

Laboratory Investigation of Polyethylene Glycol as a Concrete Shrinkage Reducing Admixture (SRA)

A. Bagheri*, Associate Professor, Faculty of Civil Eng., K. N. Toosi University of Technology
bagheri@kntu.ac.ir

M.H. Noormohammadbeyk, M.Sc. Construction Eng and Management. K. N. Toosi University of Technology

S.H. Kashian, M.Sc. in Construction Engineering and Management. K. N. Toosi University of Technology
H Zanganeh, M.Sc. in Structural Engineering. K. N. Toosi University of Technology

Abstract

The use of shrinkage reducing admixtures, is one of the methods for reducing concrete drying shrinkage. As many of commercial shrinkage reducing admixtures are glycol-based, in this study the performance of polyethylene glycol as a shrinkage reducing admixture was studied. In the first phase the basic properties of the material were determined and its effect on workability, compressive strength development and free shrinkage of cement mortars containing various dosages of this material, from 1.5 to 3 % by cement weight, was investigated. In the second phase of this research, the effect of polyethylene glycol on various properties of concrete, including; workability, compressive and tensile strength development, free shrinkage and cracking potential in restrained ring test was studied. The results showed that using polyethylene glycol at a dosage of 2 and 3% by cement weight results in considerable reduction in free shrinkage and also the cracking potential under restrained conditions. However the effect is lower than that reported for the commercial materials.

Keywords: Drying Shrinkage, Shrinkage Reducing Admixture, Polyethylene Glycol, Restrained Ring Test.

بررسی آزمایشگاهی عملکرد پلی اتیلن گلیکول به عنوان ماده کاهنده جمع شدگی بتن (SRA)

دریافت مقاله: ۱۳۹۹-۱۱-۲۱

پذیرش مقاله: ۱۳۹۹-۱۲-۲۵

علیرضا باقری*

دانشیار دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

محمد حسین نورمحمد بیک

کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

m.h.noormohammadbeyk@gmail.com

سید حسین کاشیان

کارشناسی ارشد مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

Hkashian1993@gmail.com

حامد زنگانه

مدرس دانشکده مهندسی عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

hamedzanganeh@gmail.com

چکیده

یکی از روش‌های کاهش جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، استفاده از مواد افزودنی کاهنده جمع‌شدگی می‌باشد. هر چند این مواد با نام‌های تجاری مختلف عرضه می‌گردند، در بسیاری موارد ماده پایه آنها گلیکولی می‌باشد. در این تحقیق به بررسی عملکرد پلی اتیلن گلیکول به عنوان ماده کاهنده جمع‌شدگی پرداخته شده است. بررسی آزمایشگاهی شامل دو فاز بوده است. در فاز اول آزمایش‌ها خصوصیات این ماده تعیین و همچنین تاثیر آن بر روی کارایی، مقاومت فشاری و جمع‌شدگی آزاد مخلوط‌های ملات کنترل و مخلوط‌های ملات حاوی درصد‌های مختلف پلی اتیلن گلیکول شامل ۱/۵، ۲، ۳/۵ و ۳ درصد وزنی سیمان بررسی شده است. در فاز دوم این پژوهش تاثیر ماده پلی اتیلن گلیکول روی خواص مختلف بتن شامل کارایی، مقاومت فشاری و کششی، جمع‌شدگی آزاد و پتانسیل ترک‌خوردگی در آزمایش حلقه جمع‌شدگی مقید مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشانگر این است که با استفاده از پلی اتیلن گلیکول به میزان ۲ الی ۳ درصد وزنی سیمان، امکان کاهش قابل توجه در جمع‌شدگی آزاد و همچنین کاهش پتانسیل ترک‌خوردگی بتن وجود دارد. در عین حال میزان تاثیر این ماده در مقایسه با موارد گزارش شده برای مواد تجاری کمتر بوده است.

کلمات کلیدی: جمع‌شدگی ناشی از خشک‌شدن، افزودنی کاهنده جمع‌شدگی، پلی اتیلن گلیکول، آزمایش حلقه جمع‌شدگی

جمع شدگی ناشی از خشک شدن یکی از خصوصیات ذاتی بتن است که باعث کاهش حجم بتن در طی زمان شده و در صورت مقید شدن می‌تواند منجر به ترک خوردگی گردد [۱]. تأثیر جمع‌شدگی روی سازه‌ها و قطعات بتنی با سطح زیاد نظیر رویه‌ها و کف‌های بتنی قابل توجه بوده و کنترل ترک خوردگی ناشی از جمع‌شدن از دغدغه‌های اصلی در این نوع کاربردها می‌باشد [۲-۳]. روش‌های مختلفی جهت کاهش اثر جمع‌شدگی در سازه‌ها به کار رفته‌اند که تعبیه درزها، استفاده از شبکه آرماتور، مش و یا الیاف فولادی قابل ذکر است [۴-۵].

یکی دیگر از راه کارهای کنترل اثرات جمع‌شدگی بتن، استفاده از مواد جبران‌کننده جمع‌شدگی می‌باشد. این مواد باعث ایجاد انبساط در بتن می‌گردند که در صورت مقید شدن، منجر به ایجاد تنش‌های فشاری می‌گردد و در نتیجه تنش‌های کششی ناشی از جمع‌شدگی کاهش می‌یابند. لیکن استفاده از این مواد در صورتی که قید روی انبساط به اندازه کافی نباشد می‌تواند منجر به آسیب بتن گردد و در کاربرد آن دقت ویژه بایستی به کار رود [۶-۷].

از راه کارهای نسبتاً جدید کنترل اثرات جمع‌شدگی بتن، استفاده از مواد کاهنده جمع‌شدگی (SRA) می‌باشد. مواد کاهنده جمع‌شدگی مواد جدیدتری نسبت به مواد جبران‌کننده هستند و مستقیماً مقدار جمع‌شدگی بتن را کاهش می‌دهند. این مواد ابتدا در سال ۱۹۸۳ توسط ساتو و همکاران اختراع گردیده است و به تدریج در صنعت بتن به کار رفته‌اند [۸]. استفاده از این مواد در پروژه‌های داخل کشور گزارش نشده است لیکن دو مورد کار آزمایشگاهی در این خصوص گزارش شده است [۹-۱۱].

یکی از نکات محدود کننده در توسعه استفاده از مواد SRA در کشور، هزینه بسیار بالای آن می‌باشد. با توجه به اینکه مشخص شده که برخی مواد تجاری کاهنده جمع‌شدگی بر پایه مواد گلیکولی بوده است [۱۰، ۱۲]، در تحقیق حاضر عملکرد ماده پلی اتیلن گلیکول که در حال حاضر در کشور تولید می‌شود به عنوان ماده کاهنده جمع‌شدگی مورد بررسی قرار گرفت. هزینه این ماده کمتر از ۱۰ درصد ماده تجاری موجود در سطح بین‌المللی می‌باشد که می‌تواند زمینه ساز تولید و کاربرد مواد کاهنده جمع‌شدگی در کشور گردد. ابتدا پیشینه‌ای از تحقیق‌های انجام شده در خصوص مواد کاهنده جمع‌شدگی ارائه شده و سپس به برنامه آزمایشگاهی تحقیق حاضر پرداخته می‌شود.

افزودنی کاهنده جمع‌شدگی^۱، نوعی سورفکتانت^۲ (عامل فعال سطحی) است که با کاهش کشش سطحی آب منفذی، تنش مؤئینه را کاهش داده و در نتیجه موجب کاهش جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن می‌شوند [۱۳]. شایان توجه است که نتایج نشان داده‌اند که این مواد دارای اثرات جانبی بوده و باعث افزایش کارایی بتن شده و روند کسب مقاومت بتن را کند می‌کنند [۱۰-۱۲]. در جدول ۱ ضمن ارائه خصوصیات برخی مواد کاهنده جمع‌شدگی مورد استفاده در تحقیقات قبلی، اثرات جانبی آنها روی خواص بتن ارائه شده است.

استفاده از مواد کاهنده جمع‌شدگی، موجب کاهش کشش سطحی آب می‌شود [۱۲]. نتایج حاصل از تحقیق پیز و همکاران نشان داده است که با افزودن ماده کاهنده جمع‌شدگی تا مقدار ۱۰ درصد وزنی به آب، کشش سطحی محلول حدود ۵۴ درصد کاهش می‌یابد و پس از آن با افزایش غلظت، کشش سطحی ثابت می‌ماند [۱۹]. ران و همکاران [۲۰] طی بررسی‌هایی که انجام داده‌اند، دریافته‌اند که این مواد باعث کاهش قلیائیت آب منفذی بتن از طریق کاهش حلالیت قلیایی‌های سیمان در آب می‌شوند. همچنین این محققین مطرح نمودند که کاهش میزان دو عنصر پتاسیم و سدیم در کاهش قلیائیت آب منفذی تأثیر بیشتری نسبت به بقیه عناصر دارند.

¹ SRA (*Shrinkage Reducing Admixtures*)

² Surfactant

جدول ۱ خصوصیات افزودنی‌های کاهنده جمع‌شدگی و تأثیر افزودنی‌های کاهنده جمع‌شدگی بر خواص مخلوط‌ها

منابع	اثر افزودنی بر روی خواص مخلوط (%)			میزان افزودنی (%)	رنگ	pH	دانسیته	نوع افزودنی (بر پایه)	افزودنی کاهنده جمع‌شدگی	نوع مخلوط
	مقاومت کششی	مقاومت فشاری	کارایی							
[۱۱]	(۱۷-۷)-	(۹-۴)-	۱۷-۸	۲، ۱/۵، ۱	بی‌رنگ	۴/۸	۰/۹۹	گلیکول	SRA تجاری	بتن معمولی
[۱۵]	(۷-۰)-	(۹-۲)-	۱۱۸-۱۵	۰/۵، ۱، ۱/۵، ۲	-	۷-۵	۱/۱۲۶	-	پلی اتیلن گلیکول	
[۱۶]	(۳-۹)-	(۱۷-۲)-	۱۰-۲	۴، ۲، ۱	زرد روشن	-	۱/۰۲	گلیکول	SRA تجاری	بتن خودتراکم
[۱۷]	-	۱۲	۰	۱	-	-	-	-	پلی اتیلن گلیکول	
[۱۸]	۳۹-۱۹	(۱۹-۳)-	-	۳، ۱/۵، ۰/۷۵	بی‌رنگ	-	۱/۰۴	-	گلیکول	بتن سبک‌وزن

محققین مختلفی به بررسی اثر مواد تجاری بر پایه گلیکول، بر جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن پرداخته‌اند. نتایج تحقیق‌های باقری و همکاران نشانگر کاهش قابل توجه میزان جمع‌شدگی نسبت به مخلوط کنترل در اثر استفاده از این افزودنی بوده است [۱۰، ۱۱]. مقدار کاهش در ۱/۵ درصد مصرف، ۱۴ درصد بوده که با افزایش مقدار استفاده به ۲ درصد وزنی سیمان، بالغ بر ۳۱ درصد شده است. در جدول ۲ خلاصه‌ای از نتایج دیگر محققین در خصوص تأثیر مواد تجاری کاهنده جمع‌شدگی در کاهش جمع‌شدگی آزاد مواد پایه سیمانی ارائه شده است. مقادیر مصرف در این تحقیقات از ۱ تا ۵ درصد وزنی سیمان را شامل بوده است. مقادیر کاهش در جمع‌شدگی نیز عمدتاً در محدوده ۲۱ تا ۴۵ درصد بوده است. در خصوص استفاده از مواد پایه به عنوان کاهنده جمع‌شدگی مطالعات انجام شده محدود بوده است. کورینالدسی و همکاران [۱۷]، از ماده پلی اتیلن گلیکول به عنوان ماده کاهنده جمع‌شدگی استفاده نمودند. در این تحقیق که روی جمع‌شدگی آزاد بتن‌های خودتراکم صورت گرفته، نتایج نشانگر امکان کاهش ۴۰ درصدی در جمع‌شدگی آزاد در اثر استفاده از پلی اتیلن گلیکول، بوده است.

مقید شدن کرنش‌های جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن می‌تواند باعث ترک خوردگی بتن شود [۶]. آزمایش استاندارد که برای ارزیابی پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌ها تحت شرایط جمع‌شدگی مقید به کار می‌رود، آزمایش حلقه جمع‌شدگی مطابق با استاندارد ASTM-C1581 [۳۱] می‌باشد. با استفاده از این آزمایش عملکرد مواد تجاری کاهنده جمع‌شدگی در کنترل ترک‌های جمع‌شدگی مقید توسط برخی از محققین بررسی شده است. باقری و همکاران [۱۰] با استفاده از آزمایش حلقه جمع‌شدگی به بررسی اثر ماده تجاری کاهنده جمع‌شدگی بر پایه گلیکول در کاهش پتانسیل ترک خوردگی بتن پرداختند. آزمون‌های ساخته شده در این تحقیق شامل آزمون‌های بتن کنترل و بتن حاوی ۱/۵ درصد ماده تجاری کاهنده جمع‌شدگی بوده است. نتایج حاصل نشان می‌دهند که استفاده از ۱/۵ درصد از این افزودنی سبب افزایش سن ظهور ترک از ۱۱ روز به ۴۰ روز شده است. همچنین گزارش شده که استفاده از این افزودنی، عرض ترک را از ۱/۲۵ میلی‌متر به ۰/۴۵ میلی‌متر کاهش داده است. همچنین شاه و همکاران [۲۴] با استفاده از ۲٪ SRA و گونیسی و همکاران [۱۸] با استفاده از ۱/۵ درصد SRA به نتایج مشابهی دست یافتند. دمیر و همکاران [۲۳] با استفاده از ۱ درصد SRA، گزارش کردند که سن وقوع ترک از ۱۲ روز به ۱۵ روز افزایش یافته و عرض ترک نیز از ۱/۰۵ میلی‌متر به ۰/۷۵ میلی‌متر کاهش یافته است. پاسوئلو و همکاران [۲۱] با استفاده از ۴ درصد SRA شاهد افزایش سن ترک خوردگی از ۱۰ به ۲۱ روز و کاهش عرض ترک از ۰/۸۵ به ۰/۵ میلی‌متر بوده‌اند.

جدول ۲ تأثیر افزودنی‌های کاهنده جمع‌شدگی بر جمع‌شدگی مخلوط‌ها

منابع	کاهش جمع‌شدگی آزاد نسبت به کنترل (%)	سن نهایی قرائت (روز)	مدت زمان عمل‌آوری (روز)	میزان افزودنی (%)	نوع افزودنی (بر پایه)	افزودنی کاهنده جمع‌شدگی	مواد سیمانی
[۱۱]	۳۱، ۱۴، ۶/۵	۱۲۰	۳	۲، ۱/۵، ۱	گلیکول	SRA	بتن معمولی
[۲۴]	۴۵، ۳۲	۵۰	۱	۲، ۱	گلیکول	SRA	
[۲۵]	۲۸	۱۲۰	۱	۱/۵	گلیکول	SRA	
[۲۶]	۴۹	۹۸	۱	۴	گلیکول	SRA	
[۲۱]	۴۶	۲۸	۱	۱	گلیکول	SRA	
[۱۶]	۴۰-۲۱	۱۲۰	۱	۴، ۲، ۱	گلیکول	SRA	بتن خودتراکم
[۱۷]	۴۰	۶۰	۱	۱	-	پلی اتیلن گلیکول	
[۲۷]	۱۵، ۹	۲۸	۱	۲، ۱	-	پلی اتیلن گلیکول ۴۰۰	ملاط حاوی سرباره قلیایی فعال
[۲۷]	۰، ۴	۲۸	۱	۲، ۱	-	اتیلن گلیکول	
[۲۸]	۸۵-۷	۱۸۰	۱	۲، ۱	گلیکول	SRA	
[۲۹]	۲۱، ۲۳	۱۸۰	۶، ۰	۲	گلیکول	SRA	ملاط سیمانی
[۳۰]	۴۴-۲۳	۱۸۲	۱۸۲ ساعت	۵	گلیکول	SRA	خمیر سیمان

با توجه به محدود بودن تحقیق‌های انجام شده در سطح بین‌المللی در مورد مواد پایه افزودنی‌های کاهنده جمع‌شدگی، خصوصاً در بخش جمع‌شدگی مقید، و این نکته که تاکنون تحقیق در این خصوص در داخل کشور انجام نشده است، در این تحقیق به بررسی تأثیر پلی اتیلن گلیکول به عنوان ماده پایه کاهنده جمع‌شدگی پرداخته شده است.

۲. برنامه آزمایشگاهی

در تحقیق حاضر از پلی اتیلن گلیکول با درجه صنعتی به عنوان ماده پایه جهت ارزیابی عملکرد آن به عنوان ماده کاهنده جمع‌شدگی استفاده شده است. آزمایش‌های این تحقیق در دو فاز انجام شده است. در فاز اول، خواص پلی اتیلن گلیکول مورد استفاده تعیین و همچنین تأثیر آن در درصد‌های مختلف شامل ۱/۵، ۲، ۲، ۵ و ۳ درصد وزنی سیمان روی خواص کارایی، خواص مقاومتی و جمع‌شدگی آزاد ملاط‌های سیمانی مورد بررسی قرار گرفت. در فاز دوم آزمایش‌ها تأثیر پلی اتیلن گلیکول روی خواص کارایی، خواص مقاومتی، جمع‌شدگی آزاد بتن بررسی گردید و همچنین تأثیر آن روی پتانسیل ترک خوردگی تحت جمع‌شدگی مقید تعیین گردید.

۲-۱. مصالح مورد استفاده

۲-۱-۱. سیمان

در این تحقیق، سیمان پرتلند تیپ دو کارخانه سیمان ساوه مورد مصرف قرار گرفته است که مشخصات آن منطبق بر استاندارد ASTM-C150 [۳۲] بوده است. مشخصات سیمان در جداول ۳ و ۴ ارائه شده است.

جدول ۳- ترکیب‌های شیمیایی مورد استفاده در بتن بر حسب درصد

نامحلول	باقیمانده	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
۰/۷	۰/۷	۲۲/۳	۴/۶	۳/۱	۶۳/۱	۲/۸	۱/۸	۰/۱۴	۰/۴۱	۴۷	۲۸/۵	۷	۹

جدول ۴ مشخصات فیزیکی و مکانیکی سیمان مورد استفاده

غلظت نرمال خمیر سیمان (%)	جرم حجمی سیمان (gr/cm^3)	زمان گیرش اولیه خمیر نرمال سیمان (min)	زمان گیرش نهایی خمیر نرمال سیمان (min)	مقاومت فشاری ملات سیمان ۲۸ روزه (MPa)
۲۴/۵	۳/۰۹۲	۱۹۵	۲۴۵	۳۳/۲

۲-۱-۲. مصالح سنگی

مصالح سنگی به کار رفته در این پروژه از منابع شهرستان شهریار واقع در جنوب غرب تهران تأمین گردیده است. با توجه به اینکه حداکثر اندازه مجاز مصالح دانه‌ای مورد استفاده در بتن برای آزمایش جمع‌شدگی حلقه مقید طبق استاندارد ASTM-C1581 [۳۱] باید به ۱۳ میلی‌متر محدود گردد، لذا حداکثر اندازه مصالح درشت‌دانه به ۱۲/۵ میلی‌متر محدود شده است. دانه بندی سنگدانه‌ها مطابق با استاندارد ASTM-C33 [۳۲] انجام شده است. جرم جسی شن و ماسه برابر ۲/۵۵ گرم برسانتیمتر مکعب و مقادیر جذب آب آنها به ترتیب برابر ۲/۰۵ و ۳/۶۸ درصد بدست آمده است.

۲-۱-۳. پلی اتیلن گلیکول

ماده پایه مورد استفاده در این تحقیق به عنوان ماده کاهنده جمع‌شدگی، پلی‌اتیلن گلیکول با درجه صنعتی است که در شکل ۱ نشان داده شده است. خواص این ماده در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶ مشخصات پلی اتیلن گلیکول مورد استفاده

نام تجاری	نماد	حالت افزودنی	رنگ	چگالی (gr/Cm^3)	pH
Polyethylene glycol 400	PE	مایع	بی رنگ	۱/۱۲۷	۷/۵



شکل ۱ مقایسه ظاهری پلی اتیلن گلیکول با آب

۲-۲. فاز اول آزمایش‌ها (ملات‌های سیمانی)

مخلوط‌های ملات مورد بررسی در این تحقیق شامل ملات کنترل و ملات‌های حاوی ۱/۵، ۲، ۳ و ۲/۵ درصد پلی‌اتیلن گلیکول (نسبت به وزن سیمان) است. جزئیات ترکیب مخلوط‌ها در جدول ۷ ارائه شده است. حروف "C" و "PE" به ترتیب کد شناسایی منصوب به مخلوط کنترل و مخلوط‌های حاوی پلی‌اتیلن گلیکول است. همچنین عدهای جلوی کد PE، به میزان درصد مصرفی ماده اشاره دارد.

جدول ۷ طرح اختلاط‌های آزمون‌های ملات سیمانی

مواد کاهنده جمع شدگی (نسبت به وزن سیمان) (%)	عمل آوری (روز)		کد مخلوط
	نسبت آب سیمان	نسبت ماسه سیمان	
-	۰/۵	۳	C
۱/۵ و ۲ و ۳ و ۲/۵	۰/۵	۳	PE 1/5, 2, 2/5, 3%

۲-۲-۱. آزمایش‌های انجام شده

۲-۲-۱-۱. کشش سطحی

آزمایش کشش سطحی بر روی افزودنی کاهنده جمع‌شدگی به روش قطره معلق^۱ با استفاده از دستگاه اندازه‌گیری نوری زاویه تماس انجام شده است. در شکل ۲ نمایی از دستگاه در حال آزمایش کشش سطحی ارائه شده است.



شکل ۲ نمایی از دستگاه اندازه‌گیری زاویه تماس

۲-۲-۱-۲. میز جریان

در این پژوهش جهت اندازه‌گیری روانی ملات‌های سیمانی، از آزمایش میز جریان مطابق با استاندارد ASTM-C230 [۳۴] استفاده شده است.

۲-۲-۱-۳. مقاومت فشاری

آزمایش مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی مورد مطالعه طبق استاندارد ASTM-C109 [۳۵] بر روی آزمون‌های مکعبی ۵۰×۵۰ میلی‌متر در سنین ۷ و ۲۸ روز انجام شد.

۲-۲-۱-۴. جمع‌شدگی آزاد ناشی از خشک شدن

جهت تعیین مقدار جمع‌شدگی آزاد ناشی از خشک شدن، آزمایش تغییر طول ملات سیمانی مطابق با استاندارد ASTM C 157 [۳۶] و ASTM C 490 [۳۷] بر روی آزمون‌های با ابعاد ۲۵×۲۵×۲۸۵ میلی‌متر انجام پذیرفت. پس از قالب‌گیری ملات‌های سیمانی، آزمون‌ها به مدت ۲۴ ساعت در محیطی با رطوبت نسبی ۹۵ درصد و دمای ۲۳ درجه سانتی‌گراد قرار داده شدند و پس از باز کردن قالب‌ها، جهت تکمیل عمل آوری مرطوب، به مدت ۲ روز درون حوضچه‌ی آب اشباع از آهک قرار داده شدند. پس از پایان عمل آوری، آزمون‌ها جهت خشک شدن به کابینت م با دمای ۲۳±۲ و رطوبت نسبی ۴±۵۰ درصد منتقل شدند (شکل ۳-الف). اندازه‌گیری طول آزمون‌ها توسط دستگاه کامپراتور که در شکل ۳-ب نشان داده شده است، با دقت ۰/۰۰۲ میلی‌متر از لحظه باز کردن قالب و در بازه‌های زمانی انجام مورد نظر انجام گرفته است.

¹ Pendant Drop



(ب)



(الف)

شکل ۳ (الف) کابینت نگهداری آزمون‌های جمع‌شدگی آزاد، (ب) دستگاه کامپراتور و آزمون‌های اندازه‌گیری

۳-۲-۲ فاز دوم آزمایش‌ها (بتن)

مخلوط‌های بتن بررسی شده در این تحقیق شامل مخلوط بتن کنترل و مخلوط‌های حاوی ۲ و ۳ درصد پلی‌اتیلن گلیکول (نسبت به وزن سیمان) بوده است. با توجه به نتایج به دست آمده از آزمایش‌های فاز اول، درصدهای ۲ و ۳ درصد جهت انجام آزمایش‌های فاز دوم انتخاب گردید. جزئیات ترکیب مخلوط‌ها در جدول ۸ ارائه شده است.

جدول ۸ طرح اختلاط آزمون‌های بتن

مقدار پلی اتیلن گلیکول (نسبت به وزن سیمان) (%)	ریزدانه (kg/m^3)SSD	درشت‌دانه (kg/m^3)SSD	آب (kg/m^3)	سیمان (kg/m^3)	کد مخلوط
-	۱۰۵۱	۵۶۶	۲۱۰	۴۲۰	Ref
۲	۱۰۵۱	۵۶۶	۲۱۰	۴۲۰	PE 2%
۳	۱۰۵۱	۵۶۶	۲۱۰	۴۲۰	PE 3%

۳-۳-۱-۳ آزمایش‌های انجام شده

۳-۳-۱-۱-۲ اسلامپ

در این پژوهش، آزمایش اسلامپ منطبق با الزامات [۳۸] ASTM-C143 انجام شده است.

۳-۳-۱-۲-۲ خواص مقاومتی بتن

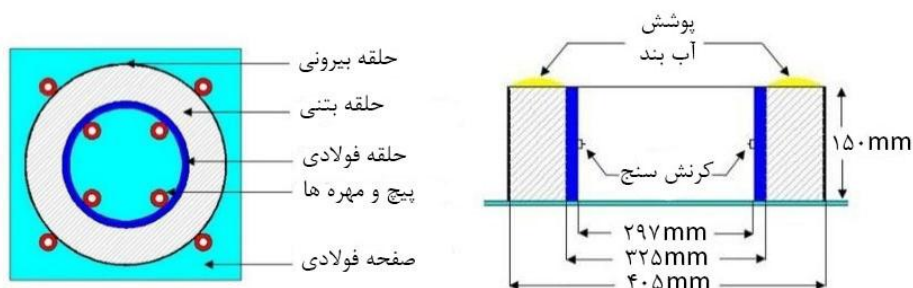
جهت اندازه‌گیری مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط‌ها، از آزمون‌های استوانه‌ای با ابعاد 100×200 میلی‌متر طبق استاندارد ASTM-C496 [۴۸] استفاده شده است. همچنین جهت اندازه‌گیری مقاومت فشاری مخلوط‌ها، از آزمون‌های مکعبی با ابعاد 100×100 میلی‌متر طبق استاندارد EN-12390-3 [۴۰] استفاده شده است. پس از عمل‌آوری مرطوب اولیه، آزمون‌ها به محیطی با رطوبت نسبی $4 \pm 50\%$ و دمای 23 ± 2 منتقل شدند. آزمایش‌های مقاومت کششی دو نیم شدن و فشاری در سنین ۱، ۳، ۷، ۱۴ و ۲۸ روز انجام شدند.

۳-۳-۱-۳-۲ جمع‌شدگی آزاد ناشی از خشک شدن

شرایط انجام این آزمایش بر روی آزمون‌های بتنی مشابه با آزمون‌های ملات سیمانی است با این تفاوت که ابعاد آزمون‌های بتنی $285 \times 75 \times 75$ میلی‌متر می‌باشد. همچنین قرائت اندازه آزمون‌های بتنی تا ۱۵۰ روز پس از خشک شدن ادامه یافت.

۴-۱-۳-۲. بررسی جمع‌شدگی مقید بتن در آزمایش حلقه جمع‌شدگی

آزمایش جمع‌شدگی مقید با استفاده از حلقه جمع‌شدگی طبق استاندارد ASTM-C1581 [۳۱] انجام شد. تجهیزات این آزمایش مطابق شکل های ۴ و ۵ شامل یک حلقه فولادی به ضخامت ۱۴ میلی‌متر، با قطر خارجی ۳۲۵ میلی‌متر و ارتفاع ۱۵۰ میلی‌متر و یک حلقه فولادی نازک با قطر داخلی ۴۰۵ میلی‌متر می‌باشد. همچنین ضخامت حلقه بتنی ۴۰ میلی‌متر است. برای کف این حلقه هم از یک صفحه پایه فولادی با ابعاد ۵۰۰×۵۰۰ میلی‌متر استفاده شده است. به منظور کاهش اصطحاککاک بین حلقه بتنی و صفحه فولادی، سطوح فولادی قبل از قالب‌گیری بتن، با روغن قالب پوشش داده شد.



شکل ۴. نمایی شماتیک از تجهیزات آزمایش حلقه بتنی [۱۰]



شکل ۵. حلقه بتنی تحت آزمایش

پس از قالب‌گیری آزمون‌ها، روی آن‌ها با استفاده از پارچه خیس و نایلون پوشانده تا رطوبت نسبی حداقل ۹۵ درصد فراهم گردد. همزمان با شروع عمل‌آوری حلقه‌های بتنی، برای هر آزمون از طریق دو عدد کرنش‌سنج نصب شده روی وجه داخلی حلقه فولادی، کرنش‌های اعمالی ناشی از جمع‌شدگی حلقه بتنی ثبت گردید. پس از گذشت ۲۴ ساعت، قالب‌های اطراف آزمون باز شدند. روی سطح فوقانی آزمون‌ها به وسیله پارافین پوشش داده شد تا از خروج رطوبت از سطوح فوقانی آزمون جلوگیری شود و خروج رطوبت فقط از سطوح جانبی صورت بگیرد. همچنین جهت عمل‌آوری مرطوب اولیه، روی سطوح فوقانی و جانبی آزمون‌ها به وسیله پارچه‌های خیس و نایلون به مدت دو روز پوشانده شد. پس از پایان دوره عمل‌آوری مرطوب اولیه مجموعاً به مدت سه روز، شرایط محیطی آزمون‌ها را به وضعیت رطوبت نسبی 50 ± 4 درصد و دمای 23 ± 2 درجه سانتی‌گراد تغییر داده شد. با شروع جمع‌شدگی ناشی از خشک شدن حلقه بتنی، در اثر قید اعمال شده توسط حلقه فولادی، تنش‌های کششی در حلقه بتنی ایجاد می‌شوند. زمانی که تنش‌های ایجاد شده در اثر جمع‌شدگی مقید از مقاومت کششی بتن فراتر رود، نمونه ترک

می خورد. به محض ترک خوردن حلقه بتنی، بخش قابل توجهی از تنش‌ها آزاد می‌گردد و کرنش‌سنج‌ها افت سریع کرنش‌های فشاری اعمال شده به حلقه فولادی را نشان می‌دهند. در استاندارد ASTM-C1581 [۳۱]، افت ناگهانی کرنش‌های حلقه فولادی به عنوان معیار ترک‌خوردگی ارائه شده است. همچنین به منظور تعیین سن ترک‌خوردگی، سطوح این آزمون‌ها، به طور چشمی نیز هر روز با ذره‌بین مورد بررسی قرار می‌گرفتند. طبق استاندارد، سن ترک خوردگی، مدت زمان سپری شده از لحظه قالب‌گیری تا لحظه وقوع اولین ترک است و زمان ترک‌خوردگی خالص، زمان بین شروع خشک شدن (پایان عمل‌آوری) تا لحظه وقوع اولین ترک است.

۳. نتایج حاصل و تفسیر آن‌ها

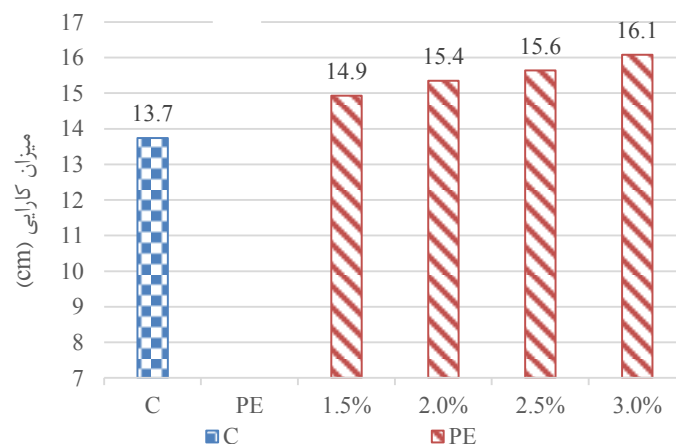
۳-۱. فاز اول آزمایش‌ها

۳-۱-۱. کشش سطحی پلی‌اتیلن گلیکول

میزان کشش سطحی پلی‌اتیلن گلیکول برابر $۴۵/۱۶ \text{ mN/m}$ تعیین گردید. در مقایسه با کشش سطحی آب که $۷۲/۸ \text{ mN/m}$ می‌باشد، پلی‌اتیلن گلیکول از کشش سطحی پایین‌تری برخوردار است.

۳-۱-۲. کارایی مخلوط‌های ملات بر اساس آزمایش میز سیلان

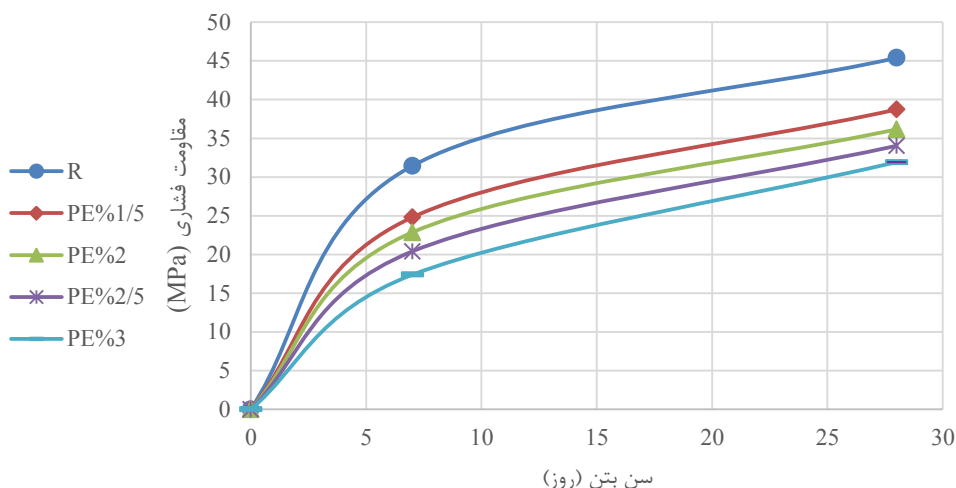
مقدار کارایی ملات کنترل و ملات‌های حاوی مقادیر مختلف پلی‌اتیلن گلیکول بر اساس قطر باز شدگی حلقه ملات روی میز سیلان در شکل ۶ ارائه شده است. مقدار باز شدگی ملات کنترل $۱۳/۷$ سانتی‌متر بوده است. همان‌طور که در شکل ۶ مشخص است، استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول، سبب افزایش کارایی ملات سیمان شده است. با افزودن $۱/۵$ ، ۲ ، $۲/۵$ و ۳ درصد پلی‌اتیلن گلیکول به مخلوط سیمانی، قطر باز شدگی به ترتیب حدود ۹ ، ۱۲ ، ۱۴ و ۱۷ درصد نسبت به ملات کنترل افزایش یافته است. شایان توجه است که نتایج حاصل از تحقیق‌های کومار و همکاران [۱۵] و ژان و همکاران [۱۲] نیز نشانگر افزایش کارایی در اثر استفاده از مواد تجاری کاهنده جمع‌شدگی است.



شکل ۶ میزان کارایی ملات‌های کنترل و حاوی پلی‌اتیلن گلیکول

۳-۱-۳. مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری ملات‌های مورد بررسی در شکل ۷ نمایش داده شده است.

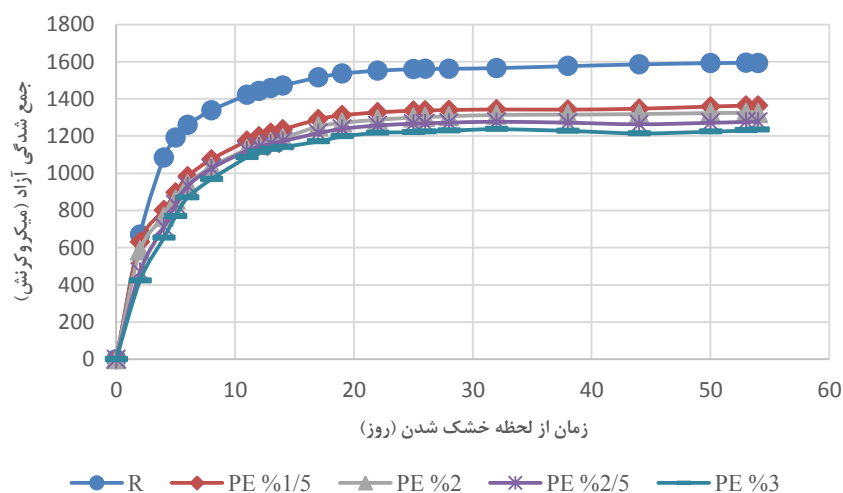


شکل ۷ مقاومت فشاری ملات‌های سیمانی کنترل، حاوی ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد پلی‌اتیلن گلیکول

نتایج آزمایش، نشانگر آن است که افزودن پلی‌اتیلن گلیکول در مقادیر ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد، سبب کاهش مقاومت ۲۸ روزه به ترتیب برابر ۱۵، ۲۱، ۲۵ و ۳۰ درصد شده است. شایان توجه است که نتایج تحقیقات گزارش شده روی مواد تجاری کاهنده جمع شدگی نیز نشانگر کاهش مقاومت بتن در اثر استفاده از این مواد بوده است. میزان کاهش گزارش شده در مقاومت فشاری از ۲ تا ۱۷ درصد بسته به میزان مصرف ماده تجاری کاهنده جمع شدگی بوده است [۱۱، ۱۶].

۳-۱-۴ جمع شدگی آزاد ناشی از خشک شدن

نتایج جمع شدگی آزاد ناشی از خشک شدن برای ملات‌های سیمانی با سه روز عمل آوری از لحظه شروع خشک شدن در شکل ۸ و جدول ۹ ارائه شده است. با توجه به نتایج حاصل شده، افزودنی پلی‌اتیلن گلیکول به طور قابل توجهی میزان جمع شدگی آزاد ناشی از خشک شدن ملات‌های سیمانی را نسبت به مخلوط کنترل کاهش داده است. همانطور که از جدول ۹ مشخص است میزان جمع شدگی آزاد ناشی از خشک شدن با افزایش درصد مصرف پلی‌اتیلن گلیکول کاهش بیشتری می‌یابد و در ۳ درصد مصرف بالغ بر ۲۲٫۵ درصد می‌گردد.



شکل ۸- تأثیر افزودن ۱/۵، ۲، ۲/۵ و ۳ درصد وزنی افزودنی پلی‌اتیلن گلیکول بر جمع شدگی آزاد ملات سیمانی

جدول ۹ تأثیر مواد افزودنی بر میزان جمع‌شدگی ملات‌های سیمانی

از لحظه شروع خشک شدن							مدت زمان عملی آوری (روز)	کد مخلوط
کاهش در جمع شدگی ۵۶ روزه نسبت به بتن شاهد (%)	جمع شدگی ۵۶ روزه ($\mu\text{m}/\text{m}$)	کاهش در جمع شدگی ۲۸ روزه نسبت به بتن شاهد (%)	جمع شدگی ۲۸ روزه ($\mu\text{m}/\text{m}$)	کاهش در جمع شدگی ۱۴ روزه نسبت به بتن شاهد (%)	جمع شدگی ۱۴ روزه ($\mu\text{m}/\text{m}$)			
-	۱۵۹۲	-	۱۵۶۲	-	۱۴۷۱	۳	Ref	
۱۴/۴	۱۳۶۲	۱۴/۲	۱۳۴۰	۱۶	۱۲۳۵	۳	PE %1/5	
۱۶/۹	۱۳۲۳	۱۶/۴	۱۳۰۶	۱۹/۲	۱۱۸۸	۳	PE %2	
۱۹/۸	۱۲۷۶	۱۸/۵	۱۲۷۲	۲۰/۳	۱۱۷۲	۳	PE %2/5	
۲۲/۵	۱۲۳۴	۲۱/۳	۱۲۲۹	۲۲/۵	۱۱۴۰	۳	PE %3	

شایان توجه است که محققین قبلی برای ملات‌ها و خمیره‌های سیمانی در مقادیر مصرف ۲ تا ۵ درصد مواد تجاری کاهنده جمع‌شدگی، کاهش جمع‌شدگی از ۲۱ تا ۴۴ درصد را گزارش کرده‌اند [۳۰، ۲۹].

۳-۲. نتایج فاز دوم آزمایش‌ها (مخلوط‌های بتن)

۳-۲-۱. مقدار اسلامپ

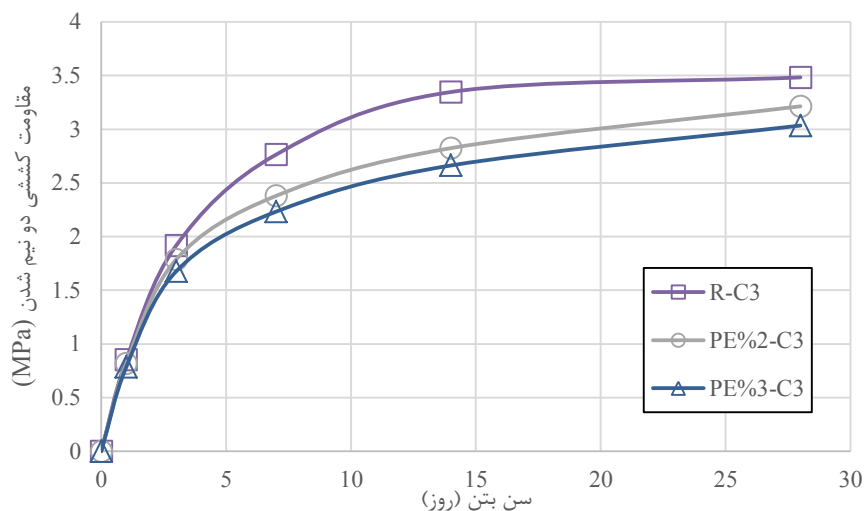
اسلامپ اندازه‌گیری شده برای مخلوط‌های بتنی، در جدول ۱۰ ارائه شده است. همان‌طور که در جدول مشخص است استفاده از پلی‌اتیلن گلیکول، سبب افزایش قابل توجه اسلامپ بتن شده است. کومار و همکاران [۱۵] نیز برای مقادیر مصرف پلی‌اتیلن گلیکول ۰/۵ تا ۲ درصد، افزایش ۱۵ تا ۱۱۸ درصدی در کارایی بتن را گزارش نمودند. برای مواد تجاری کاهنده جمع‌شدگی نیز محققین قبلی قدری افزایش در کارایی در حدود ۱۰ الی ۱۷ درصد را گزارش نموده‌اند [۱۶، ۱۱].

جدول ۱۰ مقادیر اسلامپ مخلوط‌های بتنی

کد مخلوط بتن	درصد مصرف ماده کاهنده جمع‌شدگی	اسلامپ (mm)	افزایش در اسلامپ نسبت به مخلوط کنترل (%)
Ref-C3	-	۱۰	-
PE%2-C3	۲	۱۷	۷۰
PE%3-C3	۳	۱۸/۵	۹۵

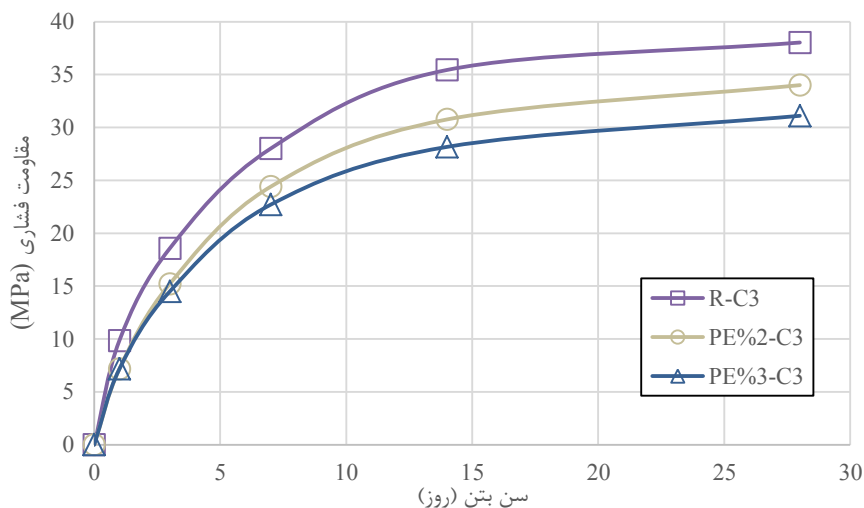
۳-۲-۲. مقاومت کششی دو نیم شدن و فشاری

نتایج مقاومت کششی دو نیم شدن آزمون‌ها با ۳ روز عمل‌آوری در شکل ۹ ارائه شده است. همان‌طور که از نتایج مشخص است با افزودن ۲ و ۳ درصد پلی‌اتیلن گلیکول، مقاومت کششی دو نیم شدن ۲۸ روزه بتن در حدود ۸ و ۱۳ درصد نسبت به مخلوط کنترل کاهش یافته است. مقادیر کاهش در مقاومت کششی دو نیم شدن بتن در اثر کاربرد مواد تجاری کاهنده جمع‌شدگی از ۲ تا ۱۷ درصد بوده است [۱۶، ۱۱].



شکل ۹ مقاومت کششی دو نیم شدن مخلوط کنترل، بتن حاوی ۲ و ۳ درصد پلی اتیلن گلیکول با ۳ روز عمل آوری

نتایج مقاومت فشاری آزمون‌ها با ۳ روز عمل آوری در شکل ۱۰ ارائه شده است. همانطور که از نتایج مشخص است با افزودن ۲ و ۳ درصد پلی اتیلن گلیکول، مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن ۱۰ و ۱۸ درصد نسبت به مخلوط کنترل کاهش یافته است. لازم بذکر است که مقادیر گزارش شده کاهش در مقاومت فشاری بتن در اثر کاربرد مواد تجاری کاهش یافته است. لازم بذکر است که مقادیر گزارش شده کاهش در مقاومت فشاری بتن در اثر کاربرد مواد تجاری کاهش یافته است. لازم بذکر است که مقادیر گزارش شده کاهش در مقاومت فشاری بتن در اثر کاربرد مواد تجاری کاهش یافته است. لازم بذکر است که مقادیر گزارش شده کاهش در مقاومت فشاری بتن در اثر کاربرد مواد تجاری کاهش یافته است.

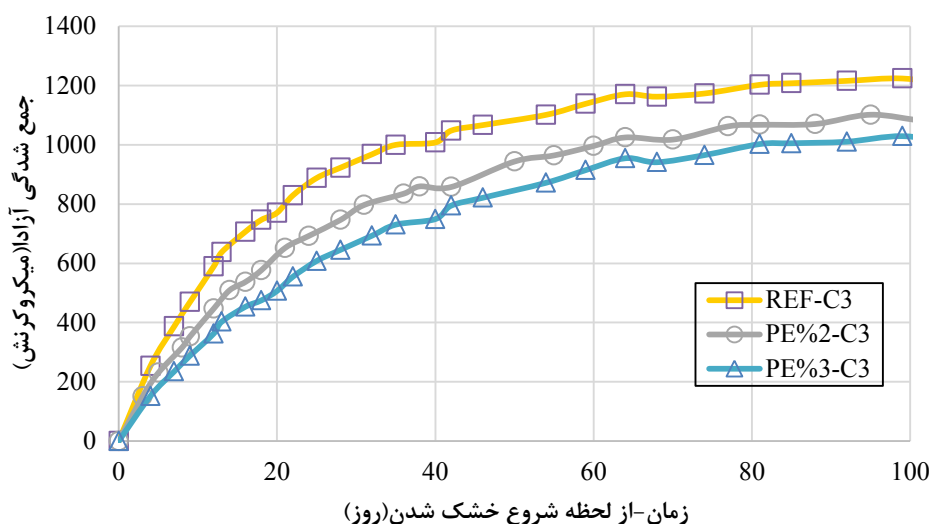


شکل ۱۰ مقاومت فشاری مخلوط کنترل، بتن حاوی ۲ و ۳ درصد پلی اتیلن گلیکول با ۳ روز عمل آوری

۳-۲-۳ جمع شدگی آزاد ناشی از خشک شدن

نتایج جمع شدگی آزاد مخلوط‌های بتنی در شکل ۱۱ و جدول ۱۱ ارائه شده است. نتایج ارائه شده در شکل ۱۱ طبق استاندارد ASTM-C596 [۴۱] از لحظه شروع خشک شدن است. با افزودن ۲ و ۳ درصد وزنی پلی اتیلن گلیکول، میزان جمع شدگی آزاد کوتاه مدت (۲۸ روزه) به ترتیب حدود ۱۹ و ۳۰ درصد نسبت به آزمون بتن شاهد کاهش یافته است. همچنین با افزودن ۲ و ۳ درصد وزنی از افزودنی پلی اتیلن گلیکول، میزان جمع شدگی آزاد بلند مدت (۹۰ روزه) به ترتیب ۹ و ۱۷ درصد نسبت به آزمون بتن شاهد، کاهش یافته است.

مقادیر گزارش شده برای مواد تجاری کاهنده جمع شدگی نیز از ۱۴ تا ۴۹ درصد استفاده و همچنین مدت زمان جمع شدگی بوده است [۶،۱۱،۱۶،۲۴،۲۵،۲۶]. بر این اساس مشخص می گردد که به طور متوسط، میزان اثر ماده پلی پروپیلن گلیکول مورد استفاده در مقایسه با مواد تجاری کمتر می باشد.



شکل ۱۱ تأثیر افزودن ۲ و ۳ درصد وزنی پلی اتیلن گلیکول بر جمع شدگی آزاد مخلوط بتنی

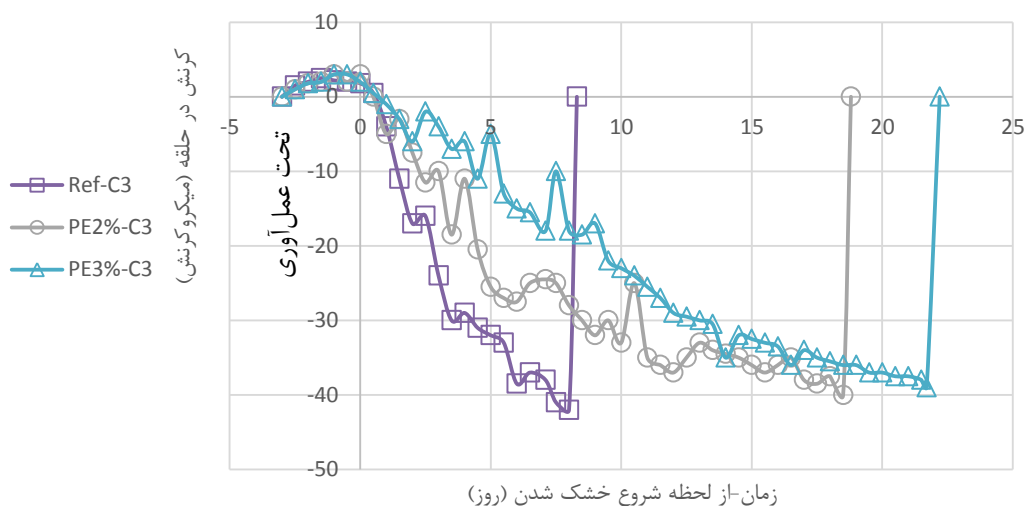
جدول ۱۱ تأثیر افزودنی پلی اتیلن گلیکول بر میزان جمع شدگی مخلوط های بتنی

از لحظه شروع خشک شدن				مدت زمان	کد مخلوط
کاهش در جمع شدگی ۹۰ روزه نسبت به بتن شاهد (%)	جمع شدگی ۹۰ روزه ($\mu\text{m}/\text{m}$)	کاهش در جمع شدگی ۲۸ روزه نسبت به بتن شاهد (%)	جمع شدگی ۲۸ روزه ($\mu\text{m}/\text{m}$)	عمل آوری (روز)	
-	۱۲۱۴	-	۹۲۳	۳	Ref-C3
۹	۱۰۹۵	۱۹/۲	۷۴۶	۳	PE%2-C3
۱۷	۱۰۱۱	۳۰/۱	۶۴۵	۳	PE%3-C3

۴-۲-۳. آزمایش حلقه جمع شدگی

نتایج حاصل از کرنش سنج های حلقه های جمع شدگی در شکل ۱۲ و جدول ۱۲ ارائه شده است. همانطور که مشخص است، استفاده از پلی اتیلن گلیکول باعث بهبود قابل توجه مقاومت بتن در برابر ترک خوردگی نسبت به مخلوط کنترل شده و برای مقادیر ۲ و ۳ درصد پلی اتیلن گلیکول، سن خالص ترک خوردگی از ۸ روز به ۱۹ و ۲۲ روز افزایش یافته است. با توجه به طبقه بندی ارائه شده در ASTM-C1581 [۳۱] استفاده از پلی اتیلن گلیکول باعث شده تا پتانسیل ترک خوردگی مخلوط کنترل از وضعیت "متوسط مایل به زیاد" به وضعیت "متوسط مایل به کم" تغییر یابد. پاسونلو و همکاران [۲۱] عملکرد مشابهی را برای ماده کاهنده جمع شدگی تجاری گزارش کردند.

در عین حال عملکرد گزارش شده توسط باقری و همکاران [۱۰]، شاه و همکاران [۲۴] و گونسی و همکاران [۱۸] برای مواد تجاری کاهنده جمع شدگی، از آنچه در تحقیق حاضر برای پلی اتیلن گلیکول مشاهده شد، بهتر بوده است.

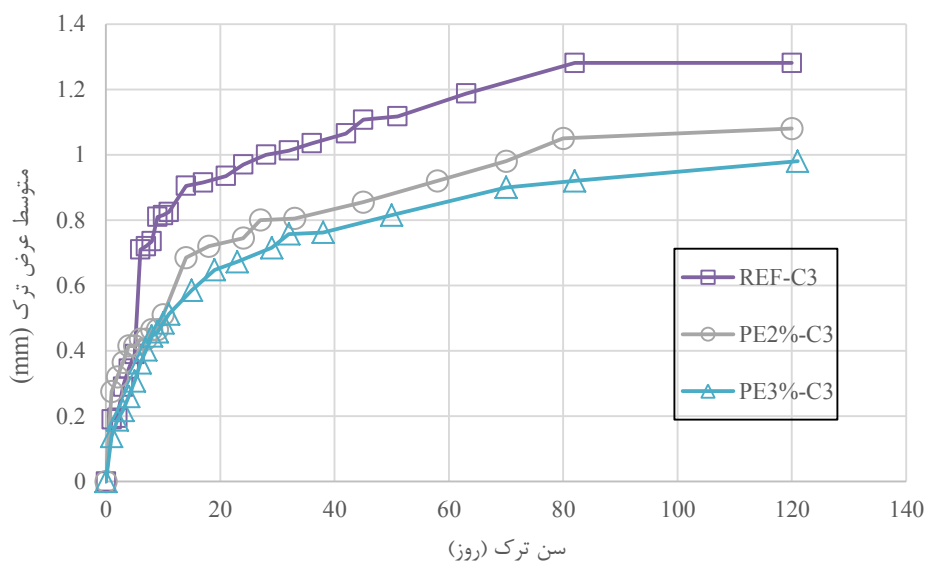


شکل ۱۲ کرنش حلقه فولادی و سن ترک خوردگی حلقه جمع شدگی آزمون بتنی (از لحظه شروع خشک شدن)

جدول ۱۲ پتانسیل ترک خوردگی مخلوط‌های کنترل، ۲ و ۳ درصد پلی اتیلن گلیکول بر اساس معیار تنش

کد مخلوط	مدت زمان عمل آوری (روز)	پلی اتیلن گلیکول (%)	سن ظهور ترک (t_r) (روز)	ضریب نرخ کرنش (α) ($m/m/day^{0.5}$)	نرخ تنش (S) (MPa/day)	پتانسیل ترک خوردگی (معیار تنش)
C-3	۳	-	۱۱	-۲۶/۶۲۷	۰/۲۹	M-H
PE%2-C3	۳	۲	۲۲	-۱۳/۰۳۶	۰/۱	M-L
PE%3-C3	۳	۳	۲۵	-۱۳/۸۵۳	۰/۱	M-L

عرض ترک ایجاد شده در هر یک از حلقه های جمع شدگی به مدت ۱۲۰ روز پس از وقوع ترک، توسط میکروسکوپ چشمی مورد اندازه گیری قرار گرفت. نتایج متوسط عرض ترک برای مخلوط ها در شکل ۱۳ نشان داده شده و جزئیات متوسط عرض ترک برای مخلوط‌ها در سنین ۲۸ و ۵۶ و ۹۰ روز در جدول ۱۳ ارائه شده است. نتایج نشانگر این است که استفاده از ۲ و ۳ درصد پلی اتیلن گلیکول باعث کاهش ۱۸ و ۲۸ درصدی در عرض ترک در سن ۹۰ روز شده است. پاسوئلو و همکاران [۲۱] و دمیر و همکاران [۲۳] عملکرد مشابهی را برای مواد تجاری کاهنده جمع شدگی گزارش کردند. در عین حال نتایج گزارش شده توسط باقری و همکاران [۱۰]، شاه و همکاران [۲۴] و گونسی و همکاران [۱۸] برای مواد تجاری کاهنده جمع شدگی نسبت به نتایج تحقیق حاضر برای پلی اتیلن گلیکول بهتر بوده است.

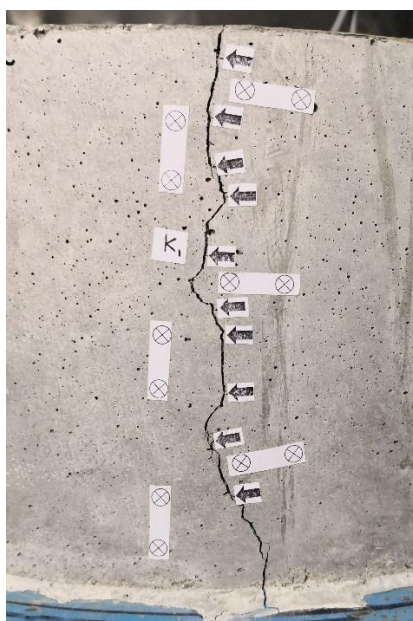


شکل ۱۳ نتایج متوسط عرض ترک برای مخلوط های حاوی پلی اتیلن گلیکول

جدول ۱۳ میزان متوسط بازشدگی ترک خوردگی آزمونه های حلقه جمع شدگی در سن ۲۸، ۵۶ و ۹۰ روز

کد مخلوط	عمل آوری (روز)	میانگین عرض ترک (mm) (۲۸ روز)	کاهش عرض ترک نسبت به بتن شاهد (%) (۲۸ روز)	میانگین عرض ترک (mm) (۵۶ روز)	کاهش عرض ترک نسبت به بتن شاهد (%) (۵۶ روز)	میانگین عرض ترک (mm) (۹۰ روز)	کاهش عرض ترک نسبت به بتن شاهد (%) (۹۰ روز)
REF-C3	۳	۱	-	۱/۱۴	-	۱/۲۸	-
PE2%-C3	۳	۰/۸	۲۰	۰/۹۲	۱۹/۸۶	۱/۰۵	۱۷/۹۷
PE3%-C3	۳	۰/۷۱	۲۸/۵	۰/۸۱	۲۹/۴۴	۰/۹۲	۲۸/۱۲

در شکل ۱۴ تصاویری از ترک خوردگی حلقه جمع شدگی حاوی ۳ درصد پلی اتیلن گلیکول و بازشدگی آن ۹۰ روز پس از وقوع ترک ارائه شده است.



شکل ۱۴ ترک خوردگی حلقه جمع شدگی حاوی ۳ درصد پلی اتیلن گلیکول ۹۰ روز پس از وقوع ترک

۴. نتیجه گیری

با توجه به اینکه مواد کاهنده جمع شدگی تجاری در بسیاری موارد پایه گلیکولی هستند، در تحقیق حاضر پتانسیل پلی اتیلن گلیکول تولید داخل کشور با درجه صنعتی که قیمت آن حدود ۱۰ درصد قیمت ماده تجاری است، به عنوان ماده پایه کاهنده جمع شدگی مورد ارزیابی قرار گرفت که نتایج حاصله به شرح زیر می باشد.

- نتایج نشانگر این است که پلی اتیلن گلیکول، قابلیت کاهش در مقدار جمع شدگی بتن را دارد که با افزایش مقدار مصرف، میزان اثر بیشتر می شود. برای مقادیر مصرف ۲ و ۳ درصد مقدار کاهش در جمع شدگی آزاد بتن در سن ۲۸ روز به ترتیب ۱۹ و ۳۰ درصد و در سن ۹۰ روز ۹ و ۱۷ درصد مشاهده شد. مقدار کاهش در جمع شدگی در مقایسه با مواد تجاری در مقدار برابر مصرف، کمتر است و در مقایسه با طیف نتایج گزارش شده برای مواد تجاری در مراجع مختلف، در محدوده پایینی قرار می گیرد.

- کاربرد پلی اتیلن گلیکول باعث قدری کاهش در مقاومت بتن گردید که با افزایش مقدار مصرف میزان کاهش نیز بیشتر می گردد. شایان توجه است که از اثرات جانبی مواد تجاری نیز افت مقاومت بتن می باشد.

- کاربرد پلی اتیلن گلیکول سبب افزایش قابل توجه در کارایی بتن شده که با افزایش مقدار مصرف، میزان افزایش روانی نیز بیشتر گردید. هر چند برای مواد تجاری نیز افزایش کارایی بتن گزارش شده ولی میزان آن کمتر آنچه برای پلی اتیلن گلیکول در تحقیق حاضر مشاهده شد، می باشد.

- نتایج آزمایش حلقه جمع شدگی نشانگر کاهش پتانسیل ترک خوردگی (افزایش زمان موثر وقوع ترک) در اثر استفاده از پلی اتیلن گلیکول است. همچنین پلی اتیلن گلیکول تاثیر نسبتاً قابل توجهی در کاهش عرض ترک های جمع شدگی از خود نشان داد و برای مقادیر مصرف ۲ و ۳ درصد، باعث کاهش ۱۸ و ۲۸ درصدی عرض ترک گردید. هر چند در برخی از مراجع برای مواد تجاری کاهنده جمع شدگی، میزان تاثیر روی پتانسیل ترک خوردگی و عرض ترک ها، مشابه با تحقیق حاضر گزارش شده است، لیکن در بیشتر موارد عملکرد گزارش شده برای مواد تجاری، بهتر از آنچه در تحقیق حاضر برای پلی اتیلن گلیکول مشاهده شد، بوده است.

شایان توجه است که در تحقیق حاضر از پتانسیل پلی اتیلن گلیکول در کاهش مقدار آب مخلوط در کارایی برابر با مخلوط کنترل و در نتیجه کاهش نسبت آب به سیمان بتن استفاده نشده است. بدیهی است در صورت استفاده از این پتانسیل، امکان بهره مندی از منافع کاهش نسبت آب به سیمان، نظیر بهبود مقاومت و کاهش بیشتر در جمع شدگی بتن وجود دارد.

۵. قدردانی

نویسندگان این مقاله از تکنسین آزمایشگاه بتن دانشکده مهندس عمران دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی آقای عباس زاده که ما را در انجام بخش های مختلف این تحقیق یاری نمودند تشکر و قدردانی می نمایند.

1. Mindess S, Young J, and Darwin D. (2003). *Concrete*, Prentice Hall inc.
2. Lamond JF and Pielert JH. (2006). *Significance of tests and properties of concrete and concrete-making materials*. ASTM West Conshohocken, PA.
3. ACI committee 209. (2008). *guide for modeling and calculating shrinkage and creep in hardened concrete*, ACI 209.2 R-08, American Concrete Institute.
4. ACI committee 224. (2001). *joint in concrete construction*. ACI224.3, American Concrete Institute.
5. Voigt, T, Bui VK, and Shah SP. (2004). *Drying shrinkage of concrete reinforced with fibers and welded-wire fabric*. *Materials Journal*, 101(3):233-241.
6. Mehta, PK, and Monteiro P. (2006). *Microstructure and properties of hardened concrete*. *Concrete: Microstructure, properties and materials*. Mc-Graw-Hill.
7. Colleparidi M, Borsoi A, Colleparidi S, Jacob J, Olagot O, and Troli R. (2005). *Effects of shrinkage reducing admixture in shrinkage compensating concrete under non-wet curing conditions*. *Cement and Concrete Composites*, 27(6):704-708.
8. Goto T, Sato T, Sakai K, and Ii M. (1985). *Cement-shrinkage-reducing agent and cement composition*. Google Patents.
9. Hatami B, Ramezani pour AM, and Saedi Daryan A. (2018). *Investigation on the Effect of Shrinkage Reducing Admixtures on Shrinkage and Durability of High-Performance Concrete*. *Journal of Testing and Evaluation*, 46(1):141-150.
10. Bagheri A, Jamali M, Pourmir M, and Zanganeh H. (2019). *The Influence of Curing Time on Restrained Shrinkage Cracking of Concrete with Shrinkage Reducing Admixture*. *Advances in Civil Engineering Materials*, 8(1): 596-610.
11. Pourmir, M. (2018). *Effect of shrinkage reducing admixture on reversible and irreversible shrinkage in concrete*. M.Sc. Thesis in structural Eng., K. N.Toosi University of technology. (In Persian)
12. Zhan PM, and He ZH. (2019). *Application of shrinkage reducing admixture in concrete: A review*. *Construction and Building Materials*, 201:676-690.
13. Aïtcin PC, and Flatt RJ. (2015). *Science and technology of concrete admixtures*. Woodhead Publishing.
14. Han HS, Kim JK, and Jung YW. (2016). *Development and performance assessment of the high-performance shrinkage reducing agent for concrete*. *Advances in Materials Science and Engineering*.
15. Kumar MJ, Srikanth M, and Rao KJ. (2012). *Strength characteristics of self-curing concrete*. *Nature*, 20: M40.

16. Quangphu N, Linhua J, Jiaping L, Qian T, Tienquan D. (2008). Influence of shrinkage-reducing admixture on drying shrinkage and mechanical properties of high-performance concrete. *Water Science and Engineering*, 1(4): 67-74.
17. Corinaldesi V. (2012). Combined effect of expansive, shrinkage reducing and hydrophobic admixtures for durable self-compacting concrete. *Construction and Building Materials*, 36: 758-764.
18. Güneyisi E, Gesoğlu M, Mohamadameen A, Alzebaree R, Algin Z, and Mermerdas K. (2014). Enhancement of shrinkage behavior of lightweight aggregate concretes by shrinkage reducing admixture and fiber reinforcement. *Construction and Building Materials*, 54: 91-98.
19. Pease B, Shah H, and Weiss W. (2005). Shrinkage behavior and residual stress development in mortar containing shrinkage reducing admixtures (SRAs). *Shrinkage and creep of concrete, SP-227: Concrete admixtures*, 285-302.
20. Ran Q, Gao N, Liu J, Tian Q, and Zhang J. (2013). Shrinkage action mechanism of shrinkage-reducing admixtures based on the pore solution. *Magazine of concrete research*, 65(18): 1092-1100.
21. Passuello A, Moriconi G, and Shah SP. (2009). Cracking behavior of concrete with shrinkage reducing admixtures and PVA fibers. *Cement and Concrete Composites*, 31(10): 699-704.
22. Weiss WJ, Yang W, and Shah SP. (1998). Shrinkage cracking of restrained concrete slabs. *Journal of Engineering Mechanics*, 124(7): 765-774.
23. Demir İ, Sevim Ö, and Tekin E. (2018). The effects of shrinkage-reducing admixtures used in self-compacting concrete on its strength and durability. *Construction and building materials*, 172: 153-165.
24. Shah SP, Marikunte S, Yang W, and Aldea C. (1997). Control of cracking with shrinkage-reducing admixtures. *Transportation Research Record*, 1574(1): 25-36.
25. Folliard KJ, and Berke NS. (1997). Properties of high-performance concrete containing shrinkage-reducing admixture. *Cement and Concrete Research*, 27(9): 1357-1364.
26. Weiss WJ, and Shah SP. (2002). Restrained shrinkage cracking: the role of shrinkage reducing admixtures and specimen geometry. *Materials and Structures*, 35(2): 85-91.
27. Bilek Jr V, Kalina L, and Novotný R. (2018). Polyethylene glycol molecular weight as an important parameter affecting drying shrinkage and hydration of alkali-activated slag mortars and pastes. *Construction and Building Materials*, 166: 564-571.
28. Palacios M, and Puertas F. (2007). Effect of shrinkage-reducing admixtures on the properties of alkali-activated slag mortars and pastes. *Cement and concrete research*, 37(5): 691-702.
29. Mehdipour I, and Khayat KH. (2018). Enhancing the performance of calcium sulfoaluminate blended cements with shrinkage reducing admixture or lightweight sand. *Cement and Concrete Composites*, 87: 29-43.

30. Weiss J, Lura P, Rajabipour F, and Gaurav S. (2008). Performance of shrinkage-reducing admixtures at different humidities and at early ages. *ACI Materials Journal*, 105(5): 478.
31. ASTM-C1581. (2016). Standard Test Method for Determining Age at Cracking and Induced Tensile Stress Characteristics of Mortar and Concrete under Restrained Shrinkage. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
32. ASTM-C150. (2015). Standard specification for Portland cement. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
33. ASTM-C33. (2013). Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
34. ASTM-C230. (2013). Flow table for use in tests of hydraulic cement. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
35. ASTM-C109. (2015). Standard test method Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
36. ASTM-C157. (2008). Test method for length change of hardened hydraulic cement mortar and concrete. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
37. ASTM-C490. (2013). Standard practice for use of apparatus for the determination of length change of hardened cement paste, mortar, and concrete. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
38. ASTM-C143. (2015). Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.
39. ASTM-C496, Standard test method for splitting tensile strength of cylindrical concrete specimens. 2011.
40. BS-EN-12390-3. (2009). Testing hardened concrete, part3: Compressive strength of Test specimens.
41. ASTM-C596. (2009). Standard Test Method for Drying Shrinkage of Mortar Containing Portland Cement. ASTM International West Conshohocken, PA, USA.