونه‌های یکسان حاوی حباب‌زا و فاقد حباب‌زا با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همانطور که در این شکل مشاهده می‌شود، افزودن حباب‌زا، وزن مواد جدا شده از نمونه در اثر چرخه‌های ذوب و یخبندان را به میزان چشم‌گیری کاهش داده است و در برخی از موارد این میزان به ۲۵۰ درصد می‌رسد. شکل ۱۱ به منظور بررسی تاثیر حباب‌زا بر روی تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی رسم شده است. با مقایسه نتایج شکل ۱۰ و ۱۱ می‌توان به این نتیجه مهم رسید که افزودن حباب‌زا تاثیر کمتری بر روی مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی در مقایسه با میزان مواد جدا شده از نمونه داشته و حداکثر باعث کاهش تغییرات آن به میزان ۱۲۰ درصد می‌شود (حال آنکه تاثیر آن بر روی میزان مواد جدا شده به ۲۵۰ درصد می‌رسد).

اگرچه استفاده از افزودنی حباب‌زا باعث افزایش دوام بتن در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان می‌شود، این افزودنی باعث کاهش شدید مقاومت فشاری و کششی نیز می‌گردد. استفاده هم‌زمان از الیاف ترکیبی و حباب‌زا می‌تواند باعث برطرف کردن این نقص و در نتیجه بهبود هم‌زمان خصوصیات مکانیکی و دوام بتن نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف و حباب‌زا گردد. برای مثال، نمونه‌ی حاوی ۱ درصد الیاف فولادی و ۰/۵ درصد الیاف شیشه که حاوی حباب‌زا نیز می‌باشد، دارای مقاومت فشاری و کششی بهتری نسبت به نمونه‌ی فاقد الیاف بوده و دوام این نمونه در برابر چرخه‌های ذوب و یخبندان نیز بالاتر می‌باشد.

در نهایت، طبق نتایج این پژوهش با توجه به اینکه در بعضی از نمونه‌ها مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی پس از چرخه‌های ذوب و یخبندان کاهش چشمگیری نیافته (به این معنی که بافت داخلی بتن آسیب کمی دیده)، ولی در همین نمونه‌ها سطح بتن دچار پوسته‌پوسته شدن شدید شده، بهتر است میزان تغییرات وزن نمونه به عنوان یک پارامتر کمکی در کنار مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی اندازه‌گیری شود. چرا که، با توجه به مشاهدات انجام گرفته بر روی سطح نمونه‌ها، تغییرات مدول الاستیسیته دینامیکی نسبی نمی‌تواند اطلاعاتی کافی در مورد خرابی‌های سطحی بتن را ارائه دهد.

#### ۴- نتیجه‌گیری

در پژوهش حاضر تاثیر استفاده از الیاف فولادی، شیشه، پلی پروپیلن و همچنین افزودنی حباب‌زا بر روی دوام بتن در برابر چرخه‌های

## ۵- مراجع

- response of exterior RC column-to steel beam connections, *Journal of Structural Engineering*, 126(10), 1113-1121, 2000.
- [14] Parra-montesinos G., High-performance fiber-reinforced cement composites; an alternative for seismic design of structures, *ACI Structural Journal*, 102, 668-675, 2005.
- [15] Ruby S., Geethanjalee C., Varghese J., Priya M., Influence of Hybrid Fiber on Reinforced Concrete. *International Journal of Advanced Structures and Geotechnical Engineering*, 2014.
- [16] Banthia N., Sappakittipako M., Toughness enhancement in steel fiber reinforced concrete through fiber hybridization, *Cement and Concrete Research*, 37(9) 1366–1372, 2007.
- [17] Nili M., Zaheri M., Deicer salt-scaling resistance of non-air-entrained roller-compacted concrete pavements, *Construction and Building Materials*, 25(4) 1671-1335, 2011.
- [18] Gao P., Wu S., Lin P., The characteristics of air void and frost resistance of RCC with fly ash and expansive agent, *Construction and Building Materials*, 20(8), 586-590, 2006.
- [19] Yener E., Hınısliolu S., The Effects of Silica Fume and Fly Ash on the Scaling Resistance and Flexural Strength of Pavement Concretes, *Road Materials and Pavement Design*, 12(1), 177-194, 2011.
- [20] Pigeon M., Pleau R., Azzabi M., Durability of Microfiber-Reinforced Mortars, *Cement and Concrete Research*, 26(4), 601-609, 1996.
- [21] Niu D., Jiang L., Bai M., Study of the performance of steel fiber reinforced concrete to water and salt freezing condition, *Materials and Design*, 44, 2267-2273, 2013.
- [22] Quanbing Y., Beirong Z., Effect of steel fiber on the deicer-scaling resistance of concrete, *Cement and Concrete Research*, 35(12), 1360-2363, 2005.
- [23] Cantin R., Pigeon M., Deicer salt scaling resistance of steel-fiber-reinforced concrete, *Cement and Concrete Research*, 26(11), 1639-1648, 1996.
- [24] Berkowskia P., Kosior-Kazberuk M., Effect of fiber on the concrete resistance to surface scaling due to cyclic freezing and thawing, XXIV R-S-P seminar, *Theoretical Foundation of Civil Engineering*, 2015.
- [25] Xin Y., Guohua Z., Liang Y., Freeze/thaw durability of carbon fiber reinforced concrete, *Applied Mechanics and Materials*, 174, 816-820, 2012.
- [26] Jang J.G., Kim H.K., Kim T.S., Min B.J., Lee H.K., Improved flexural fatigue resistance of PVA fiber-reinforced concrete subjected to freezing and thawing cycles, *Construction and Building*
- [1] Richardson A., Coventry K., Edmondson V., Dias E., Crumb rubber used in concrete to provide freeze-thaw protection (optimal particle size), *Journal of Cleaner Production*, 112 (1), 599–606, 2016.
- [2] Medina C., Rojas M.I.S., Frías M., Freeze-thaw durability of recycled concrete containing ceramic aggregate, *Journal of Cleaner Production*, 40, 151–160, 2013.
- [3] Jang J., Kim H., Kim H., Lee H., Resistance of coal bottom ash mortar against the coupled deterioration of carbonation and chloride penetration, *Materials and Design*, 93,160–167, 2016.
- [4] Reinhardt H., Naaman A., Tailored properties for structural performance, *HPFRCC. E& FN Spon*, 18-32, 1992.
- [5] Li V., Wu H., Micromechanics based design for pseudo strain-hardening in cementitious composites, *Eng Mech ASCE*, Texas, United States, (1992).
- [6] Krstulovic-Opara N., Malak S., Tensile behavior of slurry infiltrated mat concrete, *ACI*, 39-46, 1997.
- [7] Rokugo K., Kunieda M., Kamada T., Fujimoto Y., Structural applications of strain hardening type DFRCC as tension carrying material, *Proceedings of the JCI International Workshop on DFRCC*. 249-258, 2002.
- [8] Yun H., Yang I., Kim S., Jeon E., Choi C., Fukuyama H., Mechanical properties of high performance hybrid fibre reinforced cementitious composites (HPHFRCCs), *Magazine of Concrete Research*, 59(4), 275-271, 2007.
- [9] Canbolat B., Parra-Montesinos G., Wight J., Experimental study on the seismic behavior of high-performance fiber-reinforced cement composite coupling beams, *ACI Structural Journal*. 102, 59-166, 2005.
- [10] Yun H., Kim S., Jeon E., Park W., Lee Y., Effects of fibre-reinforced cement composites' ductility on the seismic performance of short coupling beams, *Magazine of Concrete Research*, 60(3), 223-233, 2008.
- [11] Athanasopoulou A., Shear strength and drift capacity of reinforced concrete and high-performance fiber reinforced concrete low-rise walls subjected to displacement reversals, *Ph.D. Dissertation*, 2010.
- [12] Kim S., Yun H., Shear performance of precast SHCC infill walls for seismic retrofitting of non-ductile frames, *Magazine of Concrete Research*, 62(12), 925-934, 2010.
- [13] Parra-Montesinos G., Wight J., Seismic

Materials, 59, 129–135, 2014.

[27] Remzi Şahin, Taşdemir M.A., Gul R., Celik C., Optimization Study and Damage Evaluation in Concrete Mixtures Exposed to Slow Freeze–Thaw Cycles, Journal of Material in Civil Engineering, 19(7), 2007.

[28] Wang D., Zhou X., Meng Y., Chen Z., Durability of concrete containing fly ash and silica fume against combined freezing-thawing and sulfate attack, Construction and Building Materials, 147, 398–406, 2017.

[29] Mao J., Ayuta K., Freeze–Thaw Resistance of Lightweight Concrete and Aggregate at Different Freezing Rates, Journal of Materials in Civil Engineering, 20(1), 2008.

[30] Kuosa H., Ferreira R., Holt E., Leivo M., Vesikari E., Effect of coupled deterioration by freeze–thaw, carbonation and chlorides on concrete service life, Cement and Concrete Composites 47, 32–40, 2014.

[31] ASTM C672 / C672M, Standard Test Method for Scaling Resistance of Concrete Surfaces Exposed to Deicing Chemicals, in, 2012.

[32] B.E. 1340:2003, Concrete kerb units. Requirements and test methods, in, 2003.

[33] ASTM C1262 / C1262, Standard Test Method for Evaluating the Freeze-Thaw Durability of Dry-Cast Segmental Retaining Wall Units and Related Concrete Units, in, 2016.

[34] ASTM C666/C666M, Standard Test Method for Resistance of Concrete to Rapid Freezing and Thawing. Reapproved, in, 2012.

[35] ASTM C150/C150M0-1205, Standard Specification for Portland Cement, in, 2011.

[36] ASTM C 496/C 496M – 04, Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens, in, 2014.

[37] BS EN 12390-3:2009, Testing hardened concrete-Part 3: Compressive strength of test specimen, in, 2009.

## Evaluation of hybrid fiber reinforced concrete subjected to freezing and thawing cycles using relative dynamic modulus of elasticity

M. Reza Esafahi \*

Professor, Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran.

Mehrad Rajabzade

M.Sc., Eqbal Lahoori Institute of Higher Education, Mashhad, Iran

Ahmad R. Ramezani

M.Sc., Ferdowsi University of Mashhad, Mashhad, Iran

### Abstract

Hybrid Fiber Reinforced Concrete, a composite obtained by mixing at least 2 different types of fibers, is extensively explored by researchers due to its superior mechanical properties. The present study is aimed to investigate the effect of incorporation of steel, glass and polypropylene fibers as well as the air entraining admixture on the durability of concrete subjected to freezing and thawing cycles, compressive strength and split tensile strength. In order to evaluate the durability of concrete specimens after subjecting the specimens to freezing and thawing cycles, relative dynamic modulus of elasticity and the percentage of the weight loss were measured in 3 different stages (1) prior to starting the main test (2) after subjecting the specimens to 150 cycles of freezing and thawing (3) after subjecting the specimens to 300 cycles of freezing and thawing. Based on the results of the experimental program it appears that utilization of specific combination of fibers at specific volume fractions along with air entraining admixture results in significant improvement of durability of the concrete specimens. The best performance in freezing and thawing test belongs to the specimen containing 0.5% of PP fibers and 1% of steel fibers in which the relative dynamic modulus of elasticity measured after 300 cycles dropped 5%, while the modulus of elasticity for control specimens decreased 30% after these cycles. It is worth noting that the simultaneous monitoring of modulus of elasticity and the weight loss in a specimen can provide more detailed information on the durability of the specimen.

**Keywords:** Hybrid fiber reinforced concrete, freezing and thawing cycles, relative dynamic modulus of elasticity, weight loss, air entraining admixture.

---

\* Corresponding Author: esfahani@um.ac.ir