نشریه علمی - پژوهشی مهندسی سازه و ساخت، دوره ۵، شماره ویژه ۴، سال ۱۳۹۷، صفحه ۱۷۶ تا ۱۹۲

نشریه مهندسی سازه و ساخت
(علمی - پژوهشی)

www.jsce.ir

Journal of Structural and Construction Engineering
JSCE
نشریه علمی-پژوهشی مهندسی سازه و ساخت

بررسی امکان استفاده از لوماشل به عنوان جایگزین مصالح سنگی در ساخت بتن غلتکی

محمود میری[1*]، علی اصغر وطنی اسکوئی[2]، ایمان عبیری[3]

۱-دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران
۲-دانشیار، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه شهید رجایی، تهران، ایران
۳-دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشکده فنی مهندسی، گروه عمران، دانشگاه سیستان و بلوچستان، زاهدان، ایران

چکیده

با توجه به محدود بودن منابع سنگی مناسب در مناطق جنوبی کشور و حاشیه دریای عمان، در این مطالعه آزمایشگاهی، امکان استفاده از لوماشل (کپراک) که به فراوانی در سواحل خلیج فارس و دریای عمان وجود دارد، به‌عنوان جایگزین بخشی از مصالح ریزدانه در ساخت بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفته است. بعلاوه تأثیر جایگزینی پوزولان تفتان و آهک زنده بجای مصالح سیمانی بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدگی، نفوذپذیری و جذب آب نیز بررسی شده است. در مجموع ۹طرح اختلاط مختلف شامل ماسه، لوماشل، و ماسه و لوماشل به عنوان ریز دانه و آهک با درصدهای مختلف ۵٪، ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰٪ و پوزولان تفتان به میزان ۱۰٪ و ۲۰٪ وزنی سیمان، ساخته شده و تحت آزمایش قرار گرفته اند. بر اساس نتایج بدست آمده، از میان طرح های اختلاط صورت گرفته، بهترین عملکرد در آزمایشات مقاومت فشاری و کششی در نمونه های حاوی ۵ ٪ آهک، در آزمایش نفوذ آب نمونه های حاوی ۲۰ ٪ پوزولان و در آزمایش جذب آب نمونه های ساخته شده با ریزدانه ماسه حاصل شد. نتایج آزمایشات مختلف نشان داد که بطور کلی امکان استفاده از لوماشل به عنوان مصالح ریز دانه در ساخت بتن غلتکی وجود دارد و این امکان می تواند کمک موثری به اقتصاد طرحهای اجرایی در این منطقه باشد. علاوه بر آن استفاده از ۱۵ الی ۲۰٪ پوزولان به عنوان جایگزین مصالح سیمانی قابل توصیه است.

کلمات کلیدی: بتن غلتکی، لوماشل، پوزولان تفتان، آهک، مقاومت فشاری

سابقه مقاله:					شناسه دیجیتال:
دریافت	بازنگری	پذیرش	انتشار آنلاین	چاپ	10.22065/JSCE.2017.87935.1222
۱۳۹۶/۰۳/۱۳	۱۳۹۶/۰۸/۰۷	۱۳۹۶/۰۸/۱۴	۱۳۹۶/۰۸/۱۴	۱۳۹۷/۱۲/۲۸	doi: 10.22065/JSCE.2017.87935.1222

*نویسنده مسئول: سید محمود میری

پست الکترونیکی: mmiri@eng.usb.ac.ir

An Investigating the Effect of using Lumachelle as a Substitute of Aggrigate in RCC

Mahmoud Miri[1*], Ali asghar Vataniouskouii[2], Iman Abiri[3]

1- Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
2- Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran
3- M.Sc. in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Sistan and Baluchestan, Zahedan, Iran

ABSTRACT

According to lack of sufficient fine aggregate in some coastal area, using of other aggregate material are advisable. In this experimental study use of Lumachelle as a substitute of fine aggregates and replacement of lime and pozzolan as a part of cement are investigated on roller compacted concrete (RCC). RCC samples carried out and cured according to the related standard and compressive strength, splitting tensile strength, permeability and water absorption are examined. Totally, 9 different RCC mixtures include control mixture, 4 different mixtures include lime (5%, 10%, 15% and 20% of cement weight) were used as partial replacement of cement, and 2 different mixtures include 10% and 20% of pozzolan , by cement weight, as partial replacement of cement, were tested. Based on the results, among 5, 10, 15 and 20% of the lime used in this study, the replacement of 5% lime lead 3% increase in compressive strength and 7 % increase of tensile strength and it could be advisable for using in RCC. Moreover, the use of 20% substitutive Taftan pozzolan in RCC mix design decreases 24% of compressive strength and 11% of tensile strength in the short time. Besides, it improves resistance to get equal resistance with control sample in long-term that lead in 22% decrease depth penetration and 5% decrease in water absorption compared to control sample. Therefore use of 15 to 20% of pozzolan are also advisable according to the obtained results.

ARTICLE INFO

Received: 03/06/2017
Revised: 29/10/2017
Accepted: 05/11/2017

Keywords:
RCC,
Lumachelle,
Taftan Pozollan,
lime,
Compression strength

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017.87935.1222

*Corresponding author: Mahmoud Miri
Email address: mmiri@eng.usb.ac.ir

۱- مقدمه

بتن غلتکی بتنی است با اسلامپ صفر که در هنگام اجرا با غلتک کوبیده و متراکم می‌شود و عمده مصرف آن در سدسازی و رویه راهها است. مزایای اقتصادی حاصل از سرعت بالای اجرا و عدم نیاز به ماشین‌آلات بتن‌ریزی و قالب‌بندی باعث گسترش روزافزون استفاده از این بتن شده است. همچنین مزایای فنی این بتن از قبیل امکان بکارگیری دامنه وسیع‌تری از مصالح سنگی و مواد سیمانی و کاهش محدودیت‌های کیفی این مصالح، حرارت‌زایی کمتر (با توجه به مصرف کمتر سیمان)، بهبود خواص مکانیکی به دلیل انرژی تراکمی بیشتر، از برتری های آن نسبت به بتن‌های معمولی است. با توجه به نقش مصالح سنگی مناسب و سیمان در اقتصاد و مقاومت بتن غلتکی هرگونه تلاش در جهت استفاده از مصالح سنگی ارزانتر و سیمان کمتر مفید به فایده بوده و تحقیقات مختلفی در این زمینه صورت گرفته است.

سان و همکاران به بررسی مقاومت بتن غلتکی و تاثیر حجم بالای خاکستر بادی بر خواص آن پرداختند و مشاهده کردند که افزایش درصد خاکستر بادی باعث کاهش مقاومت بتن غلتکی با حجم بالای خاکستر بادی [۱] (HFRCC) می‌شود. اگرچه مقاومت HFRCC در سنین پایین، بسیار کم است، اما روند کسب مقاومت با افزایش زمان عمل‌آوری به‌سرعت افزایش می‌یابد؛ بطوریکه مقاومت درازمدت آن از مقاومت بتن بدون خاکستر بادی بیشتر می‌شود. همچنین نتایج آزمایش توزیع حفرات در HFRCC نشان داد که افزودن خاکستر بادی با حجم زیاد در کاهش میزان حفرات مضر و حجم کل حفرات سودمند است[۱].

نیک و همکاران خواص مقاومتی و دوام بتن غلتکی ویژه روسازی را با و بدون مواد مکمل سیمانی مورد ارزیابی قرارداده و مشاهده نمودند که طرح اختلاط بتن غلتکی روسازی حاوی ۵۰٪ خاکستر بادی کلاس C به‌عنوان جایگزین مواد سیمانی، عملکرد مقاومتی و دوام مناسبی از خود نشان می‌هد. همچنین طرح اختلاط بتن غلتکی شامل ۳۰٪ خاکستر بادی دارای تراکم، مقاومت فشاری و خمشی مناسبی است[۲].

آتیس و همکاران با بررسی خواص بتن غلتکی با طرح‌های اختلاط مختلف شامل مقدار سیمان های متفاوت و افزودنی محلی FA (نوعی خاکستر بادی غیراستاندارد و با کلسیم بالا) به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی به میزان ۱۵٪، ۳۰٪ و ۴۵٪ وزنی مواد سیمانی نشان دادند که بتن غلتکی ساخته شده با FA مقاومت خوبی در سنین پایین (۳ روزه) کسب می‌کند. همچنین مقاومت ۲۸ روزه بتن غلتکی حاوی ۱۵٪ FA به عنوان جایگزین مواد سیمانی برابر یا بالاتر از مقاومت بتن غلتکی بدون FA است. علاوه بر این، نمونه بتنی ساخته شده با ۳۰٪ وزنی مواد سیمانی FA، مقاومت تقریبا" برابری با نمونه شاهد در سن ۹۰ روز دارد[۳].

آتیس خواص مقاومتی بتن غلتکی دارای خاکستر بادی[۲](HVFA) در شرایط عمل‌آوری مرطوب و خشک را مورد بررسی قرار داد. در طرح‌های اختلاط مختلف پیشنهاد شده توسط وی، ۵۰٪ و ۷۰٪ مصالح سیمانی با خاکستر بادی کلاس F جایگزین شدند. نتایج بدست آمده نشان دادند که بتن غلتکی حاوی ۵۰٪ خاکستر بادی دارای مقاومت بالا و بتن حاوی ۷۰٪ خاکستر بادی دارای مقاومت متوسط است[۴].

زدیری و همکاران با بررسی استفاده از ذرات سیدریت در روسازی‌های بتن غلتکی نتیجه گرفتند که با جایگزینی ۱۰٪ از مواد سیمانی در طرح اختلاط با ذرات سیدریت، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد؛ بطوریکه مقاومت بتن ساخته شده با سیدریت ۱/۳ برابر مقاومت بتن شاهد می‌شود. علاوه بر این افزودن ذرات سیدریت موجب افزایش مقاومت فشاری و کششی، کاهش حرارت هیدراتاسیون و کاهش سیمان موردنیاز می‌گردد. درحالی‌که وجود ذرات سیدریت در طرح اختلاط بتن با درصد بالا (۳۰٪ مواد سیمانی)، منجر به کاهش شدید مقاومت فشاری و مقاومت کششی دونیم شدگی می شود[۵].

نیلی و ظاهری نیز به بررسی تاثیر پوزولان‌های مختلف بر خواص بتن غلتکی تازه و سخت شده پرداختند. در این تحقیق۸٪ پوزولان‌های طبیعی، ۲۰٪ خاکستر بادی و ۲۰٪ سیلیکا فوم به عنوان جایگزین بخشی از مواد سیمانی مورد استفاده قرار گرفتند. نتایج نشان داد که حداکثر مقاومت فشاری متعلق به نمونه‌های دارای سیلیکا فوم است؛ درحالی‌که افزودن پوزولان‌های طبیعی یا خاکستر بادی کمترین مقاومت فشاری را بدست می‌دهد. همچنین نتایج نشان دادند که استفاده از سیلیکا فوم به‌عنوان ماده مکمل سیمانی در بتن غلتکی برای ارتقاء مقاومت در برابر پوسته‌شدن راهکار مناسب‌تری نسبت به استفاده از مواد هوازاست[۶].

[1] High volum Fly Ash Roller Compact Concrete
[2] High volum Fly Ash Roller Compact Concrete

هرچگانی و همکاران اثر مواد پوزولانی و الیاف فولادی و پلی پروپیلین با درصدهای مختلف بر خواص مکانیکی بتن غلتکی را ارزیابی و مشاهده نمودند که افزودن پوزولان، موجب کاهش مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن غلتکی و افزایش مقاومت فشاری ۹۰ روزه تمامی نمونه‌ها می‌شود. علاوه بر این، استفاده از الیاف فولادی تاثیر قابل‌توجهی بر مدول گسیختگی بتن غلتکی حاوی ۳۰٪ پوزولان ندارد، اما در نمونه‌های ساخته‌شده با درصد پوزولان بیشتر از ۳۰٪، اثر همزمان الیاف فولادی بر افزایش تخلخل بین‌دانه‌ای و پوزولان، منجر به افزایش مدول گسیختگی می‌شود. نتایج نشان دادند تاثیر پوزولان بر مدول چقرمگی قابل‌توجه نبوده و حساسیت مدول گسیختگی نسبت به الیاف بسیار کمتر از حساسیت آن نسبت به پوزولان است[۷].

مدرس و همکاران خواص مکانیکی بتن غلتکی حاوی خاکستر پوسته برنج و مصالح بازیافتی روسازی را مورد بررسی قراردادند و با انجام آزمایش‌های مقاومت فشاری و خمشی، تعیین مدول گسیختگی، میزان جذب انرژی و خستگی روی نمونه های بتن غلتکی با طرح‌های اختلاط متفاوت که در آن۳٪ تا ۵٪ وزنی مواد سیمانی با خاکستر پوسته برنج جایگزین شده بود، نتیجه گرفتند که استفاده همزمان از مصالح بازیافتی ریزدانه و درشت‌دانه موجب کاهش مقاومت فشاری بتن غلتکی می‌شود. علاوه بر این با جایگزینی مصالح بازیافتی با مصالح استاندارد، درصد رطوبت بهینه و تراکم حداکثر، کاهش می‌یابد. در مقابل، اضافه کردن خاکستر پوسته برنج، باعث افزایش درصد رطوبت بهینه و کاهش تراکم حداکثر می‌گردد[۸].

هانگ و چی تاثیر خاکستر CFBC [۳] (محصول دورریز یا تولید یک نیروگاه احتراق کک) به‌عنوان جایگزین بخشی از مصالح بر خواص بتن غلتکی را بررسی و نتیجه گرفتند که خاکستر CFBC بدلیل دارا بودن مقادیر بالای کلسیم اکسید و گوگرد تری اکسید، باعث افزایش میزان جذب آب و کاهش جذب سطحی اولیه می‌شود. همچنین خاکستر CFBC تاثیر مثبتی بر مقاومت فشاری، مقاومت کششی دونیم شدگی و مقاومت در برابر حمله سولفات‌ها در بتن غلتکی سخت شده دارد. خاکستر CFBC عمدتا" شامل ذرات درشت و زاویه‌دار با اندازه‌های مختلف بوده و درنتیجه در اثر اضافه شدن به طرح اختلاط، ممکن است کارایی بتن تازه را کاهش دهد. همچنین بر پایه مشاهدات و نتایج، بتن غلتکی دارای خاکستر CFBC به میزان ۵٪ وزنی مصالح ریزدانه و فشار تراکم gr/cm^2 ۷۵، به‌عنوان بتن غلتکی بهینه پیشنهاد شد[۹].

با نگاهی به موارد ذکر شده و بررسی های به عمل آمده در زمینه بتن غلتکی، تاکنون بررسی آزمایشگاهی با استفاده از لوماشل به عنوان جایگزین بخشی از سنگدانه و همچنین افزودنی ها به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی یافت نشد. از آنجا که بخش اعظم بتن غلتکی را سنگدانه‌ها تشکیل می‌دهند، برای اقتصادی شدن طرح و همچنین رعایت مسائل زیست‌محیطی، در این پژوهش استفاده از مصالح سنگی لوماشل که در سواحل جنوبی ایران به وفور یافت می شود، به عنوان جایگزین بخشی از مصالح سنگی در طرح اختلاط بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفته است.

۲- برنامه آزمایشگاهی

۲-۱- مصالح مصرفی

مصالح سنگی مورد استفاده در این تحقیق با مشخصات مندرج در جدول ۱ بوده است.

جدول ۱: مشخصات مصالح سنگی استفاده شده

نوع مصالح	وزن مخصوص اشباع با سطح خشک (kg/m^3)	درصد رطوبت طبیعی	درصد جذب آب در حالت اشباع با سطح خشک (S.S.D)
درشت دانه	۲۶۷۰	۰	۰/۷۲
ماسه	۲۶۳۰	۰	۱/۱۲

[3] Circulating Fluidized Bed Combustion

با توجه به محدودیت منابع سنگی استاندارد در برخی سواحل جنوبی کشور و مناطق جنوبی استان سیستان و بلوچستان، از مصالح رسوبی لوماشل، که به طور طبیعی و با مقادیر زیاد در منطقه وجود دارد، به عنوان جایگزین بخشی از ریز دانه استفاده شده است. جایگزینی این مواد به‌جای سنگ‌دانه‌های بتن غلتکی علاوه بر اقتصادی شدن طرح، اثرات زیست‌محیطی مثبتی نیز به همراه دارد. این مصالح دارای رنگ کرم متمایل به قهوه‌ای هستند و عمدتا" از خرده صدف‌های جانداران دریایی تشکیل‌شده و توسط سیمان کربناتی به هم متصل شده است (شکل ۱). تخلخل این مصالح بسیار بالا است که علت اصلی سبک بودن وزن واحد حجم آن است. یکی از خواص مطلوب لوماشل، نداشتن کوارتز غیر متبلور و کانی‌های فلزی است که سبب می‌شود بتن ساخته شده با آن مستعد واکنش‌های قلیایی نباشد[۱۰]. آنالیز شیمیایی لوماشل مورد استفاده در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۲: نتایج حاصل از آنالیز XRF لوماشل مورد استفاده

اجزاء تشکیل‌دهنده	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	MgO	CaO	Na_2O	K_2O	SO_3	LOI
درصد وزنی موجود	۱۶/۰۲	۱/۷۴	۱/۹۴	۰/۷۶	۴۵/۶۸	۰/۹۵	۰/۳۳	۰/۲۲	۳۱/۹
اجزاء تشکیل‌دهنده	BaO	MnO	P_2O_5	TiO_2	Cr_2O_3	Cu	Pb	Zn	-
درصد وزنی موجود	۰/۰۱	۰/۰۷	۰/۴۷	۰/۰۹	۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	<۰/۰۱	-

شکل ۱: نمونه‌های خردشده لوماشل توسط سنگ‌شکن

در این تحقیق از سیمان پرتلند نوع II ، استفاده شده است. وزن مخصوص سیمان مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C 188 برابرkg/m^3 ۳۰۱۱ بوده است[۱۱]. به‌طور معمول میزان مصرف سیمان در بتن غلتکیkg/m^3 ۳۰۰ تا $kg/m^3$۳۵۰ بوده که این مقدار۱۳٪ تا ۱۶٪ وزن کل مصالح بدون در نظر گرفتن آب است[۱۲]. در این پژوهش مقدار سیمان با توجه به مقاومت فشاری و خمشی مورد نیاز و برای رعایت اقتصاد طرح، ۱۴٪ وزن مصالح خشک انتخاب شده است. آهک زنده مورد استفاده در این مطالعه نیز با مشخصات مندرج در جدول ۳ و وزن مخصوصkg/m^3 ۲۹۲۲ بوده است.

جدول ۳ : مشخصات آهک مورد استفاده [۱۳]

ترکیب شیمیایی	SiO_2	$Al_2O_3 + Fe_2O_3$	L.O.I.	CaO	MgO	فعالیت
درصد	۱/۵-۳	۰/۵-۱	۴-۷	۸۷-۹۳	۲-۴	۷۵-۸۵

پوزولان مورد استفاده نیز پوزولان تفتان با آنالیز شیمیایی ارائه شده در جدول ۴ بوده است. مطابق توصیه استاندارد ASTM C 618 مجموع سه اکسید اصلی ($SiO_2 + Al_2O_3 + Fe_2O_3$) باید بیشتر از ۷۰ درصد و حداکثر افت در اثر گرما و سولفیت به ترتیب ۱۰ و ۴ درصد محدود شود که پوزولان تفتان مورد استفاده تمامی این ویژگی‌ها را دارا است[۱۴]. وزن مخصوص پوزولان مورد استفاده بر اساس استاندارد ASTM C 188 برابر $2638\ kg/m^3$ بوده است[۱۱].

جدول ۴ : نتایج آنالیز XRF پوزولان تفتان[۱۵]

ترکیب شیمیایی	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	SO_3	Na_2O	K_2O	L.O.I
درصد	۵۶-۵۹	۱۷-۱۹	۵	۵-۷	۱/۲-۲	۱/۷-۳	۳/۵	۱/۳-۲	۲-۵

۳- طرح اختلاط و ساخت نمونه ها

طرح اختلاط مناسب بتن غلتکی بایستی الزامات موردنیاز در مورد خواص بتن غلتکی تازه و سخت شده را تامین کند. کارآیی، مقاومت و دوام به ترتیب مهم‌ترین الزامات بتن غلتکی تازه و سخت شده است. در این پژوهش، به‌منظور انتخاب طرح اختلاط موردنظر، از مفهوم تراکم خاک توصیف شده در نشریه شماره ۳۵۴، (تحت عنوان راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور) استفاده شده است. مطابق روش C ذکرشده در استاندارد ASTM D 1557، با استفاده از مقدار تعیین‌شده سنگ‌دانه و مواد سیمانی، برای آزمایش چگالی - رطوبت، ۶ نمونه مخلوط با مقادیر مختلف آب ساخته و مقاومت فشاری متناظر آن اندازه‌گیری شده که مقدار درصد رطوبت بهینه، برابر ۷/۲ ٪ و چگالی خشک $2217\ kg/m^3$ به دست آمد. مطابق توصیه آیین‌نامه، براساس طرح اختلاط و روش مورد استفاده برای ساخت نمونه، برای تسهیل در انجام تراکم، بهتر است برای ساخت آزمونه‌های آزمایشگاهی از درصد رطوبتی بیشتر از درصد رطوبت بهینه استفاده شود[۱۶]. بنابراین درصد رطوبت ۷/۵ ٪ برای طرح اختلاط ملاک عمل قرار گرفت. لازم به ذکر است بر اساس تحقیق عبدالوهاب و همکاران طرح اختلاط بتن غلتکی ویژه روسازی راه در مناطق با آب و هوای گرم در محدوده ۰/۴ تا ۰/۵ گزارش شده است. علاوه بر این بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی در بتن غلتکی ویژه روسازی رابطه ساده‌ای وجود دارد. و برخلاف بتن معمولی، نسبت آب به سیمان کمتر از نسبت بهینه، منجر به افزایش مقاومت بتن غلتکی نمی‌شود[۱۷].

بر اساس موارد فوق برای تعیین طرح اختلاط پایه، سه طرح اختلاط مجزا با مصالح درشت‌دانه یکسان و مصالح ریزدانه متفاوت مورد بررسی قرار گرفت. در قسمت درشت‌دانه در هر دو طرح اختلاط از مصالح استاندارد اما در بخش ریزدانه طرح اختلاط اول ماسه، در طرح اختلاط دوم لوماشل و در طرح اختلاط سوم ترکیبی از ماسه و لوماشل (به مقدار مساوی) استفاده شد. با توجه به نتایج بدست آمده و مقایسه ۳ طرح اختلاط اولیه مورد آزمایش، مشاهده شد که طرح اختلاط دارای ماسه و لوماشل نتایج مطلوبتری نسبت به دو طرح دیگر دارد؛ بطوریکه در تمامی سنین دارای مقاومت فشاری بیشتر، مقاومت کششی تقریبا" برابر و درصد جذب آب و نفوذپذیری کمتری نسبت به طرح اختلاط شامل لوماشل تنها می‌باشد. علت این موضوع تفاوت در جنس و خواص سنگ‌دانه‌های استفاده شده است. لوماشل در مقایسه با مصالح سنگی استاندارد ظرفیت باربری کمتر و تخلخل بیشتری دارد. ظرفیت باربری کمتر موجب کاهش در مقاومت کششی و فشاری و تخلخل بیشتر سبب افزایش نفوذپذیری و جذب آب می‌شود. استفاده همزمان از ماسه و لوماشل در بخش ریزدانه طرح اختلاط ضمن کمک به اقتصاد طرح، تا حدودی نقطه ضعف فوق را جبران نموده و ترکیب مناسبی در بخش ریزدانه ایجاد می‌کند. بطوریکه نتایج بدست آمده از آزمایش‌های مربوط به این طرح اختلاط، در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار دارند. بنابراین این طرح اختلاط به‌عنوان طرح اختلاط پایه (طرح اختلاط شاهد) استفاده و به منظور بهبود عملکرد آن درصدهای مختلف آهک و پوزولان تفتان به‌عنوان مواد سیمانی جایگزین، انتخاب و ۶ طرح اختلاط دیگر با افزودن درصدهای مختلف آهک و پوزولان ساخته شد، که نتایج مرتبط در ادامه ذکر شده است. به منظور تفکیک نمونه ها از همدیگر، نام‌گذاری طرح‌های اختلاط با ترکیبی از حروف و اعداد به‌صورت زیر انجام‌گرفته است:

- S: بیانگر ماسه و عدد پس از آن نشانگر درصد وزنی آن است.
- Lu: بیانگر لوماشل و عدد پس از آن نشانگر درصد وزنی آن است.

- L: بیانگر آهک زنده و عدد پس‌ازآن نشانگر درصد وزنی آهکی است که جایگزین سیمان شده است.
- P: بیانگر پوزولان طبیعی تفتان و عدد پس‌ازآن نیز نشانگر درصد وزنی پوزولانی است که جایگزین سیمان شده است.

برای مثال L10P0 نشان‌دهنده نمونه حاوی ۱۰٪ آهک زنده و ۰٪ پوزولان است. به علت کارایی بسیار پایین بتن غلتکی، روش‌های معمول تهیه نمونه‌های آزمایشگاهی ازجمله استانداردهای ASTM C 31 (روش استاندارد ساخت و عمل‌آوری آزمونه‌های آزمایشی بتن در کارگاه) و ASTM C 192 (روش استاندارد ساخت و عمل‌آوری آزمونه آزمایشی بتن در آزمایشگاه) برای این نوع بتن مناسب نیستند. با وجود آنکه چندین روش برای این منظور بکار رفته است ولی تاکنون روش استانداردی از سوی ASTM ارائه نشده است. آزمونه‌های بتن غلتکی معمولا از طریق روش‌های ویژه نظیر کوبش با انواع چکش‌ها (چکش بادی، چکش ارتعاشی برقی و چکش پروکتور) یا روش‌های ارتعاشی تحت سربار تهیه می‌شوند. در این تحقیق، برای ساخت نمونه ها ابتدا مصالح سنگی (شامل ریزدانه و درشت‌دانه)، را در داخل مخلوط کن ریخته و اختلاط آنها به مدت ۱/۵ دقیقه انجام شده است، سپس مصالح سیمانی به مخلوط کن اضافه شده و اختلاط به مدت ۲ دقیقه دیگر ادامه یافته است. در مرحله آخر آب به مخلوط اضافه شده و اختلاط به مدت ۳ دقیقه صورت گرفته است. پس از اتمام مراحل فوق، مخلوط بلافاصله در قالب های استوانه‌ای که جهت انجام آزمایش‌های موردنظر مطابق استاندارد ASTM C 1435 ساخته شده اند، ریخته شده و تراکم نمونه‌ها با استفاده از چکش لرزه‌ای انجام شده است[۱۸].

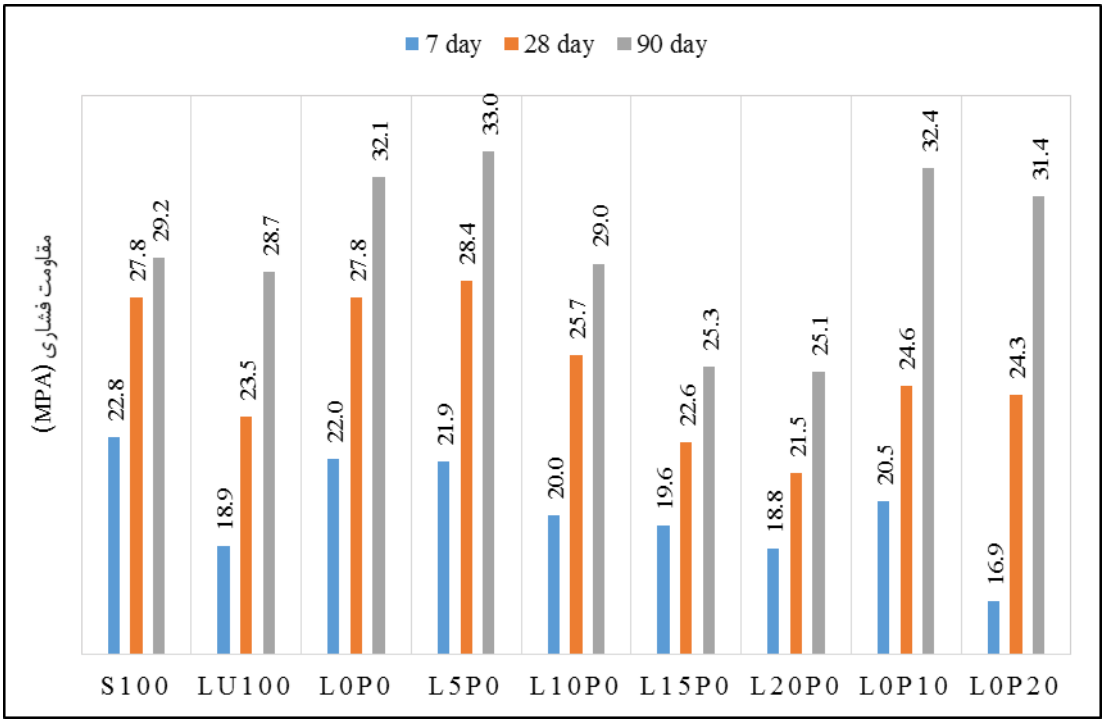
۴- آزمایشات انجام شده

تعیین مقاومت فشاری با استفاده از نمونه‌های استاندارد استوانها ی cm ۳۰*۱۵ و مطابق با آیین‌نامه ASTM C 39 انجام شد[۱۹]. نمونه ها در سنین ۷، ۲۸ و ۹۰ روزه مورد آزمایش قرار گرفته اند. برای تعیین مقاومت کششی دونیم شدگی از نمونه‌های استاندارد استوانه‌ای cm ۳۰*۱۵ مطابق آیین‌نامه ASTM C 496 در سنین مشابه استفاده شد [۲۰]. مطابق استاندارد DIN 1048 آلمان، نمونه‌های ساخته‌شده پس از عمل‌آوری به مدت ۲۸ روز، تحت فشار آب ۵ اتمسفر، در مدت‌زمان ۲ ± ۷۲ ساعت قرار گرفته و میزان نفوذ آب اندازه‌گیری شد[۲۱]. برای انجام آزمایش جذب آب نیز، ابتدا نمونه‌های استوانه‌ای cm ۳۰*۱۵ مطابق استاندارد ساخته‌شده و پس از طی دوره عمل‌آوری و در سن موردنظر برای انجام آزمایش، مغزه‌های استوانه‌ای به ابعاد cm ۷/۵*۷/۵ از نمونه اولیه گرفته شده و آزمایش مطابق استاندارد BS 1881- part 122 انجام شده است[۲۲].

۵- بررسی و تحلیل نتایج آزمایش‌ها

۵-۱- نتایج مقاومت فشاری

نتایج آزمایش مقاومت فشاری روی نمونه ها در شکل ۲، ارائه شده است.



شکل ۲: مقاومت فشاری نمونه‌ها (MPa)

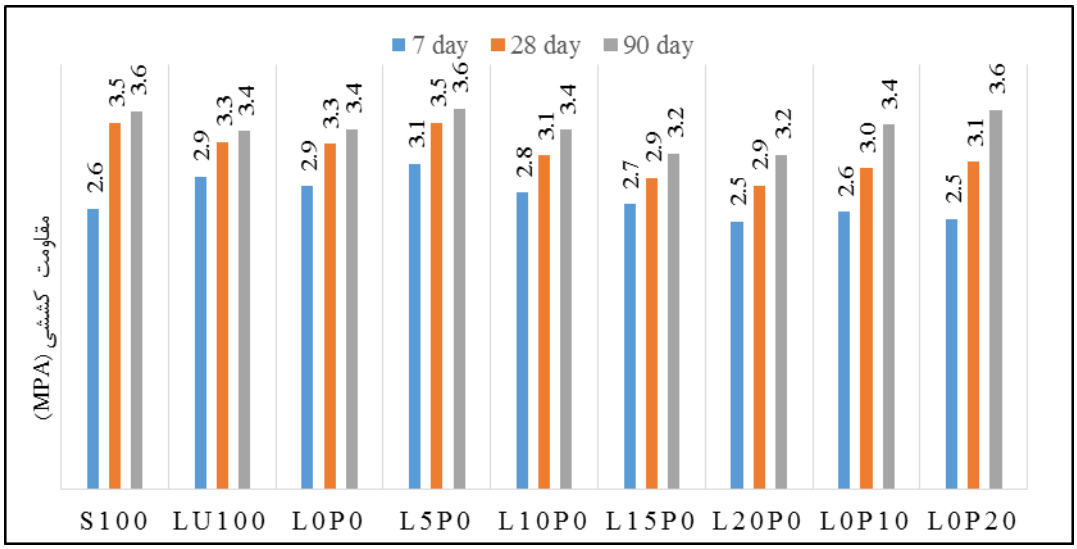
همان‌طور که از شکل ۲ پیداست، در سن ۷ روزه، نمونه حاوی ۵ ٪ آهک زنده مقاومت تقریبا" مشابهی با نمونه شاهد دارد. اما با افزایش مقدار آهک از ۵٪ به ۲۰٪، مقدار مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. بطوریکه نمونه‌های دارای ۱۰٪ آهک نسبت به نمونه شاهد ۹٪ کاهش مقاومت از خود نشان می‌دهد. این مقدار برای نمونه‌های ساخته‌شده با ۱۵٪ و ۲۰٪ آهک به ترتیب برابر ۱۱٪ و ۱۵٪ می‌باشد. در سن ۲۸ روزه مقاومت فشاری نمونه‌های دارای ۵ ٪ آهک از مقاومت فشاری نمونه شاهد پیشی گرفته و حدود ۲٪ بیش از نمونه شاهد است. اما نمونه‌های دارای ۱۰، ۱۵٪ و ۲۰٪ آهک همچنان مقاومتی کمتر از نمونه شاهد دارند. به‌گونه‌ای که به ترتیب دارای کاهش مقاومتی معادل ۸٪، ۱۹٪ و ۲۳٪ نسبت به نمونه شاهد دارند. در سن ۹۰ روز و پس از کامل شدن روند کسب مقاومت بتن، نمونه‌های دارای ۵ ٪ آهک بیشترین مقاومت در بین طرح‌های اختلاط موجود، دارا می‌باشند. به‌گونه‌ای که نسبت به نمونه شاهد مقاومت اندکی بالاتر دارند. اما طرح‌های اختلاط با درصدهای بیشتر آهک نسبت به نمونه شاهد مقاومت کمتری دارند. با توجه به موارد فوق می‌توان نتیجه گرفت که استفاده از آهک زنده به مقدار کم (حدود ۵٪) در طرح اختلاط استفاده شده می‌تواند به افزایش مقاومت فشاری بتن غلتکی کمک کند. اما استفاده بیشتر از۵ ٪ آهک باعث کاهش مقاومت فشاری می‌گردد. دلیل این روند در کسب مقاومت را می‌توان این‌گونه توجیه کرد که با افزایش مقدار آهک در مخلوط و واکنش شدید آب با آهک، کارایی مخلوط کمتر شده و لذا عمل تراکم به‌خوبی صورت نمی‌پذیرد. در خصوص پارامترهای تأثیرگذار بر مقاومت بتن غلتکی، درجه تراکم دارای اهمیت زیادی است و باید درصد رطوبت مخلوط از دیدگاه ژئوتکنیکی، درصد بهینه آن باشد تا منجر به تراکم حداکثر و درنتیجه مقاومت مناسب گردد.

با توجه به نتایج مقاومت فشاری نمونه‌های دارای پوزولان، این‌گونه به نظر می‌رسد که افزودن پوزولان باعث کاهش مقاومت در سنین اولیه می شود و هر اندازه درصد پوزولان مصرفی بیشتر باشد، مقدار کاهش مقاومت محسوس‌تر خواهد بود. نتایج بدست آمده نشان می دهد، در سن ۲۸ روز نمونه‌های دارای پوزولان تفتان مقاومت فشاری کمتری نسبت به نمونه شاهد دارند. این موضوع را می‌توان بدلیل کاهش مقدار سیمان در این نمونه‌ها و واکنش‌پذیری کم پوزولان‌ها در سنین کم نسبت داد. بر اساس نتایج بدست آمده، با افزایش درصد جایگزینی سیمان با پوزولان از ۱۰٪ به ۲۰٪، تغییر قابل‌ملاحظه‌ای در مقاومت فشاری ۲۸ روزه دیده نمی‌شود. به‌طوری که نمونه دارای ۱۰٪ پوزولان به میزان ۱۲ و نمونه دارای ۲۰ ٪ پوزولان به میزان ۱۳ ٪ کاهش مقاومت نسبت به نمونه شاهد داشته‌اند. با توجه به نتایج، نرخ رشد مقاومت فشاری در نمونه‌های دارای پوزولان تفتان از سن ۲۸ تا ۹۰ روزه زیاد است. به‌گونه‌ای که نمونه دارای ۱۰ ٪ پوزولان

نسبت به مقاومت ۲۸ روزه ۳۲٪ و نمونه دارای ۲۰٪ پوزولان نسبت به مقاومت ۲۸ روزه خود ۳۰٪ افزایش مقاومت داشته است. درحالی‌که این افزایش مقاومت برای نمونه شاهد ۱۶٪ بوده است. با توجه به این رشد چشمگیر در کسب مقاومت، در سن ۹۰ روزه مشاهده می‌شود که نمونه حاوی ۱۰٪ پوزولان، کاهش مقاومت خود نسبت به نمونه شاهد در سنین اولیه را جبران کرده و به مقاومتی بیشتر از آن رسیده است. همچنین نمونه دارای ۲۰٪ پوزولان نیز با رشد قابل‌توجه مقاومت، به مقاومت تقریبا برابری با نمونه شاهد (۹۸٪ آن) رسیده است. این نشانگر خاصیت افزایشی مقاومت فشاری پوزولان‌ها در درازمدت می‌باشد؛ به‌گونه‌ای که پوزولان‌ها درنتیجه کامل شدن واکنش‌های پوزولانی، باعث افزایش مقاومت فشاری بتن در طولانی‌مدت می‌شوند. با توجه به زمان نسبتا طولانی فاصله بین احداث رویه راه و بهره برداری از آن می توان در بتن های غلتکی، از مقدار سیمان کاسته و به انتظار مقاومت درازمدت پوزولان باشیم، این امر ضمن اینکه تاثیری در مقاومت فشاری ندارد باعث اقتصادی شدن طرح خواهد شد.

۵-۲- نتایج مقاومت کششی

نتایج آزمایش مقاومت کششی نمونه ها در شکل ۳، ارائه شده است. همانند مقاومت فشاری، طرح اختلاط دارای ۵ ٪ آهک بیشترین مقاومت کششی در تمامی سنین را دارد. همچنین در سن ۹۰ روز، با انجام شدن واکنش‌های پوزولانی، طرح‌های اختلاط دارای پوزولان مقاومت کششی بیشتری نسبت به نمونه شاهد کسب کرده‌اند.

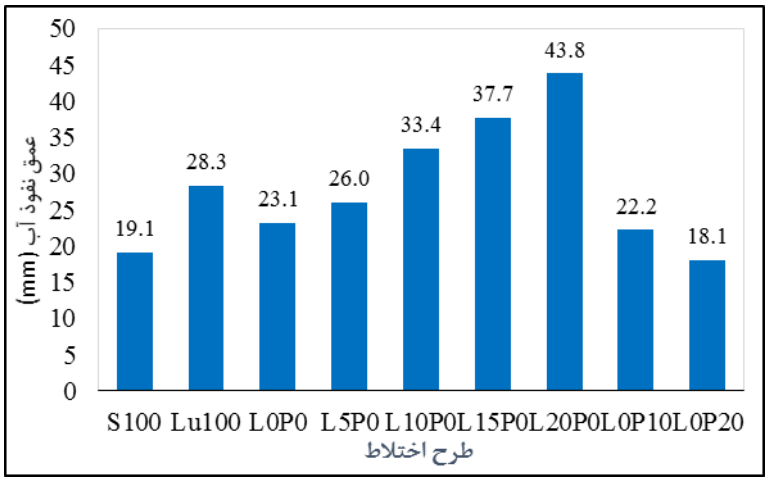


شکل ۳: مقاومت کششی نمونه‌ها در سنین مختلف (MPa)

همان‌طور که مشاهده می‌شود در بازه ۷ تا ۲۸ روزه، بیشترین کسب مقاومت، مربوط به طرح اختلاط دارای ۲۰٪ و ۱۰٪ پوزولان به ترتیب با ۲۱ و ۱۶٪ افزایش می‌باشد. در بازه ۲۸ تا ۹۰ روزه نیز نمونه‌های دارای پوزولان همچنان بیشترین رشد مقاومت را داشته‌اند؛ بطوریکه طرح اختلاط دارای ۲۰ و ۱۰ ٪ پوزولان به ترتیب ۱۶ و ۱۴ ٪ افزایش مقاومت نشان می‌دهند. در سن ۹۰ روزه و پس از کامل شدن روند کسب مقاومت در بتن، نمونه دارای ۵ ٪ آهک همچنان بیشترین مقاومت کششی را در بین طرح‌های مختلف دارا می‌باشد. به‌گونه‌ای که مقاومت آن نسبت به نمونه شاهد ۶ ٪ بیشتر است. نکته قابل‌توجه در این سن مقاومت برابر نمونه دارای ۱۰ ٪ آهک با نمونه شاهد و همچنین مقاومت مشابه طرح‌های اختلاط دارای ۱۵ ٪ و ۲۰ ٪ اهک است. اما نکته قابل‌توجه در روند کسب مقاومت در سنین ۲۸ تا ۹۰ روز، افزایش شیب رشد با افزایش درصد جایگزینی آهک می‌باشد. به‌گونه‌ای که مقاومت کششی نمونه‌های دارای ۵،۱۰، ۱۵ و ۲۰ درصد آهک به ترتیب ۴، ۷، ۸ و ۱۰ درصد زیاد شده است.

۵-۳- نتایج آزمایش عمق نفوذ آب

همان‌طور که در شکل ۴ پیداست، با افزایش درصد آهک در مخلوط‌های بتن غلتکی، میزان نفوذ آب در نمونه‌ها افزایش می‌یابد، بطوری که با افزایش مقدار آهک از صفر به ۲۰ ٪، میانگین عمق نفوذ از ۲۳/۱ mm به۴۳/۸ mm افزایش می‌یابد. می توان گفت، با افزایش درصد آهک زنده از یک‌سو و واکنش شدید آب و آهک و تبخیر آب از سوی دیگر، از میزان آب و همچنین کارایی مخلوط کاسته شده و عمل تراکم به‌خوبی صورت نمی‌پذیرد. و از سویی افزایش حرارت هیدراسیون و درنتیجه افزایش ترک‌های ریز سطحی نیز می‌تواند عامل دیگری در توجیه روند تغییرات در نفوذپذیری نمونه‌های مورد آزمایش باشد.



شکل ۴: عمق نفوذ آب نمونه ها

با توجه به شکل ملاحظه می‌شود که نمونه‌های دارای پوزولان، نفوذپذیری کمتری نسبت به نمونه شاهد داشته و با افزایش درصد جایگزینی پوزولان از ۱۰ ٪ به ۲۰ ٪، مقدار عمق نفوذ کاهش می‌یابد. این مطلب را می‌توان چنین توجیه نمود که پوزولان تفتان به‌عنوان مکمل ریزدانه در مخلوط، منافذ سنگ‌دانه‌ها و فضاهای خالی را پرکرده و سبب ایجاد بتنی همگن و متراکم می‌شود. ژل کافی و ملات سیمان مناسب و توزیع مطلوب ذرات ریزدانه در مخلوط، اولا موجب کاهش نفوذپذیری (به سبب کاهش حفره‌ها و مجراهای موئینه)، ثانیا" افزایش وزن مخصوص (به سبب تراکم بیشتر و غلتک‌پذیری بهتر) و ثالثا" کاهش جداشدگی مصالح درشت‌دانه خواهد شد. از دیگر عوامل کاهش نفوذپذیری، می‌توان به انجام واکنش پوزولانی در بتن اشاره کرد. در جریان یک واکنش پوزولانی (یعنی واکنش بین سیلیس آمورف موجود در پوزولان و آهک هیدراته ناشی از واکنش هیدراسیون)، هیدروکسید کلسیم مصرف می‌شود و فاز اصلی C-H-S هر چه بیشتر تشکیل می‌شود و تخلخل و ساختار خلل و فرج در خمیر، ملات و یا بتن به‌گونه‌ای تغییر می‌کند که نفوذپذیری و درصد جذب کاهش می‌یابد. آیین‌نامه پیشنهادی مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن [۲۳]، مقادیر مجاز عمق نفوذ آب در شرایط مختلف محیطی را به‌صورت زیر بیان می‌کند:

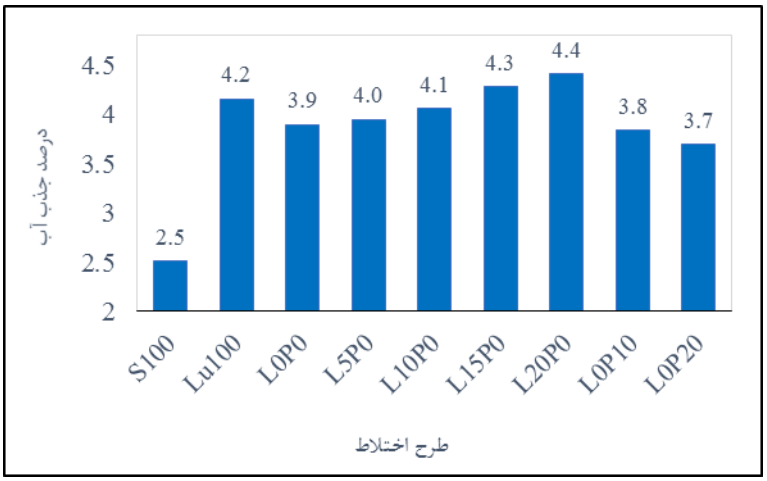
جدول ۵ : مقادیر مجاز عمق نفوذ آب

شرایط محیطی	عمق نفوذ در سن ۲۸ روز
شرایط محیطی متوسط	حداکثر ۵۰ میلی‌متر
شرایط محیطی شدید	حداکثر ۳۰ میلی‌متر
شرایط محیطی فوق‌العاده شدید	حداکثر ۱۰ میلی‌متر

با توجه به مقادیر ارائه‌شده در این جدول و بر اساس آیین نامه فوق، طرح‌های اختلاط دارای پوزولان، شاهد و طرح اختلاط با ۵٪ آهک قابل استفاده در شرایط محیطی شدید هستند، اما طرح‌های حاوی ۱۰٪، ۱۵٪ و ۲۰ ٪ آهک این قابلیت را نداشته و تنها در شرایط محیطی متوسط می توانند بکار گرفته شوند.

۵-۴- نتایج آزمایش جذب آب

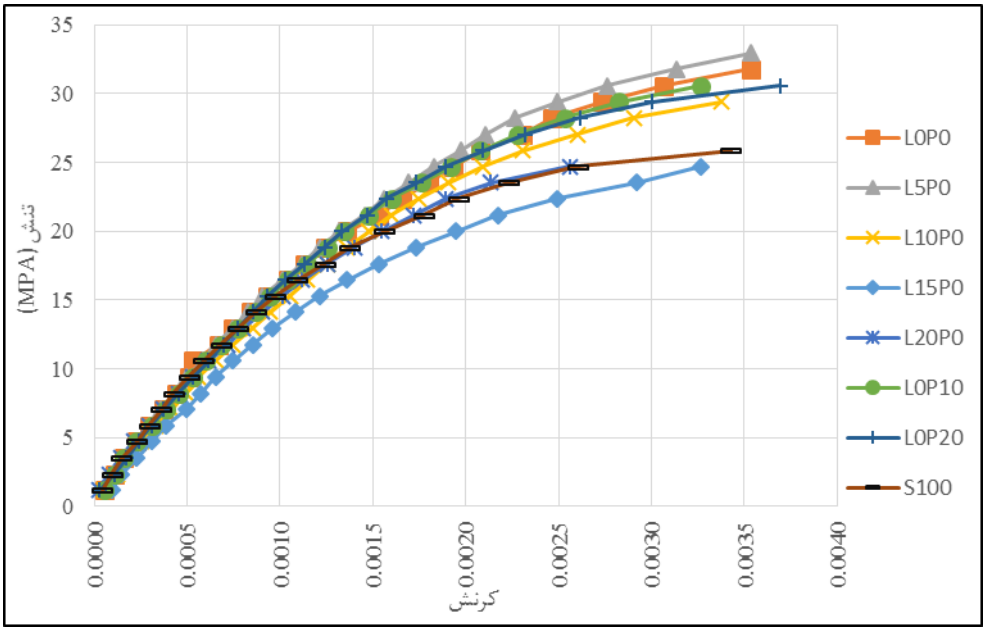
جذب آب بتن از خواص مهم آن به‌ویژه از نقطه نظر امکان نفوذ مواد و املاح خورنده و یا اشباع شدن آن است. نتایج بدست آمده از آزمایش جذب آب نمونه‌های مختلف، در شکل ۵ ارائه شده است. با توجه به شکل، مشاهده می‌شود که تمامی نمونه‌های دارای آهک، درصد جذب آب بیشتری نسبت به نمونه شاهد دارند. همچنین مشخص است که با افزایش درصد آهک، شیب افزایش میزان جذب آب بیشتر می‌شود. علت این امر را می‌توان به کاهش آب مخلوط در اثر واکنش با آهک زنده و درنتیجه عدم تراکم مناسب به علت کارایی پایین‌تر مخلوط بتن غلتکی نسبت داد. همچنین مشاهده می‌شود که برخلاف آهک زنده، پوزولان تفتان به‌عنوان مکمل ریزدانه در مخلوط، منافذ سنگ‌دانه‌ها و فضاهای خالی را پرکرده و سبب ایجاد بتنی همگن و متراکم می‌شود. که این موضوع سبب کاهش میزان جذب آب در نمونه‌های دارای پوزولان نسبت به نمونه شاهد شده است. به‌گونه‌ای که با افزایش درصد پوزولان، درصد جذب آب کمتر شده است.



شکل ۵: درصد جذب آب نمونه ها

۵-۵- نتایج آزمایش تعیین مدول الاستیسیته

برای معرفی رفتار مصالح ازلحاظ عکس‌العمل تغییر شکلی آنها در مقابل بارهای وارده، از مدول الاستیسیته استفاده می‌شود. با توجه به شکل ۶، ملاحظه می‌شود که بیشترین مدول الاستیسیته مربوط به نمونه دارای ۵ درصد آهک است که نسبت به نمونه شاهد ۳ درصد بالاتر است. همچنین هیچ‌گونه روند قابل‌تشخیصی از تاثیر آهک زنده بر مدول الاستیسیته مشاهده نمی‌شود. در مورد نمونه‌های دارای پوزولان مشخص است که طرح دارای ۱۰ ٪ پوزولان مدول الاستیسیته برابری با نمونه شاهد دارد. اما با افزایش درصد پوزولان به ۲۰ ٪، از مقدار مدول الاستیسیته کاسته می‌شود.



شکل ۶: نمودار تنش – کرنش نمونه‌ها

۶- تفسیر نتایج و ارتباط آنها با یکدیگر

با توجه به نتایج بدست آمده در انتخاب مواد و مصالح سنگی ریزدانه، طرح اختلاط حاوی لوماشل و ماسه (۵۰٪ ماسه، ۵۰٪ لوماشل) نسبت به طرح اختلاط دارای لوماشل تنها، مناسب‌تر است. بطوریکه این طرح اختلاط دارای مقاومت فشاری بیشتر، مقاومت کششی تقریبا برابر و درصد جذب آب و نفوذپذیری کمتری نسبت به طرح اختلاط با لوماشل تنها می‌باشد. علت این امر را می‌توان عدم باربری کافی لوماشل و همچنین تخلخل بسیار بالای آن دانست. عدم باربری و مقاومت کافی سبب کاهش مقاومت و تخلخل بالا موجب افزایش میزان جذب آب و نفوذپذیری می‌شود. اما با ترکیب لوماشل و ماسه در بخش ریزدانه، این کمبود جبران شده و طرح اختلاط مناسب با خواص مطلوب شکل می‌گیرد. به‌گونه‌ای که نتایج تمام آزمایش‌های صورت گرفته در محدوده مجاز آیین‌نامه قرار دارند. فلذا استفاده از لوماشل در تهیه بتن غلتکی امکانپذیر و موجب اقتصادی تر شدن طرح خواهد شد.

نتایج نشان‌دهنده تاثیر مطلوب استفاده از پوزولان تفتان به‌عنوان مواد مکمل سیمانی بر خواص بتن غلتکی است. در رابطه با خواص مکانیکی، استفاده از پوزولان سبب کاهش مقاومت در کوتاه‌مدت و افزایش آن در درازمدت می‌شود. همچنین استفاده از پوزولان باعث کاهش نفوذپذیری و جذب آب بتن غلتکی می‌گردد. و با توجه به قیمت کمتر پوزولان در مقایسه با سیمان، با در نظر گرفتن توجیه اقتصادی طرح، مقدار ۲۰٪ پوزولان تفتان به‌عنوان درصد مناسب جایگزینی سیمان، از بین مقادیر مورد آزمایش در این پژوهش توصیه می‌گردد.

جایگزینی ۵٪ وزنی سیمان با آهک زنده، منجر به کسب مقاومت فشاری، مقاومت کششی و مدول الاستیسیته بیشتر نسبت به نمونه شاهد می‌شود. اما افزایش جایگزینی آهک، منتج به کاهش این خواص می‌گردد. همچنین استفاده از آهک در مقادیر مختلف باعث کاهش خصوصیات دوام بتن (افزایش جذب آب و نفوذپذیری) می‌شود. با توجه به نتایج بدست آمده، در بین مقادیر ۵، ۱۰، ۱۵ و ۲۰٪ آهک زنده استفاده شده در این پژوهش، جایگزینی ۵٪ آهک زنده بیشترین بهبود مقاومت فشاری و کششی را در تمامی سنین داشته است. همچنین نمونه دارای ۵٪ آهک، در بین نمونه‌های دارای آهک، نزدیک‌ترین مقدار جذب آب و عمق نفوذ آب را به نمونه شاهد دارد. بنابراین درصد بهینه آهک برای استفاده در بتن غلتکی، ۵٪ وزنی سیمان است.

با مقایسه درصدهای بهینه بدست آمده برای جایگزینی پوزولان تفتان و آهک زنده بجای سیمان مصرفی، مشاهده می‌شود که در سنین کم، نمونه دارای آهک مقاومت فشاری و کششی بیشتری نسبت به نمونه دارای پوزولان است. اما در درازمدت، نمونه دارای پوزولان،

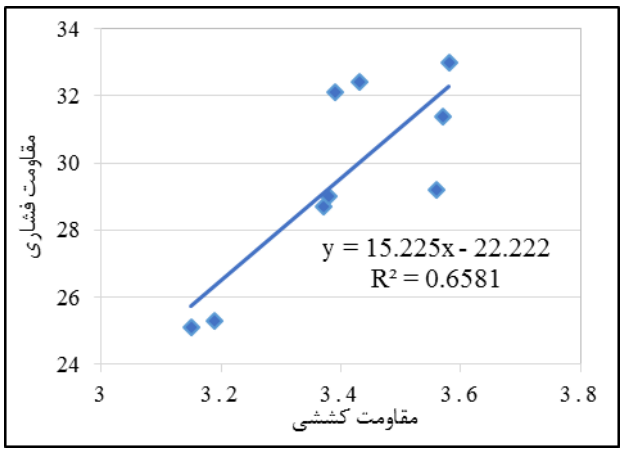
مقاومت تقریبا" مشابهی با نمونه حاوی آهک دارد. همچنین از لحاظ خصوصیات دوام بتن، نمونه حاوی پوزولان، وضعیت مناسب‌تری نسبت به نمونه با آهک دارد. بنابراین درصورتی‌که مبنای طراحی، مقاومت بتن در سنین پایین باشد، استفاده از آهک پیشنهاد می‌گردد. اما اگر معیار طراحی مقاومت درازمدت است، استفاده از پوزولان تفتان در طرح اختلاط توصیه می‌گردد. استفاده از پوزولان با مقدار ۲۰٪ جایگزینی سیمان (درصد بهینه بدست آمده)، منجر به اقتصادی شدن طرح و اثرات مثبت زیست محیطی خواهد بود.

ارتباط بین نتایج آزمایش‌های مختلف

ازآنجاکه یک ویژگی از بتن و خمیر سیمان در نتایج چند آزمایش مختلف تاثیر می‌گذارد لذا نمی‌توان با اکتفا به نتایج یک یا دو آزمایش با قطعیت در مورد مشخصات آن بتن داوری کرد. بنابراین برای پیش‌بینی دقیق‌تر از برخی خصوصیات بتن با در دست داشتن برخی ویژگی‌های دیگر همان بتن، می‌توان رابطه میان نتایج آزمایش‌های مختلف را بررسی نمود.

مقاومت فشاری – مقاومت کششی

شکل ۷ ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی نمونه ها در سن ۹۰ روز را نشان می‌دهد.

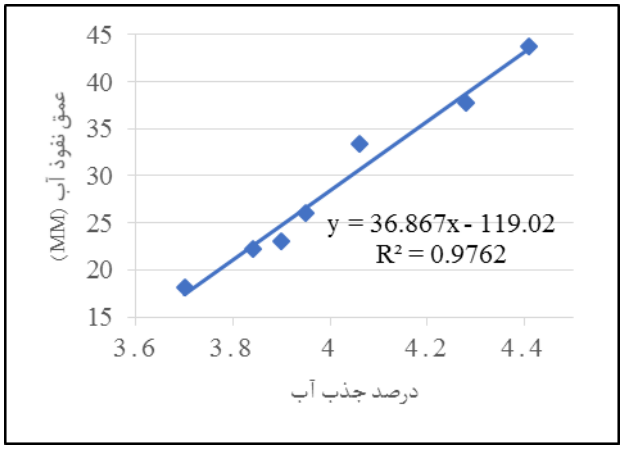


شکل ۷ : ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی در سن ۹۰ روز (MPa)

همانطور که مشاهده می‌شود بین مقاومت فشاری و مقاومت کششی رابطه خطی وجود دارد، بطوریکه با افزایش مقاومت فشاری، مقاومت کششی نیز افزایش یافته است.این نتیجه قبلا نیز توسط برخی محققین گزارش شده است[۱۷].

درصد جذب آب – عمق نفوذ آب

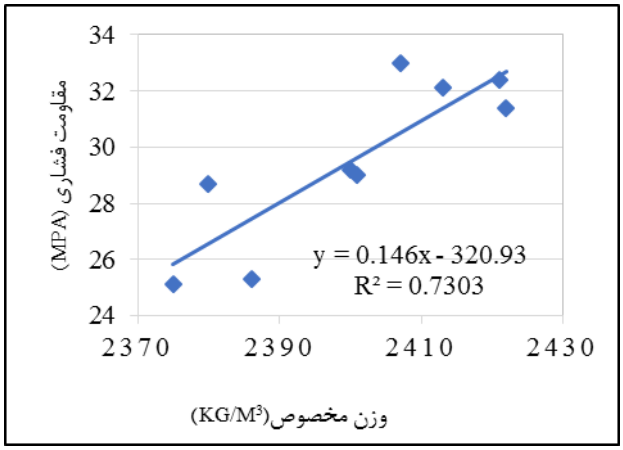
در شکل ۸ ارتباط بین درصد جذب آب و نفوذپذیری طرح‌های اختلاط مختلف در سن ۲۸ روز نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است با افزایش درصد جذب آب، نفوذپذیری نیز افزایش می‌یابد. ضریب همبستگی مناسب، وجود این ارتباط بین مقاومت فشاری و کششی را تایید می‌کند.



شکل ۸ : ارتباط بین عمق نفوذ و جذب آب در سن ۲۸ روزه

وزن مخصوص – مقاومت فشاری

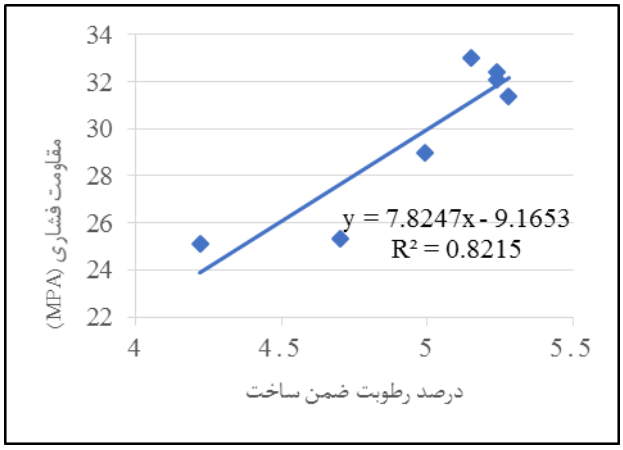
شکل ۹ رابطه بین وزن مخصوص و مقاومت فشاری نمونه ها در سن ۹۰ روزه را نشان می‌دهد. با توجه به شکل واضح است که با افزایش وزن مخصوص، مقاومت فشاری افزایش می‌یابد. هرچه وزن مخصوص نمونه بیشتر باشد، مقدار خلل و فرج آن کمتر بوده و درنتیجه بار فشاری بیشتری را تحمل می‌کند. فلذا در کارگاه و به هنگام اجرا با اندازه گیری وزن مخصوص می توان پیش بینی مناسبی در خصوص مقاومت فشاری بتن به دست آورد.



شکل ۹ : رابطه بین مقاومت فشاری و وزن مخصوص

مقاومت فشاری – درصد رطوبت مخلوط حین ساخت

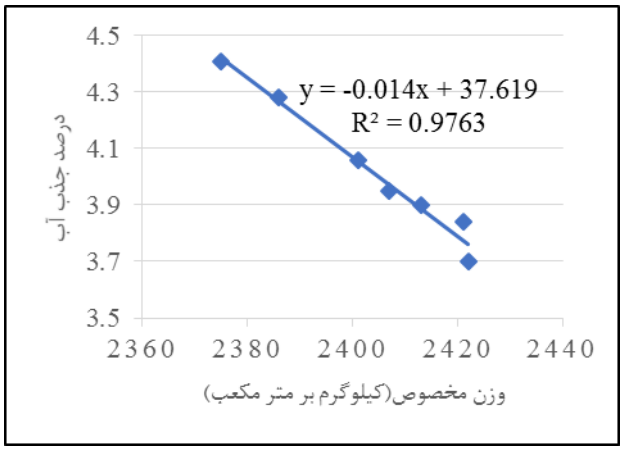
همان‌طور که در شکل ۱۰ مشخص است، نمونه‌های ساخته‌شده با درصد رطوبت مناسب، بدلیل قابلیت تراکم‌پذیری مطلوب، دارای مقاومت فشاری بیشتری هستند. این نمودار تایید می‌کند ضمن افزایش درصد آهک و درنتیجه کاهش کارایی و رطوبت مخلوط، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. مشخص است که نمونه هایی ساخته شده در محدوده رطوبت ۵٪ مقاومت فشاری بیشتری بدست داده اند که این نتیجه منطبق بر مشاهدات ارائه شده عبدالوهاب و همکاران می باشد.



شکل ۱۰ : تاثیر درصد رطوبت بر مقاومت فشاری بتن غلتکی

وزن مخصوص – دوام

در حال حاضر پارامترهایی نظیر عمق و درصد جذب آب به عنوان مشخصه های دوام بتن مورد ارزیابی قرار می گیرند. ارتباط بین وزن مخصوص و میزان جذب آب در شکل ۱۱ قابل مشاهده است.



شکل ۱۱ : رابطه بین وزن مخصوص و درصد جذب آب

همان‌طور که از نمودار مشخص است با افزایش وزن مخصوص بتن غلتکی درصد جذب آب کاهش یافته و می توان گفت دوام بتن افزایش خواهد یافت. ازآنجاکه در یک طرح اختلاط ثابت، وزن مخصوص بیشتر نشان‌دهنده تراکم بیشتر بتن می‌باشد، فضای خالی میان سنگ‌دانه‌ها در بتن با وزن مخصوص بیشتر، کمتر بوده و درنتیجه مقدار آب نفوذ کرده نیز کاهش یافته است. با توجه به اینکه تراکم مناسب عامل موثری در افزایش وزن مخصوص بتن و سایر خواص بتن‌های غلتکی است و در صورت عدم دستیابی به تراکم مناسب، پارامترهای دوام بتن غلتکی تنزل خواهد نمود. لذا کنترل رطوبت بهینه به هنگام ساخت بتن و بکار گیری ماشین آلات مناسب برای تامین تراکم ضروری بوده و با توجه به نتایج فوق با ارزیابی وزن مخصوص بتن ساخته شده می توان پیش بینی مناسبی از عملکرد بتن داشت.

۷- نتیجه گیری

در این مقاله به منظور کاهش هزینه ساخت، امکان استفاده از لوماشل به عنوان ریز دانه و افزودنی ها به عنوان جایگزین بخشی از سیمان مصرفی در بتن غلتکی مورد بررسی قرار گرفت.

- اگرچه نمونه ها ساخته شده با ریز دانه معمولی (ماسه) وضعیت مقاومتی و دوام بهتری نسبت به سایر نمونه ها دارد، اما در صورتی که بتوان با حفظ خصوصیات (در محدوده استاندارد) استفاده از آن را تا حد ممکن کاهش داده و از مصالح محلی استفاده نمود، کمک زیادی به اقتصاد طرح خواهد شد. لذا استفاده از نمونه های حاوی لوماشل به دلیل فراوانی و دسترسی زیاد به آنها در مناطق ساحلی و علی الخصوص سواحل دریای عمان به میزان ۵۰٪ ریزدانه ارجح و قابل توصیه است.
- جایگزینی لوماشل به‌جای سنگ‌دانه‌های استاندارد بتن غلتکی علاوه بر اقتصادی شدن طرح، به دلیل تامین از منابع محلی همگونی مناسبی با طبیعت داشته و اثرات زیست‌محیطی مثبتی به همراه دارد.
- به منظور بهبود کیفیت بتن ساخته شده، استفاده از آهک به میزان ۵٪ وزنی سیمان قابل توصیه است. این مقدار آهک در بین نمونه های ساخته شده می تواند به بهبود کیفیت بتن ساخته شده در کوتاه مدت کمک نماید.
- استفاده از پوزولان تفتان به عنوان جایگزین بخشی از سیمان نیز در این پژوهش مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان داد که مقدار ۱۰٪ پوزولان بیشترین بهبود در مقاومت فشاری و مقدار جایگزینی ۲۰٪، بیشترین اثر کمکی را بر مقاومت کششی، درصد جذب آب و عمق نفوذ آب دارد. با توجه به اینکه اختلاف مقاومت فشاری حاصله در طرح‌های اختلاط دارای پوزولان، بخصوص در سنین ۲۸ و ۹۰ روزه، تا حدودی ناچیز است و با توجه به قیمت کمتر پوزولان در مقایسه با سیمان، با در نظر گرفتن توجیه اقتصادی طرح، مقدار ۲۰٪ پوزولان تفتان به عنوان درصد مناسب جایگزینی سیمان، از بین مقادیر مورد آزمایش در این پژوهش توصیه می‌گردد.

سپاسگزاری

در اجرای این پژوهش اداره کل راه و شهر سازی ایرانشهر مساعدت نموده است که بدینوسیله از تمامی مدیران و دست اندر کاران آن اداره کل تقدیر و تشکر می گردد.

مراجع

[1] Cao, C., Sun, W., Qin, H. (2000). The Analysis on Strength and Fly Ash Effect of Roller Compacted Concrete with High Volume Fly Ash, *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, pp. 71-75.

[2] Naik, T.R., Chun, Y.M., Kraus, R.N., Singh, S.S., Pennock, L.L., Ramme, B.W. (2001). Strength and Durability of Roller-Compacted HVFA Concrete Pavements, *Practice Periodical on Structural Design and Construction*, Vol. 6, No. 4, pp. 154-165.

[3] Atis C.D., Sevim, U.K., zcan, O., Bilim, C., Karahan, O., Tanrikulu, A.H., Eksi, A. (2004). Strength Properties of Roller Compacted Concrete Containing a Non-Standard High Calcium Fly Ash, *Journal of Materials Letters*, Vol.58, pp. 1446-1450.

[4] Atis C.D. (2005). Strength Properties of High-Volume Fly Ash Roller-Compacted and Workable Concrete, and Influence of Curing Condition, *Cement and Concrete Research*, Vol.35, pp. 1112-1121.

[5] Zdiri, M., Ouezdou, M.B., Abriak, N.O., Neji, J. (2010). Contribution of Siderite Fines Additions on the Roller-Compacted Concrete (RCC) Strength, *Journal of Engineering and Technology Research*, Vol.2, No. 1, pp. 13-23.

[6] Nili, M., Zaheri, M. (2011). Deicer Salt-Scaling Resistance of Non-Air-Entrained Roller-Compacted Concrete Pavements, *Construction and Building Materials*, Vol.25, pp. 1671-1676.

[7] Torki Harchegani, M.E., Azizkhani, R., Madhkhan, M. (2012). Effects of Pozzolans Together With Steel and Polypropylene Fibers on Mechanical Properties of RCC Pavements, *Construction and Building Materials*, Vol.26, pp. 102-112.

[8] Modarres, A., Hosseini, Z. (2014). Mechanical Properties of Roller-Compacted Concrete Containing Rice Husk Ash with Original and Recycled Asphalt Pavement Material, *Materials and Design*, Vol. 64, pp. 227-236.

[9] Huang, R., Chi, M. (2014). Effect of Circulating Fluidized Bed Combustion Ash on the Properties of Roller-Compacted Concrete, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 45, pp. 148-156.

[۱۰] درویش زاده ع. (۱۳۸۰). *زمین‌شناسی ایران*، تهران، انتشارات امیرکبیر.

[11] ASTM C 188. (1995). Standard *Test Method for Density of Hidraulic Cement*, American Society for Testing and Materials.

[۱۲] وزارت راه و شهرسازی. (۱۳۹۲). دستورالعمل اجرایی و کنترل کیفی روسازی‌های بتن غلتکی، ویرایش اول، تهران، ایران.

[۱۳] شرکت آهک صنعتی سیمان شرق،. http://www.sharghlime.ir.

[14] ASTM C 618. (2000). *Standard Specification for Coal Fly Ash and Raw or Calcined Natural Poozzolan for Use as a Mineral Admixture in Concrete*, American Society for Testing and Materials.

[۱۵] خلیلی خرم و.، وثوقی فر ح.، منصوری ع. (۱۳۸۸). بررسی آزمایشگاهی تاثیر پوزولان خاش بر افزایش مقاومت بتن RCC در سنین بالا، *سومین کنفرانس بین‌المللی بتن و توسعه*.

[۱۶] معاونت برنامه‌ریزی و نظارت راهبردی رییس‌جمهور. (۱۳۸۸). *راهنمای طراحی و اجرای بتن غلتکی در روسازی راههای کشور*، نشریه ۳۵۴، تهران، ایران.

[17] Abdul Wahhab, H.I., Asi, I.M., Qasrawi, H.Y. (2005). Proportioning RCCP Mixes Under Hot Weather Conditions for a Specified Tensile Strength, *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, pp. 267-276.

[18] ASTM C 1435. (1999). Standard *Practice for Modeling Roller – Compacted Concrete in Cylinder Molds Using Vibrating Hammer*, American Society for Testing and Materials.

[19] ASTM C 39. (2001). *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, American Society for Testing and Materials.

[20] ASTM C 496. (1996). *Standard Test Method for Splitting Tensile Strength of Cylindrical Concrete Specimens*, American Society for Testing and Materials.

[21] DIN 1048, *Testing Methods for Concrete.*

[22] BRITISH STANDARD 1881. Part 122. (1983). *Method for determination of water absorption.*

[۲۳] مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن. (۱۳۸۴). *آیین نامه ملی پایایی بتن در محیط خلیج فارس و دریای عمان (پیشنهادی)*، نشریه شماره ض-۴۲۸، چاپ اول، تهران، ایران.