

## ارائه مدل رگرسیون خطی جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط بتن غلتکی روسازی

محمد کریمی گوغری (مسئول مکاتبات)، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست،

دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

ابوالفضل حسینی، استاد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران

تقی صفرنیا کپته، دانش آموخته کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه تربیت مدرس، تهران، ایران.

E-mail: m\_karimi\_tmu@yahoo.com

دریافت: ۱۳۹۲/۰۱/۲۲ پذیرش: ۱۳۹۳/۰۸/۱۷

### چکیده:

همه ساله حجم زیادی از مصالح زائد در جهان در حال تولید است که از این بین سهم بسیار کمی به بازیافت و استفاده مجدد تعلق می گیرد. خرده‌های آسفالت بازیافتی نوعی از مواد زائد هستند که از نظر زیست محیطی ممکن است اثرات نامطلوبی بر محیط اطراف خود داشته باشند و تاکنون راهکارهای گوناگونی جهت استفاده مجدد این مصالح ارائه شده است. یکی از کاربردهایی که به تازگی مورد توجه قرار گرفته، استفاده از این مصالح در مخلوط‌های سیمانی از جمله بتن است. این در حالی است که مصالح خرده آسفالت بازیافتی به طور متداول در جاده‌ها و راه‌ها یافت شده و از این رو مطلوب است که بتوان آنها را در مخلوط‌های متداول مورد استفاده در ساخت روسازی راه‌ها استفاده کرد. از این روی بتن غلتکی که مخلوطی بتنی است و دارای شرایطی منحصر به فرد از جهت سادگی اجرا و کم هزینه بودن به عنوان مخلوط پایه است، انتخاب گردید. در این تحقیق مخلوط بتن غلتکی با دو نسبت اختلاط (مقاومت طراحی) مختلف و انواع مختلف جایگزینی سنگدانه‌های خرده آسفالت بازیافتی و با درصد‌های مختلف ساخته شده و پس از ۲۸ روز عمل آوری تحت آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفته شدند. سپس بر مبنای نتایج آزمایشگاهی، معادلات رگرسیونی با ضرایب همبستگی قابل قبول جهت پیش بینی مقاومت فشاری و درصد‌های مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی ارائه شد. اعتبار سنجی این مدل‌ها از طریق استفاده از انواع دیگر خرده آسفالت بازیافتی نیز از دیگر اقدامات صورت پذیرفته در این تحقیق بود.

واژه‌های کلیدی: بتن غلتکی روسازی، خرده آسفالت بازیافتی، بازیافت، مدل رگرسیون خطی

## ۱. مقدمه

مضاف و نخاله‌های صنعتی و ساختمانی در مخلوط‌های بتنی و نیز مخلوط بتن غلتکی صورت پذیرفته است. استفاده از مصالح دور ریزی چون خرده بتن بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی به عنوان جایگزین سنگدانه گرچه مقاومت مخلوط را کاهش می‌دهد، اما از لحاظ اثرات مطلوب زیست محیطی موجه گزارش شده است [CourardLuc et al. 2010]. جایگزینی ۲۵ درصدی سرباره کنورتور ذوب آهن اصفهان (به عنوان یک مصالح دور ریز) به عنوان بخشی از سنگدانه مخلوط بتن غلتکی نیز باعث بهبود خواص مقاومتی این مخلوط شده، اما در درصد‌های بالاتر کاهش مقاومت گزارش شده است [CourardLuc et al. 2010].

خرده‌های آسفالت بازیافتی که به عنوان مصالحی نخاله‌ای حاصل از بازسازی و تراش رویه‌های آسفالتی حاصل می‌شوند، بخش اعظمی از مصالح دورریز را تشکیل می‌دهند و در اغلب موارد در فرآیند بازیافت مخلوط‌های آسفالتی قرار داشته‌اند، این در حالی است که در صورتی که شرایط بازیافت درجای آسفالت فراهم نباشد و یا به هر دلیلی تصمیم گرفته شود که از سایر انواع رویه‌ها استفاده شود، در آن صورت به دلیل هزینه‌های بالای حمل، احتمالاً این مصالح می‌بایست در نزدیکی مسیر دپو شود که مشابه این مورد همواره در بسیاری از پروژه‌های بهسازی راه‌های داخل کشور مرسوم است.

تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از مصالح خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های بتنی صورت پذیرفته است. محدود تحقیقات انجام شده به بررسی تاثیر استفاده از خرده آسفالت بازیافتی بر مخلوط بتن معمولی پرداخته [Ameri, 2009] و این در شرایطی است که استفاده از این نوع مصالح در مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی به دلیل ارتباط موضوعی به روسازی راه و سهولت‌های ناشی از حذف مشکلات انتقال مصالح، موجه‌تر از سایر مخلوط‌های بتنی می‌باشد. بنابراین در این تحقیق پس از اثبات امکان پذیری استفاده از خرده آسفالت بازیافتی به عنوان جایگزین سنگدانه در مخلوط

بتن غلتکی، بتنی است با اسلامپ صفر که برای ساخت رویه‌های راه کاربرد دارد. مزایای عمده این نوع روسازی‌ها که سبب برتری آن نسبت به روسازی‌های آسفالتی و بتنی معمولی گردیده است، مواردی چون اجرای سریع و آسان، هزینه‌های اجرایی کم، مصرف کمتر سیمان و مقاومت زیاد آن در شرایط آب و هوایی سرد یا گرم است. ACI 325 در تعریف این نوع بتن آورده است که "بتن غلتکی مخلوطی است که در حالت تازه شرایطی دارد که امکان عبور غلتک از روی آن فراهم می‌آید و به این ترتیب در نهایت بتن سخت و متراکم شده‌ای که وسیله تراکم آن غلتک بوده حاصل می‌شود" [ACI 325, 1995]. در کانادا و شمال آمریکا و بعضی از کشورهای اروپایی این نوع بتن برای ساخت رویه راه، رویه‌های صنعتی با ترافیک بسیار سنگین در شرایط آب و هوایی نامساعد همچون سرما و یخبندان شدید بسیار کاربرد داشته است [Ville, 2002].

گسترش این روسازی عمدتاً به علت بحران نفتی دهه ۷۰ میلادی بوده که باعث افزایش هزینه‌های اجرای روسازی آسفالتی در سطح جهان شده است و کشورهای بسیاری استفاده از آن را برای راه‌های نظامی و نواحی صنعتی، زمین‌های فرودگاهی و نیز جاده‌ها آغاز کرده‌اند. این فناوری جدید سبب کاهش هزینه‌های اجرایی به میزان ۳۰ درصد شده است [AbdulWahhab et al. 1999]. از این روی بتن غلتکی تاریخیچه چندان طولانی در روسازی‌های راه ندارد و شاید بتوان گفت اولین استفاده از آن در ساخت رویه راه به سال ۱۹۳۰ توسط گروه مهندسين ارتش آمریکا در ساخت کف‌های صنعتی باز می‌شود، بعد از آن این گروه از بتن غلتکی برای ساخت باند پرواز در فرودگاه واشنگتن در سال ۱۹۴۲ استفاده کردند. از دیگر موارد کاربرد بتن غلتکی در مقیاس بزرگ در یک محوطه صنعتی در ونکوور کانادا در سال ۱۹۷۶ بوده است. [ACI 325, 1995] طی سالهای گذشته تحقیقات زیادی در زمینه استفاده از

ارائه مدل رگرسیون خطی جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی ...

### ۳. مواد و مصالح بکار رفته

مصالح مورد استفاده در این تحقیق آزمایشگاهی شامل سیمان پرتلند، شن و ماسه طبیعی، خرده آسفالت بازیافتی و آب بوده است. بخش درشت‌دانه و ریزدانه سنگدانه طبیعی از معادن تولید سنگدانه شکسته اطراف شهر تهران با مشخصات جدول ۱ تهیه شده، سیمان مصرفی از سیمان تپ II با مشخصات جدول ۳ مورد استفاده قرار گرفته و آب مصرفی نیز آب شرب شهر تهران و فاقد هیچگونه افزودنی بوده است. خرده آسفالت بازیافتی مورد استفاده در این تحقیق از تراشه رویه‌های آسفالتی اطراف شهر تهران حاصل شده و مشخصات آن به ترتیب در جداول ۱ و ۲ ارائه شده است و دانه بندی مورد استفاده دانه‌بندی پیش نهادهی PCA2 است که در شکل ۱ و دانه بندی خرده آسفالت مورد استفاده قبل و بعد از اکستراکشن در شکل ۲ نمایش داده شده است.

بتن غلتکی به ارائه مدل رگرسیون خطی جهت پیش بینی مقاومت و نیز درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی پرداخته شده است.

### ۲. روش تحقیق

این تحقیق منطبق بر مراحل زیر انجام پذیرفت:

الف- تعیین نسبت‌های اختلاط با دو مقاومت طراحی، ب- ساخت نمونه‌های استوانه‌ای حاوی درصدهای مختلف خرده آسفالت بازیافتی در سه حالت ۱- جایگزینی در ریزدانه و درشت‌دانه ۲- جایگزینی فقط در ریزدانه ۳- جایگزینی فقط در درشت‌دانه، مشاهده تاثیر آن بر مقاومت فشاری ۲۸ روزه بتن غلتکی، ج- تشکیل معادلات رگرسیونی جهت پیش بینی درصدهای مجاز خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی با مقاومت‌های متفاوت، کنترل برآوندهای معادلات رگرسیونی از طریق استفاده از نوع دیگری از خرده آسفالت بازیافتی.

جدول ۱. مشخصات سنگدانه های مصرفی

مقاومت ساییدگی لوسانجلس	درصد جذب آب	وزن مخصوص فضایی	
		(Kg/m <sup>3</sup> )	
۲۱	۱/۶۵	۲۷۷۰	درشت‌دانه
----	۲/۱	۲۶۱۰	ریزدانه
----	۱/۳۵	۲۴۰۰	درشت‌دانه
----	۱/۸	۲۲۰۰	ریزدانه
----	۱/۴۵	۲۳۳۰	درشت‌دانه
-----	۱/۸۵	۲۱۵۰	ریزدانه

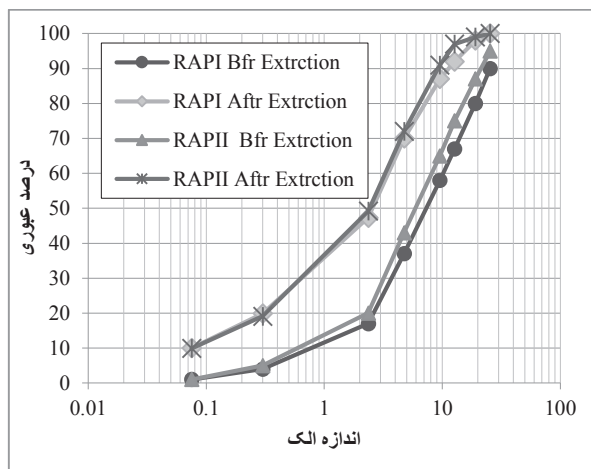
جدول ۲. مشخصات خرده آسفالت بازیافتی مورد استفاده

مقدار کشش قیر در ۲۵°C (سانتی متر)	درجه نفوذ در ۲۵°C (۰/۱ میلیمتر)	درصد قیر	نوع خرده آسفالت
۴/۲	۱۶	۵/۲	RAP I
۳/۸	۱۵	۵/۵	RAP II

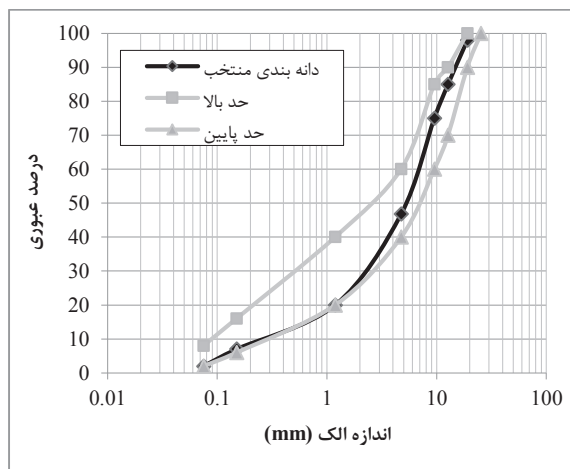
محمد کریمی گوغری، ابوالفضل حسنی، تقی صفرنیا کپته

جدول ۳. مشخصات سیمان تیپ II

۳۱۵۰	وزن مخصوص ( $\frac{Kg}{m^3}$ )
۲۹۹۱	نرمی (بلین) ( $\frac{Cm^3}{gr}$ )
۰/۰۲۸	انسباط %
۱۴۵	زمان گیرش اولیه (دقیقه)
۳:۳۰	زمان گیرش نهایی (دقیقه:ثانیه)
۲۱۲	مقاومت فشاری ۳ روزه ( $\frac{Kg}{Cm^3}$ )
۳۰۵	مقاومت فشاری ۷ روزه ( $\frac{Kg}{Cm^3}$ )
۴۱۰	مقاومت فشاری ۲۸ روزه ( $\frac{Kg}{Cm^3}$ )



شکل ۲. دانه بندی خرده آسفالت های باز یافتی قبل و بعد از اکستراکشن



شکل ۱. دانه بندی مورد استفاده در ساخت نمونه های بتن غلتکی [PCA, 1987]

#### ۴. روند آزمایشها

##### ۴-۱ تهیه مخلوط، ساخت نمونه ها و معرفی آزمایشها

مراحل ساخت نمونه ها در این تحقیق به این شکل بوده است:  
 ۱-تهیه بتن تازه طبق مراحل اختلاط بیان شده در جدول ۴،  
 ۲-کنترل زمان وی بی با استفاده میز ویبره و سربرار ۲۲/۷ کیلوگرمی [ASTM C1170, 1998] (زمان وی بی اصلاح شده تحت سربرار ۷/۲۲ کیلو گرمی برای بتن غلتکی روسازی بایستی بین ۳۰ تا ۴۰ ثانیه باشد [ACI 325, 1995])، ۳- ساخت نمونه های استوانه ای

با استفاده از میز ویبره و سربرار ۹/۱ کیلوگرمی (شکل ۳) [ASTM C1176, 1992]، ۴- نهایتاً نمونه ها پس از یک روز از قالب بیرون آورده شده و به مدت ۲۸ روز در حوضچه آب در حالت اشباع عمل آوری شدند.

آزمایش مقاومت فشاری (شکل ۴) [ASTM39/C 39M, 2003] از آن جهت در دستور کار این پروژه قرار گرفت که طبق توصیه ACI 325، حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط های بتن غلتکی روسازی را ۲۷/۶ مگاپاسکال (Psi)

جدول ۴. مراحل اختلاط در مخلوط کن [DebiebFarid et al. 2009]

زمان	$t_0-5'$	$t_0-2'$	$t_0$	$t_0+1'$
مصالح اضافه شده به مخلوط کن	سنگدانه	سیمان	آب	پایان اختلاط

ارائه مدل رگرسیون خطی جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی ...



شکل ۳. ساخت و تراکم نمونه استوانه ای بتن غلتکی توسط میز لرزان و سربر



شکل ۴. آزمایش مقاومت فشاری تک محوری

درشت دانه به ریزدانه و مقادیر مختلف آب در مخلوط نشان داده شده است.

همان گونه که از جداول مشخص است، مخلوط هایی که بیشترین مقاومت را در زمان وی بی مناسب برای دو عیار سیمان ۳۱۰ و ۲۸۰ Kg/m<sup>3</sup> دارند، مربوط به نسبت درشت دانه به ریزدانه شماره ۱ است که نسبت های مربوط به دو مخلوط در جدول ۷ و مشخصات نمونه های تعیین طرح اختلاط در جدول ۶ نشان داده شده است.

#### ۳-۴ آزمایش مقاومت فشاری بر مخلوط بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی

پیش بینی می شد که رفتار مخلوط های بتنی در قبال جایگزینی سنگدانه های خرده آسفالت بازیافتی با کاهش مقاومت فشاری

می داند. از این روی شرط لازم برای این که یک مخلوط بتن غلتکی دارای خرده آسفالت بازیافتی پذیرش شود، علاوه بر روانی مطلوب، مقدار حداقل مقاومت فشاری فوق الذکر است.

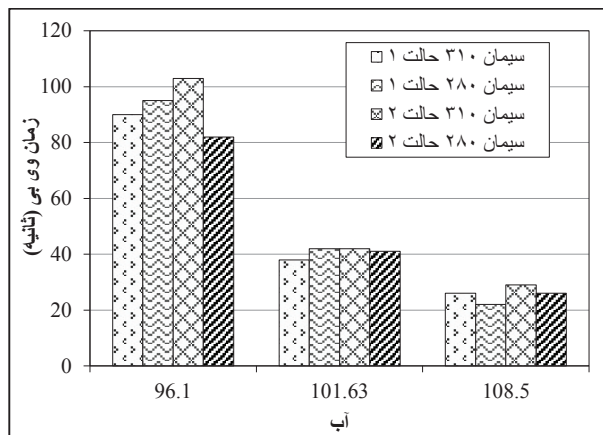
#### ۲-۴ نسبت های اختلاط مخلوط پایه

روش تعیین نسبت های اختلاط برای این تحقیق روش طرح اختلاط با استفاده از آزمایش روانی بتن است [ACI 211, 2002]. به این منظور دو نسبت مختلف درشت دانه به ریزدانه (جدول ۵) و نیز دو مقاومت طراحی ۲۸ روزه ۵۰۰۰ و ۶۰۰۰ psi (۳۵ و ۴۰ Mpa) در نظر گرفته شد و محاسبات نسبت های اختلاط برای هر چهار حالت انجام پذیرفت. در اشکال ۵ و ۶ روند انتخاب مخلوط شاهد از دو نسبت

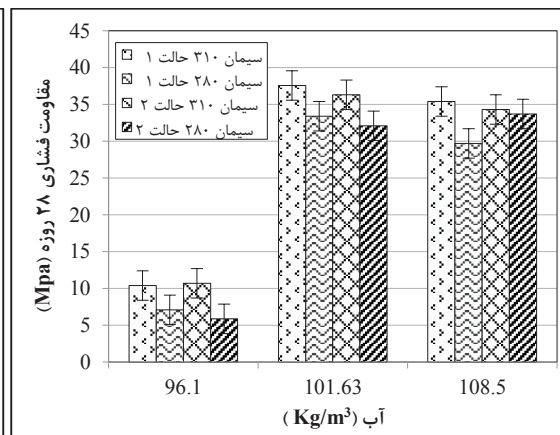
محمد کریمی گوغری، ابوالفضل حسنی، تقی صفرنیا کپته

جدول ۵. نسبت های درشت دانه به ریزدانه مورد استفاده در تعیین نسبت های اختلاط

No. CA/FA	درصد درشت دانه	درصد ریزدانه
۱	۵۳/۲	۴۶/۶
۲	۵۹/۳	۴۰/۷



شکل ۶. زمان وی بی در مقادیر مختلف آب (طرح اختلاط)



شکل ۵. مقاومت فشاری ۲۸ روزه در مقادیر مختلف آب (طرح اختلاط)



شکل ۷. نمونه هایی از انتقال ترک به دور سنگدانه های خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی

همراه باشد، چرا که لایه نازک قیر به دور سنگدانه‌ها اثر چسبندگی سطح سنگدانه‌ها به ملات سیمان را کاهش داده و باعث انتقال ترک به دور سنگدانه شده (شکل ۷) و این امر عملاً مقاومت این نوع سنگدانه‌ها را از چرخه مقاومتی مخلوط خارج می‌کند، به علاوه اینکه خود سنگدانه خرده آسفالت بازیافتی که

مجموعه به هم چسبیده‌ای از سنگدانه‌ها به واسطه قیر است، مقاومت کمی دارد. نمونه های حاوی RAP در سه حالت استفاده (جدول ۸) و درصدهای حجمی مختلف جایگزینی خرده آسفالت بازیافتی ساخته شد و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری مورد آزمایش مقاومت

مجموعه به هم چسبیده‌ای از سنگدانه‌ها به واسطه قیر است، مقاومت کمی دارد. نمونه های حاوی RAP در سه حالت استفاده (جدول ۸) و درصدهای حجمی مختلف جایگزینی خرده آسفالت بازیافتی ساخته شد و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری مورد آزمایش مقاومت

ارائه مدل رگرسیون خطی جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی ...

جدول ۶. مشخصات نمونه های تعیین نسبت های اختلاط به همراه نتایج زمان وی بی و مقاومت فشاری

نام نمونه	حالت دانه بندی	سیمان (Kg/m <sup>3</sup> )	آب (Kg/m <sup>3</sup> )	W/C	زمان وی بی (ثانیه)	شماره نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	میانگین مقاومت فشاری (Mpa)
A <sub>1</sub>	۱	۳۱۰	۹۶/۱	۰/۳۱	۹۰	۱	۱۱/۳	۱۰/۴
						۲	۱۲/۱	
						۳	۷/۸	
A <sub>2</sub>	۱	۳۱۰	۱۰۱/۶۳	۰/۳۲	۴۸	۱	۳۶/۴	۳۷/۶
						۲	۳۷/۹	
						۳	۳۸/۵	
A <sub>3</sub>	۱	۳۱۰	۱۰۸/۵	۰/۳۵	۳۶	۱	۳۷/۱	۳۵/۴
						۲	۳۳/۲	
						۳	۳۵/۹	
A <sub>4</sub>	۱	۲۸۰	۹۶/۱	۰/۳۴	۹۵	۱	۶/۳	۷/۱
						۲	۷/۳	
						۳	۷/۷	
A <sub>5</sub>	۱	۲۸۰	۱۰۱/۶۳	۰/۳۶	۵۲	۱	۳۳/۲	۳۳/۴
						۲	۳۱/۴	
						۳	۳۵/۶	
A <sub>6</sub>	۱	۲۸۰	۱۰۸/۵	۰/۳۸	۳۲	۱	۲۸/۶	۲۹/۷
						۲	۳۰/۸	
						۳	۲۹/۷	
A <sub>7</sub>	۲	۳۱۰	۹۶/۱	۰/۳۱	۱۰۳	۱	۱۲/۷	۱۰/۷
						۲	۸/۱	
						۳	۱۱/۳	
A <sub>8</sub>	۲	۳۱۰	۱۰۱/۶۳	۰/۳۲	۴۲	۱	۳۴/۴	۳۶/۳
						۲	۳۶/۴	
						۳	۳۸/۱	
A <sub>9</sub>	۲	۳۱۰	۱۰۸/۵	۰/۳۵	۲۹	۱	۳۶/۱	۳۴/۳
						۲	۳۳/۲	
						۳	۳۳/۶	
A <sub>10</sub>	۲	۲۸۰	۹۶/۱	۰/۳۴	۸۲	۱	۵/۶	۵/۹
						۲	۶/۴	
						۳	۵/۷	
A <sub>11</sub>	۲	۲۸۰	۱۰۱/۶۳	۰/۳۶	۵۱	۱	۳۳/۴	۳۲/۱
						۲	۳۰/۵	
						۳	۳۲/۴	
A <sub>12</sub>	۲	۲۸۰	۱۰۸/۵	۰/۳۸	۳۶	۱	۳۲/۱	۳۳/۷
						۲	۳۵/۴	
						۳	۳۳/۶	

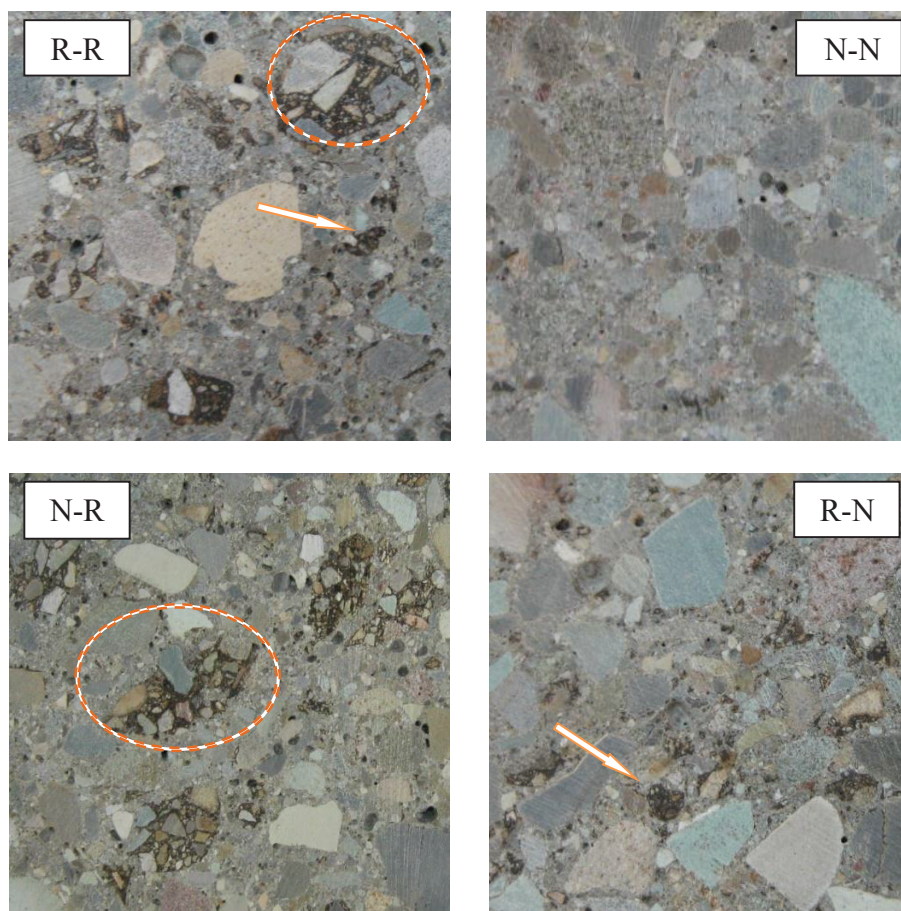
محمد کریمی گوغری، ابوالفضل حسنی، تقی صفرنیا کپته

جدول ۷. نسبت های اختلاط منتخب برای مخلوط های مینا

شماره نسبت اختلاط	مقاومت طراحی (Mpa)	سیمان (Kg/m <sup>3</sup> )	آب (Kg/m <sup>3</sup> )	W/C	ریزدانه (Kg/m <sup>3</sup> )	درشت دانه (Kg/m <sup>3</sup> )
۱	۴۰	۳۱۰	۱۰۱/۶۳	۰/۳۲	۹۵۲	۱۰۸۴
۲	۳۵	۲۸۰	۱۰۱/۶۳	۰/۳۶	۹۵۲	۱۰۸۴

جدول ۸. معرفی علائم اختصاری (حالت استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در فاز ریزدانه و یا درشت دانه مخلوط)

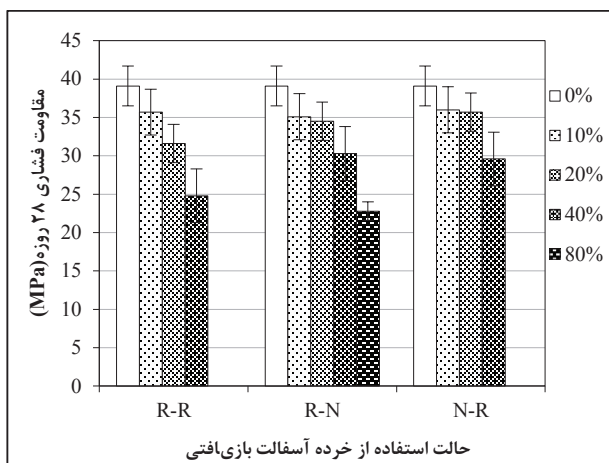
علائم اختصاری	ریزدانه	درشت دانه
N-N	طبیعی	طبیعی
R-R	خرده آسفالت بازیافتی	خرده آسفالت بازیافتی
R-N	خرده آسفالت بازیافتی	طبیعی
N-R	طبیعی	خرده آسفالت بازیافتی



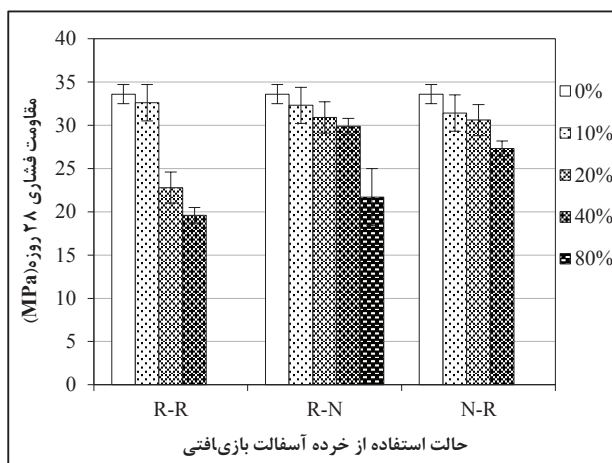
شکل ۸. برش داخلی نمونه های بتن غلتکی در نمونه شاهد و سه حالت جایگزینی خرده آسفالت بازیافتی



ارائه مدل رگرسیون خطی جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی ...



شکل ۱۰. مقاومت فشاری ۲۸ روزه در درصد‌های مختلف خرده آسفالت بازیافتی برای نسبت اختلاط شماره ۲



شکل ۹. مقاومت فشاری ۲۸ روزه در درصد‌های مختلف خرده آسفالت بازیافتی برای نسبت اختلاط شماره ۱

#### ۲-۵ کنترل پیش بینی معادلات رگرسیونی

به منظور مشاهده عملی پیش بینی‌ها، تعداد ۲۷ نمونه جدید با مقادیر درصد خرده آسفالت بازیافتی پیش‌بینی شده و با استفاده از نوع دیگری از خرده آسفالت بازیافتی (RAP II) ساخته شد (جدول ۱۴ و ۱۵). شکل ۱۱ و ۱۲ درصد فراوانی خطای این آزمایش‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که از نمودارها مشاهده می‌شود، به ترتیب ۹۰٪ و ۶۱٪ نتایج آزمون مربوط به RAP I و RAP II کمتر از ۱۰٪ را نشان داده‌اند که موید اعتبار مناسب پیش بینی مدل هاست.

از نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی RAP II می‌توان متوجه شد که جنس RAP، درصد قیر و جنس قیر موجود در آن تاثیر چندانی بر مقاومت فشاری کامپوزیت به وجود آمده نداشته است.

#### ۶. نتیجه گیری

همان‌گونه که شرح داده شد، هدف از این تحقیق ارائه مدل‌های مناسب جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط‌های بتن غلتکی روسازی بوده است، به این منظور نمونه‌های بتن غلتکی حاوی خرده آسفالت بازیافتی با دو نسبت اختلاط (مقاومت طراحی) مختلف و درسه نوع جایگزینی سنگدانه‌های خرده آسفالت بازیافتی و نیز با درصد‌های مختلف خرده آسفالت بازیافتی ساخته و پس از ۲۸ روز عمل‌آوری تحت

فشاری قرار گرفتند (شکل ۸).

نتایج حاصل از آزمایش مقاومت فشاری ۲۸ روزه و زمان وی‌بی برای این نمونه‌ها به شرح اشکال ۹ و ۱۰ و جداول ۹ و ۱۰ است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، با افزایش استفاده از خرده آسفالت بازیافتی، مقاومت فشاری کاهش می‌یابد.

#### ۵. ارائه مدل پیش بینی درصد‌های مجاز

#### ۱-۵ تشکیل معادلات رگرسیون خطی و تعیین درصد‌های مجاز

پس از حصول نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری معادلات رگرسیونی به منظور تعیین درصد‌های مجاز و پیش بینی رفتار این نوع مخلوط‌ها در شرایط مقاومت طراحی مبنای متفاوت تشکیل شد (جدول ۱۱).

طبق توصیه ACI 325 که حداقل مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط بتن غلتکی روسازی را ۲۷/۶ مگاپاسکال (psi ۴۰۰۰) معرفی کرده است. معادلات رگرسیون دو متغیره فوق را با جایگزینی مقدار ۲۷/۶ مگاپاسکال در متغیر Cs مجدداً بازنویسی کرده و به این ترتیب متغیر درصد خرده آسفالت بازیافتی، معرف حداکثر درصد مجاز خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی شد که در جدول ۱۲ با علامت اختصاری MPRAP I نشان داده شده است.

محمد کریمی گوغری، ابوالفضل حسنی، تقی صفرنیا کپته

جدول ۹. نتایج مرحله اول تاثیر خرده آسفالت بازیافتی بر بتن غلظتی (نسبت اختلاط شماره ۱)

نام نمونه	شماره نسبت اختلاط	حالت استفاده از خرده آسفالت بازیافتی	درصد حجمی جایگزینی خرده آسفالت بازیافتی	زمان وی بی (ثانیه)	شماره نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	میانگین مقاومت فشاری (Mpa)
B <sub>1</sub>	۱	شاهد	-	۴۷	۱	۳۶/۵	۳۹/۱
					۲	۴۱/۴	
					۳	۳۹/۴	
B <sub>2</sub>	۱	R-R	۱۰	۴۸	۱	۳۷/۱	۳۵/۷
					۲	۳۳/۹	
					۳	۳۶/۲	
B <sub>3</sub>	۱	R-R	۲۰	۴۲	۱	۳۱/۸	۳۱/۶
					۲	۲۹/۳	
					۳	۳۳/۷	
B <sub>4</sub>	۱	R-R	۴۰	۴۰	۱	۲۳/۵	۲۴/۸
					۲	۲۵/۲	
					۳	۲۵/۸	
B <sub>5</sub>	۱	R-N	۱۰	۴۶	۱	۳۰/۱	۳۵/۱
					۲	۳۸/۴	
					۳	۳۶/۷	
B <sub>6</sub>	۱	R-N	۲۰	۴۶	۱	۳۸/۲	۳۴/۵
					۲	۳۱/۶	
					۳	۳۳/۷	
B <sub>7</sub>	۱	R-N	۴۰	۴۷	۱	۳۴/۳	۳۰/۳
					۲	۲۷/۵	
					۳	۲۹/۲	
B <sub>8</sub>	۱	R-N	۸۰	۴۲	۱	۲۲/۹	۲۲/۸
					۲	۲۲/۲	
					۳	۲۳/۴	
B <sub>9</sub>	۱	N-R	۱۰	۵۰	۱	۳۸/۳	۳۶/۰
					۲	۳۷/۷	
					۳	۳۲/۱	
B <sub>10</sub>	۱	N-R	۲۰	۴۵	۱	۳۴/۵	۳۵/۷
					۲	۳۷/۶	
					۳	۳۵/۲	
B <sub>11</sub>	۱	N-R	۴۰	۴۶	۱	۲۵/۵	۲۹/۶
					۲	۳۳/۳	
					۳	۳۰/۲	

ارائه مدل رگرسیون خطی جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی ...

جدول ۱۰. نتایج مرحله اول تاثیر خرده آسفالت بازیافتی بر بتن غلتکی (نسبت اختلاط شماره ۲)

نام نمونه	شماره نسبت اختلاط	حالت استفاده از خرده آسفالت بازیافتی	درصد حجمی جایگزینی خرده آسفالت بازیافتی	زمان وی بی (ثانیه)	شماره نمونه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)	میانگین مقاومت فشاری (Mpa)
					۱	۳۳/۷	
B <sub>12</sub>	۲	شاهد	-	۵۲	۲	۳۲/۴	۳۳/۶
					۳	۳۴/۷	
					۱	۳۲/۲	
B <sub>13</sub>	۲	R-R	۱۰	۵۰	۲	۳۳/۷	۳۲/۶
					۳	۳۱/۹	
					۱	۲۱/۸	
B <sub>14</sub>	۲	R-R	۲۰	۴۶	۲	۲۳/۴	۲۲/۸
					۳	۲۳/۲	
					۱	۱۸/۶	
B <sub>15</sub>	۲	R-R	۴۰	۴۷	۲	۲۰/۵	۱۹/۶
					۳	۱۹/۷	
					۱	۳۱/۰	
B <sub>16</sub>	۲	R-N	۱۰	۵۳	۲	۳۴/۲	۳۲/۳
					۳	۳۱/۷	
					۱	۳۲/۸	
B <sub>17</sub>	۲	R-N	۲۰	۵۱	۲	۲۹/۷	۳۰/۹
					۳	۳۰/۲	
					۱	۲۷/۶	
B <sub>18</sub>	۲	R-N	۴۰	۴۷	۲	۳۳/۱	۲۹/۹
					۳	۲۹/۲	
					۱	۲۵/۰	
B <sub>19</sub>	۲	R-N	۸۰	۴۴	۲	۱۹/۰	۲۱/۷
					۳	۲۱/۳	
					۱	۳۰/۱	
B <sub>20</sub>	۲	N-R	۱۰	۵۳	۲	-	۳۱/۴
					۳	۳۲/۷	
					۱	۳۲/۱	
B <sub>21</sub>	۲	N-R	۲۰	۴۸	۲	۳۰/۴	۳۰/۶
					۳	۲۹/۳	
					۱	۲۷/۴	
B <sub>22</sub>	۲	N-R	۴۰	۴۹	۲	۲۶/۸	۲۷/۳
					۳	۲۷/۸	

محمد کریمی گوغری، ابوالفضل حسینی، تقی صفرنیا کپته

جدول ۱۱. معادلات رگرسیون خطی (دو متغیره)

F	t-value (Constant)	t-value (PRAP)	t-value (TCs)	R <sup>2</sup>	معادله رگرسیون خطی	حالت استفاده
13.871	-0.073	-4.505	2.729	0.902	$Cs = -1.022 - 0.377(PRAP) + 1.036(TCs)$	R-R
74.758	4.594	-11.938	2.644	0.955	$Cs = 22.871 - 0.166(PRAP) + 0.359(TCs)$	R-N
20.380	1.508	-4.808	4.200	0.931	$Cs = 9.614 - 0.184(PRAP) + 0.727(TCs)$	N-R

Cs = مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)

TCs = مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط مینا (Mpa)

PRAP = درصد حجمی خرده آسفالت بازیافتی

جدول ۱۲. معادلات پیش بینی درصد مجاز خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی

مقاومت مینا متناظر با درصد مجاز صفر (Mpa)	معادلات پیش بینی درصد مجاز RAP	حالت استفاده
۲۷/۶۲	$MPRAP = -75.92 + 2.748(TCs)$	R-R
۱۳/۱۸	$MPRAP = -28.48 + 2.16(TCs)$	R-N
۲۴/۷۴	$MPRAP = -97.75 + 3.95(TCs)$	N-R

MPRAP = حداکثر درصد مجاز خرده آسفالت بازیافتی

TCs = مقاومت فشاری ۲۸ روزه مخلوط مینا

جدول ۱۳. حداکثر درصد مجاز خرده آسفالت بازیافتی

N-R		R-N		R-R		حالت استفاده
۲	۱	۲	۱	۲	۱	شماره نسبت اختلاط
۳۵	۵۰	۴۵	۵۰	۱۵	۳۰	حداکثر درصد مجاز RAP

۲- آزمون های آماری t و F مبین اعتبار قابل قبول برای ضرایب و معادلات بودند.

۳- کنترل پیش بینی انجام شده برای دو نوع خرده آسفالت بازیافتی نوع ۱ و ۲ ضمن اثبات اعتبار مدل های ارائه شده، حاکی از آن است که احتمالاً رفتار مخلوط بتن غلتکی در قبال استفاده از انواع گوناگون خرده آسفالت بازیافتی با درصدهای قیر و جنس قیر متفاوت تقریباً یکسان است.

آزمایش مقاومت فشاری تک محوری قرار گرفتند نهایتاً نتایج حاصل از این آزمایشها مبنای ساخت مدل های رگرسیون خطی قرار گرفت که بر این اساس می توان به نتایج زیر اشاره کرد:

۱- روابطی با R-square قابل قبول جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی در مخلوط بتن غلتکی در هر حالت استفاده (تنها در ریزدانه، تنها در درشت دانه و یا ترکیبی از هر دو) برای مقاومت های طراحی مختلف ارائه شد.

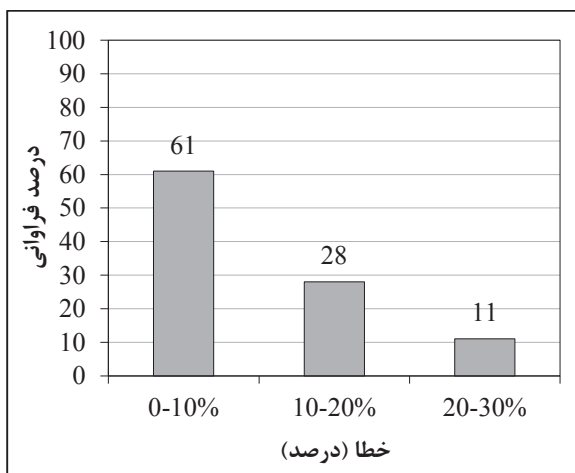
ارائه مدل رگرسیون خطی جهت پیش بینی درصد مجاز استفاده از خرده آسفالت بازیافتی ...

جدول ۱۴. نتایج کنترل پیش بینی (استفاده از خرده آسفالت نوع اول)

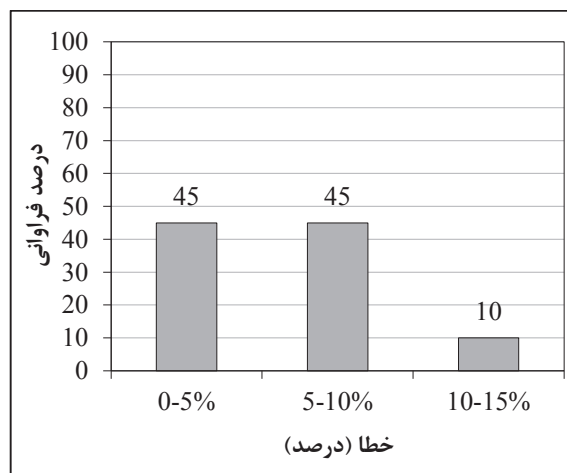
مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)		
C <sub>3</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>1</sub>
%۵۰N-R	%۵۰R-N	%۳۰R-R
۲۶	۲۳/۵	۲۶/۹
۲۸/۹	۲۵/۲	۲۸/۱
۲۵/۸	۲۶/۸	۲۵/۳

جدول ۱۵. نتایج کنترل پیش بینی (استفاده از خرده آسفالت نوع دوم RAP II)

مقاومت فشاری ۲۸ روزه (Mpa)					
نسبت اختلاط ۲			نسبت اختلاط ۱		
C <sub>9</sub>	C <sub>8</sub>	C <sub>7</sub>	C <sub>6</sub>	C <sub>5</sub>	C <sub>4</sub>
%۳۵N-R	%۴۵R-N	%۱۵R-R	%۵۰N-R	%۵۰R-N	%۳۰R-R
۲۴/۲	۲۸/۴	۲۷/۱	۲۰/۶	۲۸/۶	۲۲/۱
۲۸/۲	۲۹/۵	۲۵/۹	۲۴/۱	۲۷/۲	۲۳/۴
۲۵/۱	۲۸/۹	۲۶/۴	۲۱/۷	۲۹/۱	۲۵/۶



شکل ۱۲. نمودار درصد فراوانی خطای نتایج کنترل پیش بینی (استفاده از RAP II)



شکل ۱۱. نمودار درصد فراوانی خطای نتایج کنترل پیش بینی (استفاده از RAP I)

-De Montreal Ville (2002) "Beton Compacte au Rouleau (BCR) "Service de l Environnement , DE LA Division Des Laboratoires, BCR.

-Huang, Baoshan and ShuXiang, LitGuoqiang (2005) "Laboratory investigation of Portland cement concrete containing recycled asphalt pavements", Cement and Concrete Research, 35 2008 – 2013.

۷. پی نوشت

1- Maximum Percentage of RAP

۸. مراجع

-عامری، شهمیری(۱۳۸۸) "بررسی تاثیر استفاده از سرباره کنورتور ذوب آهن اصفهان به عنوان جایگزین سنگدانه بر بتن غلتکی روسازی راه"، هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، ایران، شیراز، دانشگاه شیراز، اردیبهشت.

-Al AbdulWahhabhi, HI (1999) "Optimization of roller compacted concrete for local application", Transportation Research Record, No. 1458, pp. 1-7.

-ACI Committee 211(2002) "Guide for selecting proportions for no-slump concrete", American Concrete Institute, , ACI 211.3R-02.

-ACI Committee 325 (1995) "Report on roller compacted concrete pavement ", American Concrete Institute, pp.3-15,

-ASTM 39/C 39M – 03, (2003) "Standard practice for compressive strength of cylindrical concrete specimens", USA: ASTM

-ASTM C1170 – 91, (1998) "Standard test methods for determining consistency and density of roller-compacted concrete using a vibrating table", USA: ASTM

-ASTM C1176 - 92, (1992) "standard practice for making roller-compacted concrete in cylinder molds using a vibrating table".

-CourardLuc, Frédéric Michel and Pascal, Delhez (2010) "Use of concrete road recycled aggregates for roller compacted concrete", Journal Construction and Building Materials, 24 pp. 390–395'.

-Debieb, Farid, Courard, Luc, Kenai, Said and Degeimbre, Robert (2009) "Roller compacted concrete with contaminated recycled aggregates", Construction and Building Materials, 23 pp.3382–3387.