

ارائه مدل دوفازی خمیر - دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبکدانه حاوی لیکا

امیر مازیار رئیس قاسمی^{۱*}، طیبه پرهیزکار^۲، هرمز فامیلی^۳

۱- پژوهشگر بخش بتن، مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

۲- استادیار مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن

۳- استادیار دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران

raaisghasemi@yahoo.com

تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۲/۲۰

تاریخ دریافت: ۱۳۸۶/۱۱/۱۶

چکیده- به طور کلی، روش طرح اختلاط بتن‌های سبکدانه تفاوت چندانی با بتن معمولی ندارد جز آن‌که باید از روش حجمی برای تعیین مقدار سبکدانه و سنگدانه‌های معمولی استفاده کرد. در برخی کشورها از همان روش طرح بتن‌های معمولی، استفاده می‌شود. به‌خاطر محدودیت‌هایی که این روش‌ها دارند کاربرد آن‌ها در مواردی که به بتنی با روانی مشخص، با مقاومت زیاد و یا بتن توانمند نیاز باشد، با مشکل مواجه می‌شود.

در این مقاله، روشی جدید برای طرح اختلاط بتن سبکدانه که با استفاده از یک نوع سبکدانه مصنوعی (رس منبسط شده، Leca) ساخته می‌شود، پیشنهاد شده است. این روش براساس مدل دوفازی (خمیر و دانه) است و به‌دلیل امکان در نظر گرفتن خواص خمیر سیمان و دانه، بتن ساخته شده از نظر دستیابی به روانی (اسلامپ) و مقاومت فشاری مورد نظر، نسبت به روش‌های دیگر عملکرد بهتری دارد؛ هم‌چنین در این روش، درصد ترکیب سنگدانه‌های طبیعی و سبک برای دستیابی به کمترین فضای خالی انتخاب می‌شود، بنابراین از کمترین خمیر سیمان برای دستیابی به الزامات بالا استفاده شده و از نظر اقتصادی نیز صرفه‌جویی می‌شود.

کلیدواژگان: بتن سبکدانه، رس منبسط‌شده، سبکدانه، قیف جریان، خمیر سیمان

۱- مقدمه

به‌طور کلی بتن‌های سبک‌دانه دارای جرم حجمی حدود ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ kg/m³، مقاومت فشاری (مکعبی) ۱ تا بیش از ۶۰ مگاپاسکال و ضریب هدایت حرارتی ۰/۱ تا ۰/۱۰ w/m²k است [۴]. معمول‌ترین روش برای کاهش جرم حجمی بتن (به‌ویژه بتن سازه‌ای)، جایگزین کردن قسمتی از سنگدانه‌های معمولی (با وزن معمولی) با سنگدانه‌های

تاریخچه کاربرد سبکدانه‌ها در مصالح ساختمانی، به قبل از میلاد برمی‌گردد، اما از قرن ۱۸ و ۱۹، کاربرد انواع سبکدانه (به ویژه سبکدانه‌های مصنوعی) در بتن توسعه یافت [۱ و ۲]. در بسیاری از آیین‌نامه‌ها، بتن سبک‌دانه به بتنی با جرم حجمی خشک کمتر از ۲۰۰۰ kg/m³ اطلاق می‌شود [۳].

که می‌تواند در خواص بتن‌های تازه و سخت شده مؤثر باشد [۸ و ۹ و ۱۰].

در یکی از تحقیقات انجام شده [۱۱ و ۱۲] امکان کاربرد مدل خمیر-دانه^۱ (PM) برای بتن‌های سبکدانه بررسی شده است. در این مدل، بتن تازه متشکل از دو فاز خمیر^۲ و دانه^۳ در نظر گرفته می‌شود، و براساس خواص هر یک از فازها، رابطه‌ای که بیانگر تأثیر هر یک از آن‌ها در ایجاد روانی و کارایی می‌باشد، ارائه می‌شود.

۲- مدل خمیر-دانه

کارایی بتن تحت تأثیر خصوصیات ذاتی مواد تشکیل دهنده، نسبت اختلاط آن‌ها و آندرکنش شیمیایی و فیزیکی آن‌ها است. ساده‌ترین راه مدل کردن چنین سیستم پیچیده‌ای، آن است که بتن تازه را به شکل یک ماده دوفازی در نظر گرفت. «فاز خمیر» یا «فاز مواد روان» که شامل آب، مواد افزودنی شیمیایی و مواد پودری ریزتر از ۰/۱۲۵ میلی‌متر (که شامل سیمان و مواد پوزولانی هم است) و «فاز دانه» یا «مواد دارای اصطکاک» که شامل سنگدانه‌های بزرگتر از ۰/۱۲۵ میلی‌متر است.

هدف اصلی این مدل، تشریح و تعیین خصوصیات هر یک از فازها و سپس ارائه مدلی برای تعیین اثر این خواص روی کارایی بتن تازه [در حالتی که این فازها با نسبت‌های مختلف با یکدیگر مخلوط می‌شوند]، است. «خواص خمیر» با پارامتر نسبت مقاومت در برابر جریان (λ_D) و «خواص دانه» با پارامتر مدول فضای خالی ذرات (H_m)، تعریف می‌شود.

سبک است. برای ساخت بتن‌های پرمقاومت معمولاً نسبت آب به سیمان را، به کم‌تر از ۰/۴۵ کاهش می‌دهند. طبق ACI 318 بتن پرمقاومت حاوی سبکدانه دارای مقاومت فشاری استوانه‌ای بیش از ۳۵ MPa است. از آنجا که کنترل نسبت آب به سیمان در بتن‌های سبکدانه مشکل است، در اغلب موارد، بتن سبکدانه را با عیار سیمان و اسلامپ رده‌بندی می‌کنند [۵].

براساس توصیه ACI 213، برای دستیابی به مقاومت‌های بیش از ۳۵ MPa مصرف ۴۰۰ تا ۵۰۰ Kg/m³ سیمان توصیه می‌شود؛ هم‌چنین این منبع مصرف سیمان بیش از ۶۰۰ Kg/m³ را برای کسب مقاومت‌های زیاد پیش‌بینی کرده است. در حالت عادی بتن سبکدانه دارای مقاومت فشاری ۲۱ تا ۲۸ مگاپاسکال است که می‌توان با تمهیداتی آن را افزایش داد [۶]. به‌طور کلی برای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن‌های سبکدانه توانمند، روشی که بتواند تأثیر خواص انواع سبکدانه را در نظر گرفته و امکان دستیابی به الزامات مورد نظر (کارایی و مقاومت) را داشته‌باشد، وجود ندارد. در بیش‌تر موارد برای طرح مخلوط بتن‌های سبکدانه از روش‌های موجود برای بتن‌های معمولی استفاده می‌شود. تنها روشی که برای طرح مخلوط بتن‌های سبکدانه وجود دارد روش ارائه شده به‌وسیله کمیته ACI 211-2 است. این روش هم از این لحاظ که نوع و خواص سبکدانه را در نظر نمی‌گیرد هم به دلیل توجه نکردن به رویکرد جهانی برای کاربرد بتن‌های توانمند سبکدانه، دارای محدودیت‌هایی است [۷].

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی برای ارائه روشی جدید برای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن‌های سبکدانه انجام و سعی شده است که تأثیر ویژگی‌های انواع سبکدانه‌ها تا حد ممکن در آن لحاظ شود. از مهم‌ترین پارامترهای مؤثر، شکل دانه‌ها و جذب آب زیاد آن‌ها است

1- PM Model
2- Matrix
3- Particle

۲-۱- نسبت مقاومت در برابر جریان (λ_Q)

نسبت مقاومت در برابر جریان به وسیله‌ی یک قیف مخصوص (قیف جریان) اندازه‌گیری می‌شود. این قیف از استوانه‌ای فلزی که انتهای آن به یک قیف متصل است، ساخته شده است. قطر قسمت استوانه‌ای ۸۰ میلی‌متر و قطر قسمت خروجی قیف ۸ میلی‌متر است (شکل ۱).



شکل (۱) قیف جریان برای تعیین مقاومت در برابر جریان خمیر (λ_Q)

قیف به شکل عمودی روی یک پایه نصب می‌شود. خمیر تا ارتفاع ۴۰۰ میلی‌متر داخل استوانه ریخته شده و سپس دبی خروجی خمیر روان از قیف جریان تعیین می‌شود. از آنجایی که جریان ماده به فشار موجود در خروجی که تابعی از ارتفاع ماده موجود در استوانه است بستگی دارد؛ سطح معینی از ماده موجود در قیف جریان که بیانگر میانگین جریان است، در محاسبات در نظر گرفته می‌شود.

Mortsell [۱۲] با استفاده از دستگاه قیف جریان و انجام آزمایش‌های مکرر روی خمیر سیمان، آب خالص، گلیسیرین و روغن‌های معدنی و مصنوعی نشان داد، نتایج به‌دست آمده (λ_Q) دارای تکرارپذیری کاملاً مشابه و قابل اعتماد است و این پارامتر تشابه نزدیکی با لزجت مایع

نیوتنی دارد.

جریان یک مایع ایده‌آل فقط تحت اثر نیروی جاذبه قرار می‌گیرد؛ به این معنی که مقاومت داخلی و چسبندگی یا اصطکاک خارجی روی جریان مایع ایده‌آل اثر نمی‌گذارد. بنابراین می‌توان شدت جریان یک مایع واقعی را به وسیله‌ی اختلاف بین شدت جریان تئوریک مایع ایده‌آل (Q_i) و شدت جریان مایع تحت آزمایش (Q_h) مشخص کرد. این اختلاف (Q_t) بیانگر جمع خصوصیات رئولوژیکی مایع آزمایش شده، است.

$$Q_t = Q_i - Q_h \quad (1)$$

بر این اساس و با توجه به مشخصات مایع ایده‌آل می‌توان شدت جریان آن را از حاصل ضرب سرعت خروج مایع در سطح مقطع خروجی محاسبه کرد.

$$Q_i = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{(d/D)^4 + 1}} \quad (2)$$

g: شتاب ثقل زمین (متر بر مجذور ثانیه)؛

h: فاصله بین تراز سطح مایع درون استوانه و خروجی (متر)؛

d: قطر خروجی (متر)؛

D: قطر استوانه (متر).

شدت جریان مایع تحت آزمایش با جاگذاری رابطه (۲) در رابطه (۱)، به‌دست می‌آید:

$$Q_h = \frac{\pi d^2}{4} \sqrt{\frac{2gh}{(d/D)^4 + 1}} - Q_t \quad (3)$$

پس از انتگرال‌گیری بین تراز بالایی و پایینی، نسبت مقاومت در برابر جریان (λ_Q) به‌دست می‌آید. این نسبت بدون واحد بوده و بین صفر و یک متغیر است. صفر نشان دهنده یک مایع ایده‌آل و عدد یک، مایع با لزجت خیلی

زیاد تعریف می‌شود.

از ۰/۱۲۵ میلی‌متر)، وزن هر یک از بخش‌ها بر حسب نسبت حجمی که به کمک مدول نرمی اصلاح می‌شود، تشکیل شده است. در انتها با استفاده از پارامتر سنگدانه (T)، مدول فضای خالی به‌گونه‌ای اصلاح می‌شود که بیان‌کننده حجم خمیر متناظر برای انتقال از حالت بدون کارایی به کارایی کم باشد، رابطه مدول فضای خالی به شکل زیر ارائه شده است.

$$H_m = v_f (H_f / \sqrt{Fm_f} + T_f) + v_c (H_c / \sqrt{Fm_c} + T_c) \quad (4)$$

v_f و v_c : درصد حجمی ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها؛

H_f و H_c : نسبت فضای خالی ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها؛

T_f : پارامتر کالیبراسیون ریزدانه‌ها (ذرات بین ۴ تا ۰/۱۲۵ میلی‌متر)؛

T_c : پارامتر کالیبراسیون درشت‌دانه‌ها (ذرات بزرگ‌تر از ۴ میلی‌متر) و

Fm_f و Fm_c : مدول نرمی ریزدانه و درشت‌دانه.

۲-۳- تابع کارایی

بر اساس مدل خمیر-دانه، با ترکیب خمیر و دانه‌ای با ویژگی‌های مشخص، کارایی بتن به‌طور منحصر به‌فرد، تابعی از نسبت حجمی خمیر به دانه خواهد بود. مسئله‌ای که وجود دارد، تعریف روابط ریاضی برای بیان این وابستگی است. Mortsell از تابع تانژانت هیپربولیک (\tanh) جهت تعریف تابع کارایی استفاده کرد. این تابع به شکل نمودار «S» ظاهر می‌شود. در شکل ۶ نمونه‌ای از این تابع ارائه شده است که مقدار اسلامپ را برحسب حجم خمیر، نشان می‌دهد.

تابع کارایی (K_p) که به‌وسیله Mortsell ارائه شده به‌صورت زیر است [۱۲]:

$$K_p = (n-m) \cdot [\tanh(x)+1]/2 + m \quad (5)$$

۲-۲- مدول فضای خالی ذرات (H_m)

نسبت فضای خالی، چه در وضعیت متراکم و چه در حالت غیرمتراکم، به دانه‌بندی، شکل دانه‌ها (از نظر گوشه‌دار بودن، پولکی و سوزنی) و هم‌چنین بافت سطحی آن‌ها بستگی دارد. این پارامترها هم‌چنین بیان‌کننده تأثیر سنگدانه‌ها بر کارایی بتن است. اثر بخش ریزدانه‌ها (۴ mm - ۰/۱۲۵) بر کارایی، بیش‌تر از بخش درشت‌دانه‌ها (بزرگ‌تر از ۴ mm) است. این اثر با اعمال فاکتور اصلاح در تعریف مدول فضای خالی معرفی شده است.

نتایج تحقیقات [۱۱ و ۱۲] نشان می‌دهد، کارایی بتن را می‌توان به مازاد خمیر موجود در بتن، نسبت به حالت «بدون اسلامپ» نسبت داد. به‌عبارت دیگر به یک کمینه‌ی خمیری برای پوشاندن سطح دانه‌ها و اتصال آن‌ها به یکدیگر نیاز است، که در اصطلاح به این حالت، بتن «بدون اسلامپ»، گفته می‌شود. افزایش مقدار خمیر سبب افزایش میزان کارایی می‌شود.

اما Mortsell دریافت که تناسب پیچیده بیش‌تری بین نسبت فضای خالی فاز دانه‌ها و حجم خمیر در حالت «بدون اسلامپ» وجود دارد که احتمالاً به‌دلیل تغییرات محسوس در مشخصات اساسی سنگدانه ناشی از اندازه دانه‌ها است. از آن‌جا که کارایی بیش‌تر به سرعت زیاد برشی وابسته است تا به تراکم سیستم دانه‌ها، ممکن است مشخصات اساسی سنگدانه‌ها [که متأثر از تداخل دانه‌ها است]، اهمیت بیش‌تری در کارایی بتن داشته‌باشد، تا تراکم آن‌ها.

برای حل این مشکل Mortsell [۱۲] «مدول فضای خالی ذرات»، H_m را تعریف کرد که در آن نسبت فضای خالی ریزدانه و درشت‌دانه‌های بدون فیلر (ذرات کوچک‌تر

در حال حاضر، امکان تولید لیکا در رده‌های مختلف در ایران وجود دارد. این رده‌بندی بیش‌تر براساس جرم حجمی انبوهی غیرمترکم انجام می‌شود ولی با تغییر جرم حجمی، مقاومت در برابر خردشدگی، بافت سطحی، جذب آب و در برخی موارد شکل دانه‌ها نیز تغییر می‌کند [۱۳].

پارامترهای بالا که محصولات کارخانه‌های مختلف (داخلی و خارجی) بسته به مشخصات مصالح اولیه و روش تولید متغیر است می‌تواند سبب تغییر ضرایب ثابت تابع کارایی (K_p) و حتی عدم انطباق این مدل با آن نوع سبکدانه شود.

با توجه به موارد بالا و با هدف بررسی امکان کاربرد مدل خمیر-دانه، برای نمونه‌ای از لیکای سبک تولید شده در کشور (برای اولین بار در ایران)، این پژوهش انجام شد.

۳-۱- برنامه آزمایشگاهی

پارامترهای متغیر در این پژوهش، نوع فوق روان‌کننده و فیلر و همچنین نسبت آب به سیمان است و نوع سیمان، سبکدانه و سنگدانه ریز، ثابت در نظر گرفته شده است. در بخش اول، مشخصات سبکدانه، فیلر و سیمان تعیین شد، در بخش دوم، برای انتخاب خمیر مناسب (از نظر مقاومت در برابر جریان و مقاومت) و تعیین مشخصات مورد نیاز، تعدادی مخلوط خمیر ساخته و بررسی شد. هم‌چنین برای تعیین مدول فضای خالی ذرات، براساس تئوری فولر نسبت اختلاط ترکیب سبکدانه و سنگدانه ریز، انتخاب و سپس پارامترهای مورد نیاز محاسبه شد. در بخش سوم، برای تعیین ضرایب ثابت تابع کارایی و کالیبره کردن مدل، تعدادی مخلوط بتن ساخته و خواص بتن تازه و سخت‌شده به‌دست آمد.

m, n : به ترتیب مقادیر حد بالا و پایین کارایی (اسلامپ) است و x : متغیر تابع که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود:

$$x = \alpha (2.F_p - 1 - \beta) \quad (6)$$

F_p : حجم خمیر؛

α : ضریب شیب تابع کارایی، طبق رابطه (۷) و

β : پارامتر مربوط به حالت «بدون اسلامپ» طبق رابطه (۸).

$$\alpha = K_1 \cdot e^{-K_2 \lambda Q} \quad (7)$$

λQ : نسبت مقاومت جریان .

K_1 و K_2 : ضرایب ثابت که از طریق تحلیل رگرسیون یک سری داده به‌دست می‌آید.

$$\beta = 2.H_m - 1 + 1/\alpha \quad (8)$$

H_m : مدول فضای خالی ذرات.

همان‌گونه که می‌بینید، تندی شیب تابع کارایی، به خواص خمیر بستگی دارد و حالت «بدون اسلامپ» به خواص هر دو فاز (خمیر و دانه) وابسته است. بر این اساس می‌توان اظهار داشت که حجم بیش‌تری از یک خمیر با لزجت خیلی زیاد در مقایسه با یک خمیر با لزجت کمتر، نیاز است تا بتن با کارایی اولیه «بدون اسلامپ» ساخته‌شود و افزایش حجم خمیر با لزجت زیاد اثر کمتری روی مقدار اسلامپ دارد.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

در این مقاله بخشی از نتایج مطالعات انجام شده در خصوص کاربرد مدل خمیر-دانه برای نمونه‌ای از لیکای تولید کشور ارائه شده است. در این مقاله به بررسی امکان کاربرد این مدل برای لیکای رده Leca 250 (با جرم حجمی انبوهی 250 kg/m^3) پرداخته شده است.

۳-۲- مشخصات مواد و مصالح

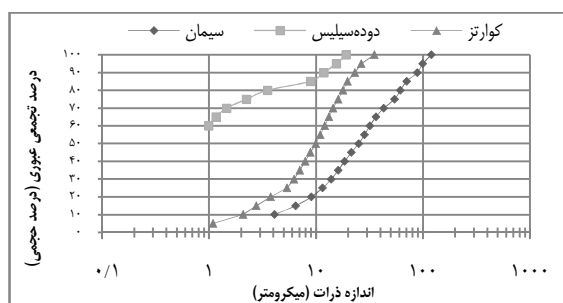
سیمان: سیمان استفاده شده سیمان نوع ۱ بوده که از کارخانه سیمان تهران تهیه شده است. در جدول ۱ مشخصات شیمیایی و مکانیکی آن که طبق استانداردهای ملی ایران آزمایش شده، را می بینید.

جدول (۱) خواص سیمان نوع ۱ مصرفی

خواص شیمیایی	نتایج آزمون
% SiO ₂	۱۹/۹۴
% Al ₂ O ₃	۴/۱۲
% Fe ₂ O ₃	۴/۰۸
% MgO	۴/۲۵
% CaO	۶۰/۱۵
% SO ₃	۲/۰۳
افت ناشی از سرخ شدن %	۴/۱۰
باقی مانده نامحلول %	۰/۷۰
خواص مکانیکی	نتایج آزمون
مقاومت فشاری ۲۸ روزه kg/cm ²	۴۱۰

می شود)، بررسی شد (جدول ۲).
فیلر: فیلرهای استفاده شده در این پژوهش، شامل یک نوع پودر کوارتز میکرونیزه [دارای دانه بندی مشابه سیمان]، یک نمونه ماسه سیلیسی [با محدوده دانه بندی ۰/۱۵-۰/۰۵ میلی متر] و یک نمونه دوده سیلیس است. در شکل ۲ منحنی دانه بندی ارائه شده است. در این پروژه هدف از کاربرد دوده سیلیس بیش تر خاصیت پُرکنندگی و ایجاد چسبندگی در خمیر سیمان است و خواص پوزولانی آن در درجه دوم اهمیت قرار دارد.

سنگدانه: سنگدانه های مورد استفاده شده از نظر وزنی به دو گروه سنگدانه های با وزن معمولی (وزن مخصوص بیش تر از ۲ g/cm³) و سبک دانه (وزن مخصوص کمتر از ۲ g/cm³) تقسیم می شوند.



شکل (۲) منحنی دانه بندی انواع فیلر، دوده سیلیس و مقایسه آن با دانه بندی سیمان مصرفی

مواد افزودنی شیمیایی: با توجه به تنوع زیاد مواد افزودنی شیمیایی از نظر نوع و نام های تجاری، دو نوع فوق روان کننده (یک نوع فوق روان کننده نسل جدید، بر پایه کربوکسیلیک، که به صورت اختصاری با G نشان داده می شود و یک نوع فوق روان کننده نسل قدیم بر پایه لیگنوسولفونات که به صورت اختصاری با R نشان داده

جدول (۲) مشخصات فیزیکی، شیمیایی و محدوده مصرف توصیه شده مواد افزودنی فوق روان کننده

نام افزودنی	رنگ	وزن مخصوص، kg/m ³	pH	کلرید %	درصد مصرف (نسبت به وزن سیمان)
G	قهوه ای روشن	۱/۰۶ تا ۱/۰۸	۶/۶	۰	۱/۵ تا ۰/۵
R	قهوه ای	۱/۱۹۵ تا ۱/۲	-	۰	۱/۸ تا ۰/۳

جدول (۳) وزن مخصوص و جذب آب ماسه

وزن مخصوص در حالت SSD (g/cm ³)	وزن مخصوص خشک (g/cm ³)	جذب آب تا حالت SSD (%)	عبوری از الک ۷۵ میکرون (%)
۲/۵۶	۲/۴۹	۳/۲۲	۱/۸۶

را در جدول ۴ می‌بینید [۱۴].

۳-۳- طرح اختلاط و نتایج آزمایش‌های خمیر

- تعیین نسبت‌های اختلاط

همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، برای استفاده از مدل PM و تابع کارایی، نیاز به تعیین پارامتر λ_R است، در این پژوهش (برای اولین بار در کشور) برای تعیین مقاومت در برابر جریان خمیر (λ_R)، از قیف جریان استفاده شد (شکل ۱).

در این پژوهش با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده توسط Mortsell و پروژه بین‌المللی Eurolight Con [۱۲ و ۱۱] در اروپا، یک نوع سیمان، سه نوع فیلر و دو نمونه فوق‌روان‌کننده، به‌عنوان متغیر انتخاب شده‌اند.

- سنگدانه‌های طبیعی (با وزن مخصوص بیش‌تر از 2 g/cm^3) سنگدانه ریز (ماسه) مصرف شده از نوع گردگوشه و رودخانه‌ای است که مشخصات آن را در جدول ۳ می‌بینید. منحنی دانه‌بندی آن نیز در محدوده استاندارد ایران است.

- سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده (Leca)

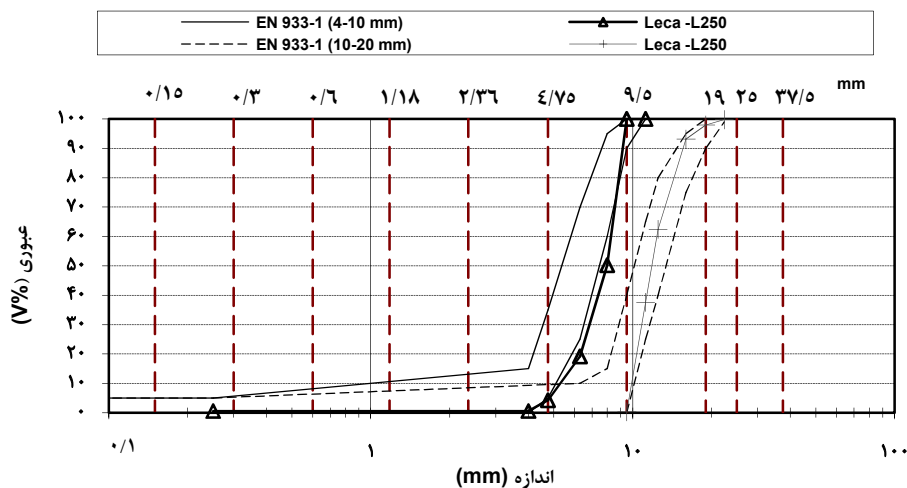
سبک‌دانه‌ی استفاده شده در این پژوهش از نوع رس منبسط‌شده است، که به‌وسیله‌ی شرکت لیکای ایران تولید شده است.

این سبک‌دانه در جرم حجمی انبوهی 250 Kg/m^3 تا 750 قابل تولید است، که در این مقاله نتایج آزمایش‌های انجام شده با لیکای 250 Kg/m^3 ارائه شده است. همه‌ی آزمایش‌ها براساس استانداردهای EN انجام شده است. منحنی دانه‌بندی سبک‌دانه‌ها را در شکل ۳ و مشخصات آن

جدول (۴) نتایج آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص ظاهری، جذب آب، جرم حجمی انبوهی و درصد حفرات سبک‌دانه

مقاومت در برابر خردشدن (N/mm^2) [*]	درصد حفرات	جرم حجمی انبوهی (kg/cm^3)	جذب آب (%)		وزن مخصوص ظاهری دانه‌ها (kg/cm^3)		اندازه سبک‌دانه (mm)
			پس از ۲۴ ساعت	پس از ۶۰ دقیقه	در حالت خشک	در حالت مرطوب	
۰/۷۸	۵۲/۳	۲۸۸/۵	۲۴/۸	۲۰/۲	۶۰۵/۳	۵۳۶/۵	2-4
۱/۴۴	۴۴/۸	۲۸۰/۸	۲۳/۲۰	۱۷/۰	۵۰۸/۳	۴۶۴/۵	10-20

* - این آزمایش طبق روش a استاندارد EN13055-1 انجام شده‌است.



شکل (۳) منحنی دانه‌بندی سبک‌دانه، به‌همراه الزامات استاندارد EN

جدول (۵) نسبت‌های اختلاط خمیر

شناسه خمیر	$w / (c+k*s)$	نسبت دوده سیلیس به سیمان (%)	نوع فیلر	fi/c (%)	نوع فوق روان کننده	a / c (%)
P4	0/42	0	ک	20	R	1/2
P5	0/36	0	ک	20	G	0/7
P6	0/42	0	ک	20	G	0/7
P7	0/34	7	ک	20	G	0/7
P8	0/38	0	ف	20	R	1/2
P9	0/40	0	ف	20	R	1/2
P10	0/38	0	ف	20	G	0/7
P11	0/38	3	ف	20	R	1/0
P12	0/40	3	ف	25	R	1/0
P13	0/38	3	ک	20	R	1/3
P14	0/42	3	ک	25	R	1/3
P15 ^۱	0/40	0	ک،ف	25	R	1/0
P16	0/34	7	ک	20	R	1/3
P17 ^۱	0/38	3	ک،ف	25	G	0/4

در جدول ۵ نسبت‌های اختلاط و مواد تشکیل دهنده خمیرهای آزمایش، شده را می‌بینید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سعی شده در ۱۴ طرح ساخته شده، تغییر λ_Q به ازای تغییر پارامترهای مؤثر ارزیابی شود.

۱. در مخلوط‌های P15 و P17، از ماسه سیلیسی و پودر کوارتز میکرونیزه با نسبت‌های مساوی استفاده شده است.

۲. نماد «ک» بیانگر استفاده از فیلر پودر کوارتز و نماد «ف» بیانگر فیلر ماسه سیلیسی است.

۳. نمادهای بکار رفته در جدول بشرح زیر تعریف شده است:

«c»: مقدار سیمان، «w»: مقدار آب، «k»: ضریب اصلاحی تاثیر میکرو سیلیس؛ «fi»: مقدار فیلر و «a»: مقدار فوق‌روان‌کننده.

- نتایج آزمایش تعیین نسبت مقاومت در برابر جریان (λ_Q) و مقاومت فشاری

برای تعیین نسبت مقاومت در برابر جریان، با توجه به روابط ارائه شده در بند ۲-۱، جاگذاری نتایج وزن خمیر که

در فواصل زمانی ۲ ثانیه تعیین شده و وزن مخصوص آن، محاسبات لازم، انجام و در نهایت مقاومت در برابر جریان تعیین شد.

از آنجایی که در انتخاب خمیر مناسب برای ساخت بتن، مقدار λ_Q و مقاومت فشاری، مؤثر است، پس از انجام آزمایش قیف جریان، خمیر تهیه شده در قالب‌های $16 \times 16 \times 4$ سانتی‌متری ریخته و پس از گذشت ۱، ۷ و ۲۸ روز تحت آزمایش تعیین مقاومت خمشی و فشاری قرار گرفتند. این آزمایش طبق استاندارد EN 196 انجام شد [۱۵]. در این روش، آزمون‌ها ابتدا تحت آزمایش خمشی قرار گرفته و سپس روی نیمه‌های شکسته شده، آزمایش مقاومت فشاری انجام می‌شود. در شکل ۴ نتایج مقاومت فشاری را می‌بینید.

۳-۴- تعیین نسبت اختلاط سنگدانه‌ها و مدول فضای خالی

پس از بررسی خواص و انتخاب خمیر مناسب، نیاز به تعیین نسبت اختلاط سنگدانه و سبکدانه و سپس تعیین

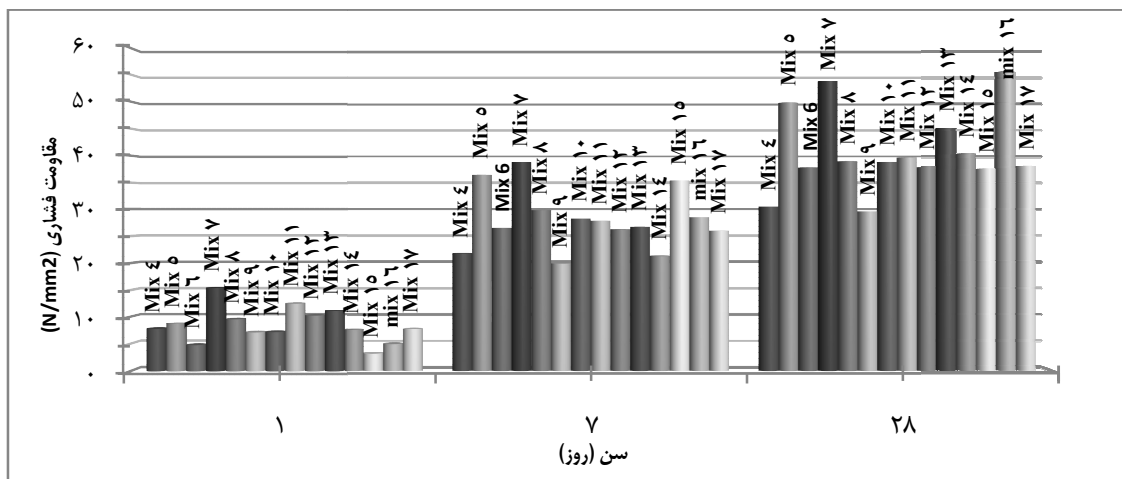
مدول فضای خالی (H_m) است. از آنجایی که، دستیابی به بیشترین تراکم با استفاده از توزیع دانه‌ها، چه در بتن‌های توانمند و چه در این روش اهمیت ویژه‌ای دارد، در برخی منابع [۱۱] برای دستیابی به تراکم‌ترین وضعیت دانه‌ها از یک نرم‌افزار استفاده شده است. در پژوهش حاضر با توجه به مطالعات قبلی برای ساخت بتن‌های توانمند با استفاده از روش پیشینه‌ی تراکم، از منحنی اصلاح شده فولر و تامسون استفاده شد [۱۶ و ۱۷]. در این منحنی که همه‌ی مواد تشکیل‌دهنده جامد (سنگدانه، سیمان، مواد افزودنی معدنی، فیلر و ...) را در برمی‌گیرد، اجزای تشکیل‌دهنده و نسبت‌های اختلاط آن‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که تا حد امکان با منحنی فولر- تامسون تطابق داشته باشند. در جدول ۶، نسبت اختلاط و در شکل ۵، منحنی اصلاح شده فولر و تامسون برای پیشینه‌ی اندازه ۱۶ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌خاطر دانه‌بندی نامناسب سبکدانه‌های

مدول فضای خالی (H_m) است. از آنجایی که، دستیابی به بیشترین تراکم با استفاده از توزیع دانه‌ها، چه در بتن‌های توانمند و چه در این روش اهمیت ویژه‌ای دارد، در برخی منابع [۱۱] برای دستیابی به تراکم‌ترین وضعیت دانه‌ها از یک نرم‌افزار استفاده شده است. در پژوهش حاضر با توجه به مطالعات قبلی برای ساخت بتن‌های توانمند با استفاده از روش پیشینه‌ی تراکم، از منحنی اصلاح شده فولر و تامسون استفاده شد [۱۶ و ۱۷]. در این منحنی که همه‌ی مواد تشکیل‌دهنده جامد (سنگدانه، سیمان، مواد افزودنی معدنی، فیلر و ...) را در برمی‌گیرد، اجزای تشکیل‌دهنده و نسبت‌های اختلاط آن‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که تا حد امکان با منحنی فولر- تامسون تطابق داشته باشند. در جدول ۶، نسبت اختلاط و در شکل ۵، منحنی اصلاح شده فولر و تامسون برای پیشینه‌ی اندازه ۱۶ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌خاطر دانه‌بندی نامناسب سبکدانه‌های

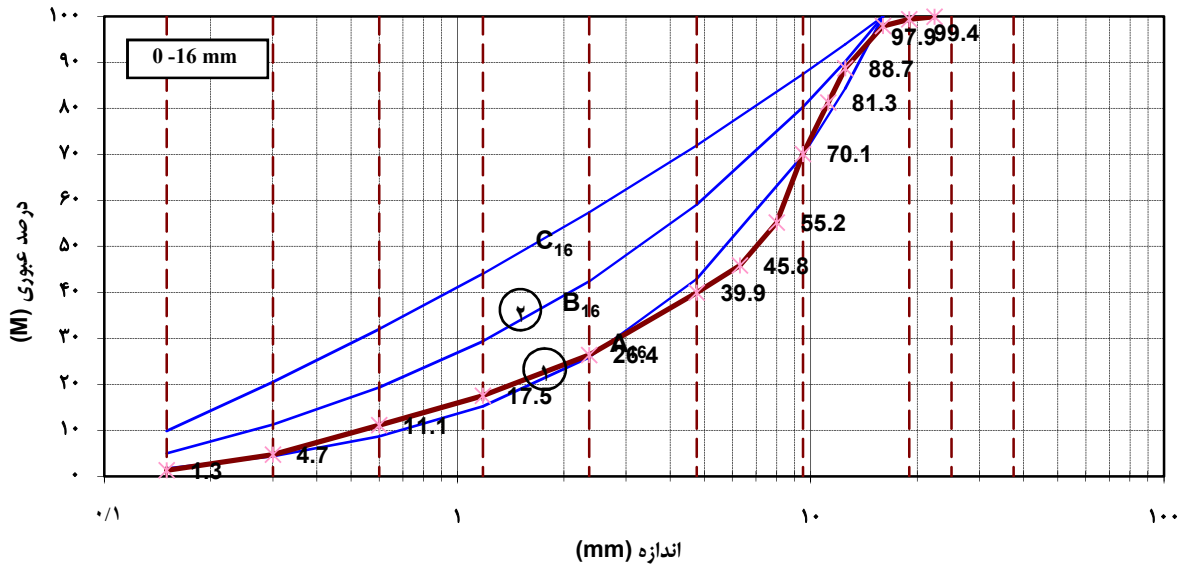
۳-۵- تخمین میزان کارایی بر اساس تابع کارایی (K_p) رابطه کارایی ارائه شده به‌وسیله‌ی Mortsell (برای بتن‌های معمولی) در پروژه Eurolight Con برای برخی از انواع سبک‌دانه آزمایش شد [۱۱]. در جدول ۷ پارامترها و ضرایب ثابت رابطه K_p را که برای سبک‌دانه‌ی Leca، Liapor و Lytag، در پروژه مذکور به‌دست آمده را می‌بینید. اگر از ضرایب ثابت K_1 و K_2 به‌دست آمده در پروژه بالا (مطابق جدول ۷ برای لیکا) در تخمین کارایی بتن‌های ساخته شده با لیکای ایران استفاده شود خطایی مشابه نمونه نشان داده شده در شکل ۶ به‌وجود خواهد آمد. از این‌رو لزوم بررسی قابلیت کاربرد مدل و کالیبره کردن آن براساس مشخصات مصالح داخل کشور مشخص می‌شود.

جدول (۶) درصد اختلاط سنگدانه‌ها و مشخصات ترکیب آن‌ها

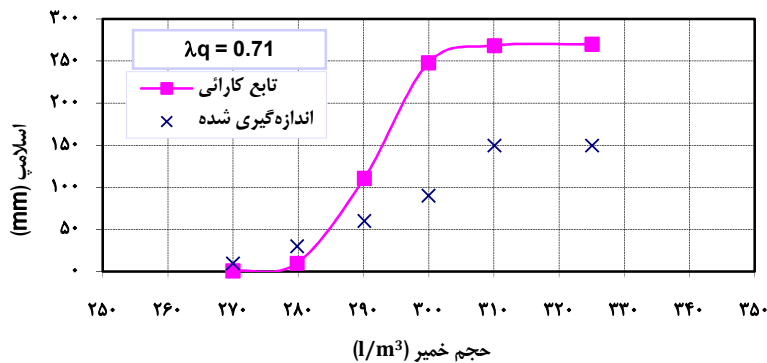
مدول فضای خالی H_m	مدول نرمی	درصد اختلاط دانه‌ها			شناسه
		ریزدانه طبیعی 0-4 mm	Leca 4-10 mm	Leca 10- 20 mm	
۲۸/۱۸	۶/۶	۴۰	۳۰	۳۰	Comb. 1



شکل (۴) نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری خمیر



شکل (۵) منحنی دانه‌بندی ترکیب سبکدانه‌های Leca 250 و ریزدانه‌های طبیعی



شکل (۶) استفاده از رابطه پروژه Eurolight Con و نتایج به دست آمده برای یک نمونه خمیر با $\lambda_q = 0.71$ و لیکای ایران

ساخت مخلوط بتن و فرضیات اولیه است، تا قابلیت کاربرد مدل PM، ارزیابی شود.

کالیبراسیون براساس حداقل کردن مجذور تفاضل ثابت‌های K_1 , K_2 در بحث پارامترهای کارایی و ثابت سنگدانه‌ها T_c , T_f انجام شد. سپس مدل بر اساس ثابت‌ها، دوباره به شکل همزمان کنترل و بهینه شد.

در حقیقت نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که بین پارامترهای مدل ارائه شده و کارایی اندازه‌گیری شده رابطه قابل قبولی وجود دارد. هر چند امکان بهبود سازگاری این

جدول (۷) پارامترها و ضرایب ثابت تابع کارایی ارائه شده در پروژه

R ²	Eurolight Con ضرایب ثابت تابع کارایی				نوع سبکدانه
	T _c	T _f	K ₂	K ₁	
۰/۸۹۹	۵	۵	-۱۵/۳۵	۳۲۷۱۰۲۰	Leca
۰/۹۳۹	۷/۵	۵	-۱۴/۰۵	۳۲۷۱۰۲۰	Liapor
۰/۹۴۳	۷/۵	۵	-۱۴/۷۲	۳۲۷۱۰۲۰	Lyttag

- کالیبراسیون تابع کارایی

مهم‌ترین گام در بررسی امکان کاربرد مدل خمیردانه برای سبک‌دانه‌های تولید کشور، کالیبره کردن مدل براساس

شده در بند ۳-۳) و سنگدانه‌هایی با ترکیب ارائه شده در جدول ۵ استفاده شد. برای کالیبره کردن و بررسی تأثیر حجم خمیر بر خواص بتن تازه و سخت شده، حجم خمیر بین ۲۷۰ تا 325 Lit/m^3 متغیر در نظر گرفته شد. در جدول ۸ جزئیات طرح مخلوط‌ها را می‌بینید.

در طرح‌های سری دوم و سوم از خمیر P7 و P16 (با مشخصات ارائه شده در بند ۳-۳) و همان ترکیب سنگدانه‌ها استفاده شد. به منظور کالیبره کردن و بررسی تأثیر حجم خمیر بر خواص بتن تازه و سخت شده، حجم خمیر بین ۲۸۰ تا 350 Lit/m^3 متغیر در نظر گرفته شد. در جدول ۹ جزئیات طرح مخلوط‌ها را می‌بینید.

مدل با سبک‌دانه‌ی تولید ایران، به‌وسیله‌ی ساخت مخلوط‌های بیش‌تر امکان پذیر خواهد بود.

ساخت مخلوط‌ها براساس انتخاب خمیرهای ساخته شده و ترکیب آن‌ها با دانه‌ها است. بر اساس نتایج به دست آمده در بند ۳-۳، خمیرهای P13، P7 و P16 به‌عنوان خمیرهای مناسب، انتخاب و با نسبت ارائه شده در جدول ۵، با سنگدانه‌ها ترکیب شدند. هم‌ی نسبت‌های انتخاب شده براساس حجم است که به نسبت وزنی تبدیل شده‌اند.

بتن‌های ساخته شده را می‌توان براساس نوع خمیر، به سه سری طرح اختلاط تقسیم کرد.

در طرح‌های سری اول از خمیر P13 (با مشخصات ارائه

جدول (۸) نسبت‌های اختلاط و اجزای تشکیل دهنده بتن‌های سبک‌دانه سری اول (خمیر با $\lambda Q = 0.72$)

اجزای تشکیل دهنده بر حسب kg/m^3							شناسه مخلوط
ریزدانه طبیعی	سبک‌دانه درشت Leca 4-10	سبک‌دانه درشت Leca 10-20	فیلر	آب	دوده سیلیس	سیمان	
۷۵۹/۰	۱۲۲/۷	۱۱۳/۱	۶۸/۷	۱۳۴/۴	۱۰/۰	۳۳۳/۶	270-1
۷۴۹/۱	۱۲۱/۱	۱۱۱/۶	۷۱/۲	۱۳۹/۲	۱۰/۴	۳۴۵/۰	280-1
۷۳۸/۳	۱۱۹/۴	۱۱۰/۰	۷۳/۸	۱۴۴/۴	۱۰/۷	۳۵۸/۰	290-1
۷۲۸/۰	۱۱۷/۷	۱۰۸/۵	۷۶/۳	۱۴۹/۳	۱۱/۱	۳۷۰/۶	300-1
۷۱۷/۵	۱۱۶/۱	۱۰۶/۹	۷۸/۹	۱۵۴/۳	۱۱/۵	۳۸۳/۰	310-1
۷۰۱/۹	۱۱۳/۵	۱۰۴/۶	۸۲/۷	۱۶۱/۷	۱۲/۱	۴۰۱/۶	325-1

- در همه مخلوط‌ها از فوق‌روان‌کننده نوع R و به میزان ۱/۳ درصد وزن سیمان استفاده شده‌است.

- در شناسه مخلوط‌ها، اعداد سمت چپ بیانگر حجم خمیر و عدد سمت راست نشان‌دهنده سری ساخت است.

جدول (۹) نسبت‌های اختلاط و اجزای تشکیل دهنده بتن‌های سبک‌دانه سری دوم و سوم (خمیر با $\lambda Q = 0.81$ و $\lambda Q = 0.84$)

فوق روان کننده بر حسب درصد وزن سیمان	نام فوق‌روان کننده	اجزای تشکیل دهنده بر حسب kg/m^3						شناسه مخلوط	
		ریزدانه طبیعی	سبک‌دانه درشت Leca 4-10 mm	سبک‌دانه درشت Leca 10-20 mm	فیلر	آب	دوده سیلیس		سیمان
۱/۳	R	۷۴۷/۹	۱۲۱/۰	۱۱۱/۵	۷۳/۷	۱۳۳/۵	۲۴/۱	۳۴۴/۳	280-2
۱/۳	R	۷۳۷/۶	۱۱۹/۳	۱۰۹/۹	۷۶/۳	۱۳۸/۲	۲۴/۹	۳۵۶/۵	290-2
۱/۳	R	۷۲۵/۱	۱۱۷/۳	۱۰۸/۱	۷۹/۴	۱۴۳/۹	۲۵/۹	۳۷۱/۲	300-2
۰/۷	G	۷۱۵/۱	۱۱۵/۶	۱۰۶/۶	۸۲/۲	۱۴۸/۸	۲۶/۹	۳۸۴/۰	312-3
۱/۳	R	۷۰۰/۷	۱۱۳/۳	۱۰۴/۴	۸۵/۶	۱۵۵/۰	۲۸/۰	۴۰۰/۰	325-2
۱/۳	R	۶۷۶/۰	۱۰۹/۳	۱۰۰/۷	۹۱/۸	۱۶۶/۳	۳۰/۰	۴۲۹/۱	350-2

- در شناسه مخلوط‌ها، اعداد سمت چپ بیانگر حجم خمیر و عدد سمت راست نشان‌دهنده سری ساخت است.

به‌طور کلی در مخلوط‌های بخش اول (شامل مخلوط‌های سری اول)، تنها حجم خمیر متغیر است. در مخلوط‌های بخش دوم (شامل سری دوم و سوم)، نوع خمیر نسبت به سری اول تغییر کرده و در بین مخلوط‌ها هم نوع فوق‌روان‌کننده (و در نتیجه λ_Q) متغیر بوده است.

نتایج بتن تازه: برای تعیین خواص بتن تازه، درصد هوای محبوس، وزن مخصوص و اسلامپ طرح‌های مختلف طبق استانداردهای EN 12350-2، EN 12350-6، EN 12350-7، EN 12350-10، دقیقه پس از افزودن آب اختلاط، به‌دست آمد [۱۸ و ۱۹ و ۲۰]. نتایج مشخصات بتن تازه همی طرح‌ها در جدول ۱۰ آمده است.

نتایج بتن سخت‌شده: آزمایش‌های انجام‌شده روی بتن سخت‌شده شامل تعیین جرم حجمی بتن پس از خروج از قالب و تعیین مقاومت فشاری در سنین ۱، ۷ و ۲۸ روز است. برای تعیین پارامترهای بالا از نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰ سانتی‌متر استفاده شد. نتایج در جدول ۱۰ ارائه شده است.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج

با توجه به تحقیقات و آزمایش‌های انجام شد، می‌توان در دو بخش زیر به تحلیل نتایج پرداخت:

- تأثیر پارامترهای مختلف بر مقاومت و لزجت خمیر و
- قابلیت استفاده از مدل خمیر-دانه و ارائه مدل پیشنهادی برای نمونه‌ای از سبک‌دانه رس منبسط‌شده تولید کشور.

۴-۱- بررسی تأثیر برخی از پارامترها، بر مقاومت فشاری و لزجت خمیر

در این بخش به بررسی تاثیر نوع و خواص فیلر، دوده‌سیلیس، فوق‌روان‌کننده و نسبت آب به مواد سیمانی

پرداخته می‌شود.

فیلر: در بحث فیلر به ارزیابی تأثیر نوع و درصد مصرف آن‌ها پرداخته می‌شود. در این رابطه یک نوع کوارتز میکرونیزه با خلوص بیش از ۹۸ درصد و کاملاً بلوری «ک» و یک نوع ماسه سیلیسی گردگوشه «ف» استفاده شد (کاربرد دوده‌سیلیس در بخش جداگانه بررسی شده است). از فیلر نوع «ک» و «ف» با درصدهای ۲۰ و ۲۵ وزن مواد سیمانی و دو طرح با ترکیب فیلر نوع «ک» و «ف» با نسبت ۲۵ درصد وزن مواد سیمانی (هر کدام ۱۲/۵ درصد) استفاده شد.

در شکل ۷ تأثیر نوع فیلرهای مصرفی بر مقاومت در برابر جریان و مقاومت فشاری انواع مخلوط‌ها را می‌بینید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی مخلوط‌هایی که با فیلر نوع «ک» ساخته شده‌اند دارای مقاومت فشاری و λ_Q بیش‌تری نسبت به مخلوط‌های حاوی فیلر نوع «ف» است؛ هم‌چنین ارتباط بسیار خوبی بین مقاومت در برابر جریان (λ_Q) و مقاومت فشاری هر سری از مخلوط‌ها برقرار است.

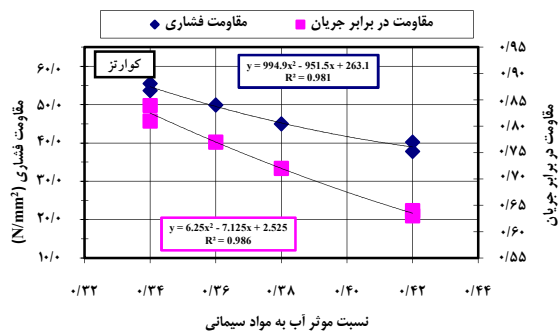
دوده‌سیلیس: به‌طور کلی استفاده از دوده‌سیلیس (در بالاتر از ۵ درصد) به جای سیمان، سبب افزایش مقاومت فشاری و کاهش روانی خمیر می‌شود. ولی نتایج آزمایش مخلوط‌هایی که در آن‌ها ۳ درصد از وزن سیمان با دوده‌سیلیس جایگزین شده‌است تفاوت محسوسی در مقاومت در برابر جریان و مقاومت فشاری نشان نمی‌دهد. همان‌گونه که انتظار می‌رفت، ۳ درصد دوده‌سیلیس می‌تواند به‌عنوان فیلر عمل کرده و به حفظ انسجام و یکنواختی خمیر کمک کند. در شکل ۸ چهار مخلوط با هم مقایسه شده‌اند (که در دو مخلوط، ۳ درصد دوده‌سیلیس جایگزین سیمان شده است). این مقایسه برای هر دو نوع فیلر و در نسبت یکسان آب به مواد سیمانی ($w/c=0/38$) انجام شده است.

جدول (۱۰) نتایج آزمایش‌های بتن تازه و سخت‌شده

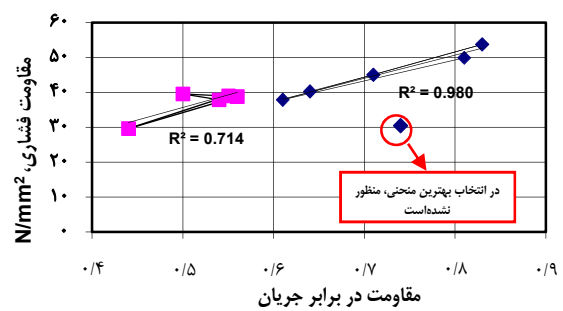
شناسه مخلوط	حجم خمیر L/m ³	نسبت آب به مواد سیمانی	وزن مخصوص محاسباتی Kg/m ³	وزن مخصوص بتن تازه Kg/m ³	اسلامپ mm	میزان هوا %	مقاومت فشاری N/mm ²			نسبت مقاومت فشاری به وزن مخصوص (%)
							۱ روز	۷ روز	۲۸ روز	
270-1	۲۷۰/۰	۰/۳۸	۱۵۴۶	۱۶۹۴	۱۰	۴/۵	۱۱/۳	۱۸/۸	۲۶/۳	۱/۵۲
280-1	۲۷۹/۸	۰/۳۸	۱۵۵۳	۱۶۷۶	۴۰	۴/۵	۷/۸	۱۵/۵	۲۳/۰	۱/۴۱
290-1	۲۹۰/۰	۰/۳۸	۱۵۶۰	۱۵۹۳	۶۰	۴/۰	۵/۵	۱۵/۸	۱۸/۰	۱/۱۳
300-1	۳۰۰/۰	۰/۳۸	۱۵۶۷	۱۶۷۲	۷۰	۳/۵	۶/۳	۱۳/۸	۲۱/۳	۱/۳۰
310-1	۳۱۰/۱	۰/۳۸	۱۵۷۳	۱۷۰۰	۱۶۰	۳/۵	۶/۵	۱۷/۰	۲۲/۵	۱/۳۷
325-1	۳۲۵/۱	۰/۳۸	۱۵۸۴	۱۷۰۵	۱۵۰	۳/۰	۸/۰	۲۰/۸	۲۵/۵	۱/۵۵
280-2	۲۸۰/۸	۰/۳۴	۱۵۶۱	۱۶۴۹	۳۵	۳/۵	۸/۰	۱۵/۳	۱۸/۸	۱/۱۳
290-2	۲۹۰/۸	۰/۳۴	۱۵۶۸	۱۶۲۸	۲۵	۳/۵	۸/۸	۱۷/۵	۲۰/۸	۱/۲۸
300-2	۳۰۲/۸	۰/۳۴	۱۵۷۶	۱۷۰۱	۴۵	۲/۵	۱۱/۸	۲۲/۳	۲۲/۹	۱/۳۴
312-3	۳۱۲/۴	۰/۳۴	۱۵۸۲	۱۶۶۳	۲۷۰	۲/۵	۱۱/۸	۲۲/۵	۲۳/۰	۱/۳۲
325-2	۳۲۶/۳	۰/۳۴	۱۵۹۳	۱۶۰۶	۶۵	۲/۵	۱۰/۳	۲۰/۳	۲۲/۵	۱/۳۵
350-2	۳۵۰/۰	۰/۳۴	۱۶۰۹	۱۷۱۸	۹۵	۳/۰	۸/۵	۲۳/۵	۲۶/۵	۱/۵۵

فیلر مورد استفاده، با کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، مقاومت فشاری و مقاومت در برابر جریان خمیر افزایش پیدا می‌کند.

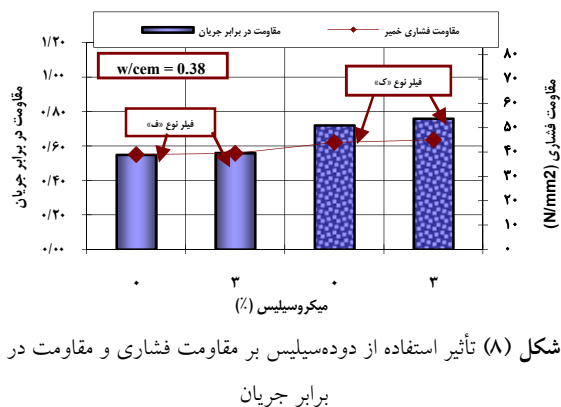
همان‌گونه که در شکل ۹ می‌بینید، این رابطه برای فیلر نوع «ک» انطباق خوبی با منحنی درجه دو دارد. هم‌چنین می‌توان استنباط کرد که در محدوده آب به سیمان ۰/۳۴ تا ۰/۴۲، تأثیر نسبت w/c، روی مقاومت در برابر جریان، بیش‌تر از تأثیر آن بر مقاومت فشاری است. این امر از شیب منحنی برازش شده مشهود است.



شکل (۹) تأثیر نسبت آب به مواد سیمانی بر مقاومت فشاری و مقاومت در برابر جریان (با فیلر نوع کوآرتز)

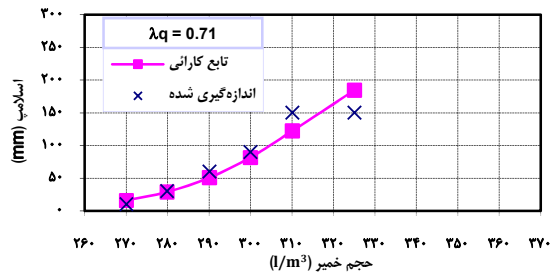


شکل (۷) تأثیر نوع فیلر بر مقاومت فشاری و مقاومت در برابر جریان

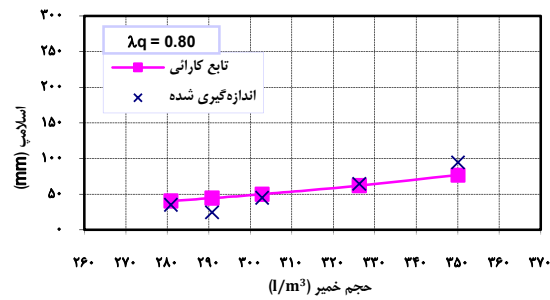


شکل (۸) تأثیر استفاده از دوده سیلیس بر مقاومت فشاری و مقاومت در برابر جریان

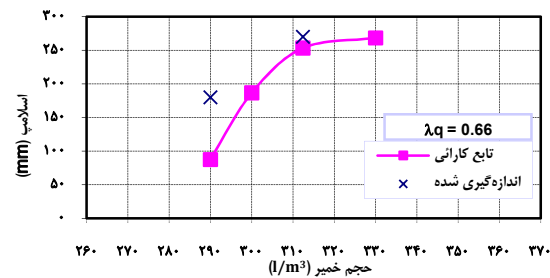
نسبت آب به مواد سیمانی و مقاومت در برابر جریان: به‌طور کلی برای هر دو نوع فوق‌روان‌کننده و هر دو نوع



شکل (۱۰) رابطه بین حجم خمیر و مقدار اسلامپ مخلوط‌های سری ۱



شکل (۱۱) رابطه بین حجم خمیر و مقدار اسلامپ مخلوط‌های سری ۲



شکل (۱۲) رابطه بین حجم خمیر و مقدار اسلامپ مخلوط‌های سری ۳

α : ضریب شیب تابع کارایی که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود

$$\alpha = K_1 \cdot e^{-k_2 \lambda Q}$$

که در آن:

λQ : نسبت مقاومت در برابر جریان و

K_1 و K_2 : اعداد ثابت از طریق تحلیل رگرسیون. نتایج آزمایش‌ها به این شرح به دست آمده است.

جدول (۱۱) پارامترها و ضرایب ثابت رابطه کارایی برای لیکای رده ۲۵۰

R^2	T_c	T_f	K_2	K_1
۰/۹۵	۵	۵	-۱۷/۲	۳۲۷۰۰۰۰

۴-۲- قابلیت استفاده از مدل خمیر-دانه و ارائه مدل

مهم‌ترین قسمت این پژوهش، که در حقیقت بیانگر هدف انجام آن است، کاربرد و امکان کالیبره کردن مدل خمیر-دانه برای ارائه مدل خمیر-دانه با استفاده از نمونه‌ای از لیکای تولید کشور است.

همان‌گونه که در شکل‌های ۱۰ الی ۱۲ می‌بینید، مدل خمیر-دانه‌ای که Mortsell برای بتن‌های معمولی ارائه داده است با تغییراتی در مقادیر ثابت K_1 و K_2 و هم‌چنین لحاظ کردن ضرایبی برای در نظر گرفتن تأثیر خواص سنگدانه‌ها در تعیین پارامتر H_m (مدول فضای خالی) و در نهایت تأثیر آن در رابطه K_p (تابع کارایی)، برای سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده مورد بررسی در این تحقیق (Leca-250)، قابل استفاده است.

مدل ارائه شده (رابطه ۹) با ساخت مخلوط‌های مختلفی با مقادیر λQ متفاوت، سبک‌دانه‌ی متفاوت و مدول فضای خالی مختلف (با توجه به محدودیت‌های موجود)، کالیبره و ارزیابی شد. نتایج حاصل، بیانگر تطابق خوب این مدل براساس مقادیر ثابت جدید به دست آمده با نمونه‌ای از لیکای تولید شده در کشور (Leca 250) است. در ادامه تابع کارایی، مدول فضای خالی و ضرایب ثابت برای لیکای رده ۲۵۰ ایران، آمده است.

$$K_p = (n-m) \cdot \{\tanh[2 \alpha (F_p - H_m) - 1] + 1\} / 2 + m \quad (9)$$

m, n : به ترتیب مقادیر حد بالا و پایین کارایی (اسلامپ)؛

F_p : حجم خمیر؛

H_m : مدول فضای خالی ذرات که از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$H_m = V_f (H_f / (F_m) 0.5 + T_f) + V_c (H_c / (F_m) 0.5 + T_c)$$

در آن متغیرها، مشابه معادله ۴ تعریف می‌شود.

جریان» و «مقاومت فشاری» مورد نیاز و درصد اختلاط سنگدانه و سبکدانه، برای دستیابی به «حداقل فضای خالی» تعیین می‌شود. با توجه به مراتب بالا در این روش طرح مخلوط از کمینه‌ی خمیر سیمان استفاده می‌شود؛ به عبارت دیگر در این روش بر خلاف سایر روش‌های طرح مخلوط بتن سبکدانه، سیمان کمتری مصرف می‌شود و از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه است.

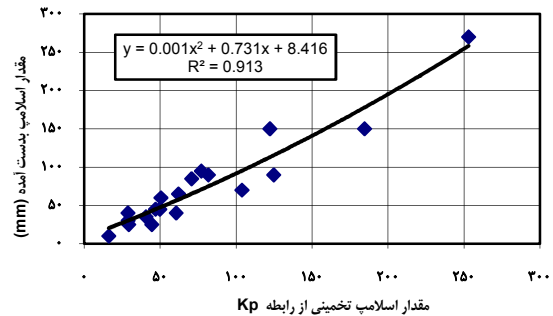
۶- تقدیر و تشکر

از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن برای فراهم کردن امکانات و تجهیزات مورد نیاز برای این پژوهش و هم‌چنین شرکت لیکای ایران برای تولید لیکای مورد نیاز، تشکر و قدردانی می‌شود.

۷- مراجع

- [1] Brenner, T.W, Holm, T.A, and Stepanova V.F., "Lightweight Concrete-a Proven Material for two Mellennia", Proceeding of Advances in Cement and Concrete University of New Hampshire, Durham. S.L. Sarkar and M.W. Grhtzeck, Ed, 37-41, 1994.
- [۲] محسن تدین، «بررسی و ارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و شدت خوردگی بتن سبک پرمقاومت با مصالح موجود در ایران»، پایان‌نامه دکتری، دانشکده عمران، دانشگاه علم و صنعت ایران، ۱۳۸۱.
- [3] Owens, P.L., Lightweight aggregates for structural concrete. Structural Lightweight Aggregate Concrete, pp 1-18. Chapman & Hall, London, 1993.
- [4] Newman, J.B., Properties of structural lightweight concrete in structural lightweight concrete. Ed. J.L. Clarke, Blackie, Chapman & Hall, London, pp. 19-44, 1993.
- [5] ACI 213R, "Guide for Structural Lightweight Aggregate Concrete", ACI 213-R.

T_c و T_f ضرایب ثابت ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها است (رابطه ۴) که به وسیله آزمون و خطا برای تعیین مدول فضای خالی ذرات (H_m) به کار می‌روند؛ و R^2 ضریب همبستگی است (شکل ۱۳).



شکل (۱۳) رابطه همبستگی بین نتایج اسلامپ به دست آمده و تخمین مقدار اسلامپ از تابع کارایی

همان‌گونه که در شکل ۱۳ ملاحظه می‌شود این معادله می‌تواند تطابق خوبی با مقدار اسلامپ به دست آمده در مخلوط‌های ساخته شده داشته باشد.

۵- نتیجه گیری

- نتایج به دست آمده نشان می‌دهد مدل پیشنهادی که براساس فرضیه دوفازی ارائه شده، می‌تواند برای طرح مخلوط بتن سبکدانه حاوی رس منبسط‌شده تولید کشور به کار رود.
- روش پیشنهادی، قابلیت استفاده برای دیگر انواع سبکدانه را نیز دارد ولی باید براساس مطالعات آزمایشگاهی، این مدل برای هر مورد به شکل جداگانه کالیبره شود.
- در این روش برای دستیابی به مقدار اسلامپ و مقاومت فشاری مورد نظر، مقدار خمیر سیمان بهینه و درصد اختلاط سنگدانه و سبکدانه انتخاب می‌شوند. بدین منظور خمیر سیمان بهینه براساس پارامتر «مقاومت در برابر

- [13] Smeplless et al., "Lightcon-report 2.13: Specifications and Production Guidelines for Light Weight Aggregates and Light Weight Aggregate Concrete", SINTEF report STF22 A96836 Trondheim, Norway, 1996.
- [14] EN 13055-1, "Lightweight aggregates- Part 1: Lightweight aggregates for concrete, mortar and grout", 2002.
- [15] EN 196-2, "Methods of testing cement- Part 2: Determination of Strength", 2005.
- [۱۶] پرهیزکار، هیله مایر، رئیس قاسمی، قدوسی، «استفاده از طرح اختلاط بهینه به منظور بهبود خواص مکانیکی و کاهش نفوذپذیری بتن در شرایط آزمایشگاهی و شبیه‌سازی خلیج فارس»، ششمین کنفرانس بین‌المللی مهندسی عمران، اصفهان، ۱۳۸۲.
- [17] Parhizkar T., Raiss Ghasemi A. M., Ramezaniapour A. A., "Properties of the New Type of HPC in Simulated Conditions of Persian Gulf", International Seminar on Sustainable Construction Materials and Technologies, England, Coventry, 2007
- [18] EN 12350-2, "Testing fresh concrete – Part 2: Slump test", 1999.
- [19] EN 12350-6, "Testing fresh concrete – Part 6: Density", 1999.
- [20] EN 12350-7, "Testing fresh concrete – Part 7: Air content- Pressure methods", 2000.
- [6] Chen, H.J., Yen, T., Lia, T.P., Huang, Y.L., "Determination of Dividing Strength and it's Relation to the Concrete Strength in Lightweight Aggregate Concrete", Cement and Concrete Composition, Vol. 21, pp.29-37, 1999.
- [7] ACI 211.2, "Standard practice for selecting proportions for structural LWAC", 1998.
- [8] Spitzner, J., "A Review of the Development of Lightweight Aggregate - History and Actual Survey", CEB/FIP International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, pp 13-21. Editors: I. Holand, et al, 1995.
- [9] Punkki, J., Gjörv, O.E., "Effect of water absorption by aggregate on properties of high strength lightweight concrete", CEB/FIP International Symposium on Structural Lightweight Aggregate Concrete, Sandefjord, Norway, pp 604-616. Editors: I. Holand et al. 373-379. Editors: I. Holand, T. A. Hammer and F. Fluge), 1995.
- [10] Nolan E., "A Rational mix design method for lightweight aggregate concrete using typical UK materials", Brite-Euram Project BE96-3942 Eurolightcon, Report BE 96-3942-R5, 2000.
- [11] Smeplless S., "Applicability of the particle-matrix model to LWAC", Brite-Euram Project BE96-3942 Eurolightcon, Report BE 96-3942-R12, 2000.
- [12] Mørtzell E., "Modellering av delmaterialenes betydning for betongens konsistens" ("Modelling of the effect of the constituents on the concrete workability"), Dr. ing thesis, Institutt for konstruksjonsteknik, Norwegian Institute of Technology, Trondheim, 1996.

Applicability of Particle-Matrix Model for Determination of Proportions of Lightweight Concrete Aggregates' Contained LECA

A.M. Raeiss Ghasemi^{1*}, T. Parhizkar², H. Famili³

1- Researcher of Building & Housing Research Center, Tehran, Iran

2- Assistant Prof. of Building & Housing Research Center, Tehran, Iran

3- Assistant Prof. of Science and Technology University, Tehran, Iran

raaisghasemi@yahoo.com

Abstract

In general, methods of lightweight aggregate concrete mix design are not much different with the ordinary concrete mix designs, except that in LWAC, volumetric method must be used for determining the amount of aggregates (normal and lightweight). In some countries, the same mix design of conventional concrete (normal weight) is also used for this purpose. Due to the specific restrictions of these methods, it is difficult to use them in certain cases where concrete slump is specified, or high strength concrete is needed.

In this paper, a new method for the mix design of lightweight aggregate concrete has been proposed using a type of artificial lightweight aggregate (expanded clay, Leca). This approach is based on two-phased model (particle and matrix), and has better performance compared to other methods, due to the possibility of considering the properties of cement paste and particle in terms of access to consistency (slump) and the required strength of the concrete made. Also in this method, the percentage composition of normal and lightweight aggregates is chosen to achieve minimum space (porosity), so, the minimum amount of cement paste will be used to achieve the above requirements, and the economic saving.

Keywords: Lightweight aggregate concrete, Expanded clay, Lightweight aggregate, Flow cyl, Cement paste.