مجله علمی- پژوهشی
«عمـــران مـــدرس»
دوره یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰

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

امیر مازیار رئیس قاسمی[1*]، طیبه پرهیزکار[2]، هرمز فامیلی[3]

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

raiisghasemi@yahoo.com
تاریخ دریافت: ۱۳۸٦/۱۱/۱٦ تاریخ پذیرش: ۱۳۸۹/۰۲/۲۰

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 بتن‌سبکدانه 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

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 و۲].

در بسیاری از آیین‌نامه‌ها، بتن سبک‌دانه به بتنی با جرم حجمی خشک کمتر از ۲۰۰۰ kg/m^3 اطلاق می‌شود [۳].

به‌طور کلی بتن‌های سبک‌دانه دارای جرم حجمی حدود ۳۰۰ تا ۲۰۰۰ kg/m^3، مقاومت فشاری (مکعبی) ۱ تا بیش از ٦۰ مگاپاسکال و ضریب هدایت حرارتی ۰/۱ تا $w/m°k$ ۱/۰ است [٤]. معمول‌ترین روش برای کاهش جرم حجمی بتن (به‌ویژه بتن سازه‌ای)، جایگزین کردن قسمتی از سنگدانه‌های معمولی (با وزن معمولی) با سنگدانه‌های

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

سبک است.

برای ساخت بتن‌های پرمقاومت معمولاً نسبت آب به سیمان را، به کم‌تر از ۰/٤٥ کاهش می‌دهند. طبق ACI 318 بتن پُرمقاومت حاوی سبکدانه دارای مقاومت فشاری استوانه‌ای بیش از MPa ۳۵ 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 MPa ۳۵ مصرف ٤۰۰ تا Kg/m^3 ۵۰۰ سیمان توصیه می‌شود؛ هم‌چنین این منبع مصرف سیمان بیش از Kg/m^3 ٦۰۰ 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 [٦].

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 به‌وسیله‌ی کمیته ACI 211-2 است. این روش هم از این لحاظ که نوع و خواص سبکدانه را در نظر نمی‌گیرد هم به‌دلیل 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 که می‌تواند در خواص بتن‌های تازه و سخت شده مؤثر باشد [۸ و ۹ و ۱۰].

در یکی از تحقیقات انجام شده [۱۱ و۱۲] امکان کاربرد مدل خمیر–دانه[1] (PM) برای بتن‌های سبکدانه بررسی شده است. در این مدل، بتن تازه متشکل از دو فاز خمیر[2] و دانه[3] 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 تاثیر خصوصیات ذاتی مواد تشکیل دهنده، نسبت اختلاط آن‌ها و اَندرکُنش شیمیایی و فیزیکی آن‌ها است. ساده‌ترین راه مدل کردن چنین سیستم پیچیده‌ای، آن است که بتن تازه را به‌شکل 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_Q) و «خواص دانه» با پارامتر مدول فضای خالی ذرات (H_m)، تعریف می‌شود.

1- PM Model
2- Matrix
3- Particle

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

۲-۱- نسبت مقاومت در برابر جریان (λ_Q)

نسبت مقاومت در برابر جریان به‌وسیله‌ی 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 (λQ)

قیف به‌شکل عمودی روی یک پایه نصب می‌شود. خمیر تا ارتفاع ٤۰۰ میلی‌متر داخل استوانه ریخته شده و سپس دبی خروجی خمیر روان از قیف جریان تعیین می‌شود. از آن‌جایی‌که 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 به‌وسیله‌ی اختلاف بین شدت جریان تئوریکی 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.

$$Q_t = Q_i - Q_h \qquad (۱)$$

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

$$Q_i = \frac{\pi d^2}{4}\sqrt{\frac{2gh}{(d/D)^4+1}} \qquad (۲)$$

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:

$$Q_h = \frac{\pi d^2}{4}\sqrt{\frac{2gh}{(d/D)^4+1}} - Q_t \qquad (۳)$$

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

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

زیاد تعریف می‌شود.

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 (٤ mm – ۰/۱۲۵) بر کارایی، بیش‌تر از بخش درشت‌دانه‌ها (بزرگ‌تر از ٤ 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 تناسبات 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 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.

$$H_m = v_f(H_f/\sqrt{Fm_f} + T_f) + v_c(H_c/\sqrt{Fm_c} + T_c) \qquad (٤)$$

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 ٤ تا ۰/۱۲۵ میلی متر)؛

T_c: پارامتر کالیبراسیون درشت‌دانه‌ها (ذرات بزرگ‌تر از ٤ میلی متر) و

Fm_f و Fm_c: مدول نرمی ریزدانه و درشت‌دانه.

۲-۳- تابع کارایی

براساس 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 کاریی استفاده کرد. این تابع به شکل نمودار «S» ظاهر می‌شود. در شکل ٦ نمونه‌ای از این تابع ارائه شده است که مقدار اسلامپ را برحسب حجم خمیر، نشان می‌دهد.

تابع کارائی (K_p) که به‌وسیله‌ی Mortsell ارائه شده به‌صورت زیر است [۱۲]:

$$K_p = (n-m).[\tanh(x)+1]/2 + m \qquad (٥)$$

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

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

$$x = \alpha\,(2.F_p\text{-}1\text{-}\beta) \qquad (۶)$$

F_p: حجم خمیر؛

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

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

$$\alpha = K_1.e^{-K2\ \lambda Q} \qquad (۷)$$

λ_Q: نسبت مقاومت جریان .

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

$$\beta = 2.H_m\text{-}1+1/\alpha \qquad (۸)$$

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 ۲۵۰ kg/m^3) پرداخته شده‌است.

در حال حاضر، امکان تولید لیکا در رده‌های مختلف در ایران وجود دارد. این رده‌بندی بیش‌تر براساس جرم حجمی انبوهی غیرمتراکم انجام می‌شود ولی با تغییر جرم حجمی، مقاومت در برابر خُردشدگی، 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.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

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 می‌بینید.

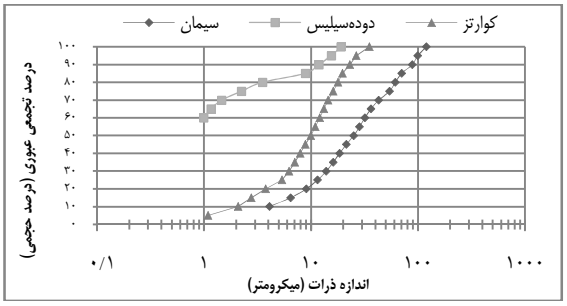
جدول (۱) خواص سیمان نوع ۱ مصرفی

خواص شیمیایی	نتایج آزمون
% SiO_2	۱۹/۹٤
% Al_2O_3	٤/۱۲
% Fe_2O_3	٤/۰۸
% MgO	٤/۲٥
% CaO	٦۰/۱٥
% SO_3	۲/۰۳
افت ناشی از سرخ شدن ٪	٤/۱۰
باقی‌مانده نامحلول ٪	۰/۷۰
خواص مکانیکی	**نتایج آزمون**
مقاومت فشاری۲۸روزه kg/cm^2	٤۱۰

مواد افزودنی شیمیایی: با توجه به تنوع زیاد مواد افزودنی شیمیایی از نظر نوع و نام‌های تجاری، دو نوع فوق‌روان کننده (یک نوع فوق‌روان‌کننده نسل جدید، بر پایه کربوکسیلیک، که به‌صورت اختصاری با G نشان داده می‌شود و یک نوع فوق‌روان‌کننده نسل قدیم بر پایه لیگنوسولفونات که به‌صورت اختصاری با R نشان داده می‌شود)، بررسی شد (جدول ۲).

فیلر: فیلرهای استفاده شده در این پژوهش، شامل یک نوع پودر کوارتز میکرونیزه [دارای دانه‌بندی مشابه سیمان]، یک نمونه ماسه سیلیسی [با محدوده دانه‌بندی ۰/۱۵ -۰/۰۵ میلی‌متر] و یک نمونه دوده‌سیلیس است. در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی ارائه شده است. در این پروژه هدف از کاربرد دوده‌سیلیس بیش‌تر خاصیت پُرکنندگی و ایجاد چسبندگی در خمیر سیمان است و خواص پوزولانی آن در درجه دوم اهمیت قرار دارد.

سنگدانه: سنگدانه‌های مورد استفاده شده از نظر وزنی به دو گروه سنگدانه‌های با وزن معمولی (وزن مخصوص بیش‌تر از g/Cm3 ۲) و سبک‌دانه (وزن مخصوص کمتر از g/Cm3 ۲) تقسیم می‌شوند.



شکل (۲) منحنی دانه‌بندی انواع فیلر، دوده‌سیلیس و مقایسه آن با دانه‌بندی سیمان مصرفی

جدول (۲) مشخصات فیزیکی، شیمیایی و محدوده مصرف توصیه شده مواد افزودنی فوق‌روان‌کننده

نام افزودنی	رنگ	وزن مخصوص، kg/m^3	pH	کلرید ٪	درصد مصرف (نسبت به وزن سیمان)
G	قهوه‌ای روشن	۱/۰٦ تا ۱/۰۸	٦/٦	۰	۰/٥ تا ۱/٥
R	قهوه‌ای	۱/۱۹٥ تا ۱/۲	–	۰	۰/۳ تا ۱/۸

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 (٪)
۲/٥٦	۲/٤۹	۳/۲۲	۱/۸٦

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

– سنگدانه‌های طبیعی (با وزن مخصوص بیش‌تراز $2\ g/Cm^3$)

سنگدانه ریز (ماسه) مصرف شده از نوع گِردگوشه 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 ۲۵۰ تا Kg/m^3 ۷۵۰ قابل تولید است، که در این مقاله نتایج آزمایش‌های انجام شده با لیکای Kg/m^3 ۲۵۰ ارائه شده است. همه‌ی آزمایش‌ها براساس استانداردهای EN انجام شده است. منحنی دانه‌بندی سبک‌دانه‌ها را در شکل ۳ و مشخصات آن را در جدول ٤ می‌بینید [١٤].

۳-۳- طرح اختلاط و نتایج آزمایش‌های خمیر

– تعیین نسبت‌های اختلاط

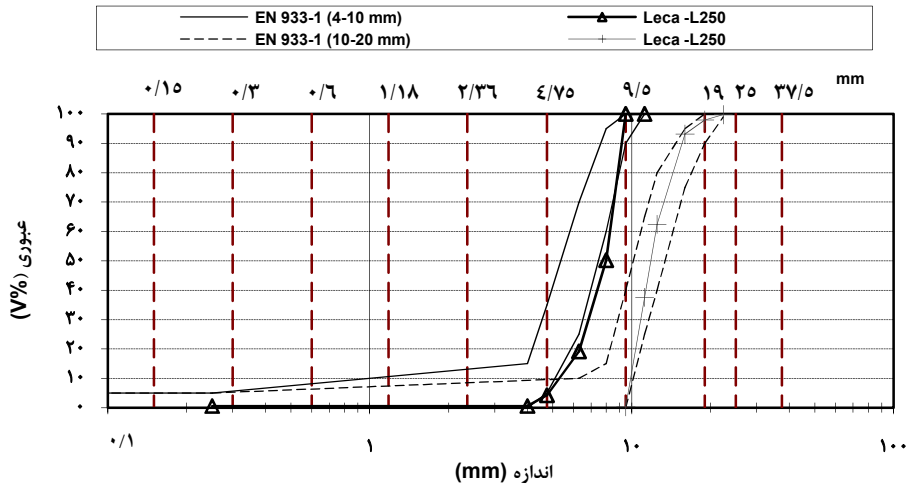
همان‌گونه که پیش‌تر اشاره شد، برای استفاده از مدل PM و تابع کارایی، نیاز به تعیین پارامتر λ_Q است، در این پژوهش (برای اولین بار در کشور) برای تعیین مقاومت در برابر جریان خمیر (λ_Q)، از قیف جریان استفاده شد (شکل ۱).

در این پژوهش با توجه به نتایج تحقیقات انجام شده توسط Mortsell و پروژه بین‌المللی Eurolight Con [۱۱و۱۲] در اروپا، یک نوع سیمان، سه نوع فیلر و دو نمونه فوق‌روان‌کننده، به‌عنوان متغیر انتخاب شده‌اند.

جدول (٤) نتایج آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص ظاهری، جذب آب، جرم حجمی انبوهی و درصد حفرات سبکدانه

اندازه سبکدانه (mm)	وزن مخصوص ظاهری دانه‌ها (kg/cm^3)		جذب آب (٪)		جرم حجمی انبوهی (kg/cm^3)	درصد حفرات	مقاومت در برابر خردشدن (N/mm^2)*
	در حالت مرطوب	در حالت خشک	پس از ٦٠ دقیقه	پس از ٢٤ ساعت			
2-4	٥٣٦/٥	٦٠٥/٣	٢٠/٢	٢٤/٨	٢٨٨/٥	٥٢/٣	٠/٧٨
10-20	٤٦٤/٥	٥٠٨/٣	١٧/٠	٢٣/٢٠	٢٨٠/٨	٤٤/٨	١/٤٤

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



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

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

جدول (۵) نسبت‌های اختلاط خمیر

شناسه خمیر	w / (c+k*s)	نسبت دوده‌سیلیس 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 [1]	0/40	0	ک+ف	25	R	1/0
P16	0/34	7	ک	20	R	1/3
P17 [1]	0/38	3	ک+ف	25	G	0/4

در جدول ۵ نسبت‌های اختلاط و مواد تشکیل‌دهنده خمیرهای آزمایش، شده را می‌بینید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سعی شده در ١٤ 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 میکر 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 آنجایی‌که 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 ١٦×٤×٤ 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، آزمونه‌ها ابتدا تحت آزمایش خمشی قرار گرفته و سپس روی نیمه‌های شکسته شده، آزمایش مقاومت فشاری انجام می‌شود. در شکل ٤ 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

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

مدول فضای خالی (H_m) است.

از آنجایی‌که، 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 متراکم‌ترین وضعیت دانه‌ها از یک نرم‌افزار استفاده شده است.

در پژوهش حاضر با توجه به مطالعات قبلی برای ساخت بتن‌های توانمند با استفاده از روش بیشینه‌ی تراکم، از منحنی اصلاح شده فولر و تامسون استفاده شد [۱۶و۱۷]. در این منحنی که همه‌ی مواد تشکیل‌دهنده جامد (سنگدانه، سیمان، مواد افزودنی معدنی، فیلر و ...) رادر برمی‌گیرد، اجزای تشکیل‌دهنده و نسبت‌های اختلاط آن‌ها باید به‌گونه‌ای انتخاب شوند که تا حد امکان با منحنی فولر- تامسون تطابق داشته باشند. در جدول ٦، نسبت اختلاط و در شکل ٥، منحنی اصلاح شده فولر و تامسون برای بیشینه‌ی اندازه ١٦ میلی‌متر نشان داده شده است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌خاطر دانه‌بندی نامناسب سبکدانه‌های ۱۰mm-٤ (شکل ۳)، منحنی ترکیبی نیز خارج از محدوده منحنی فولر قرار گرفته است.

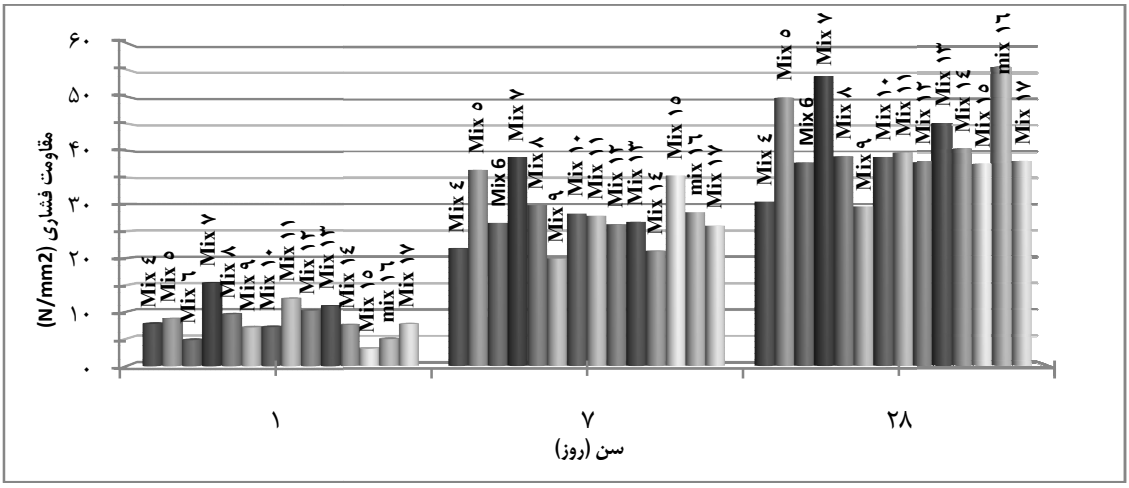
۳-۵- تخمین میزان کارایی بر اساس تابع کارایی(K_p)

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 ٦ به‌وجود خواهد آمد. ازاین‌رو لزوم بررسی قابلیت کاربرد مدل و کالیبره کردن آن براساس مشخصات مصالح داخل کشور مشخص می‌شود.

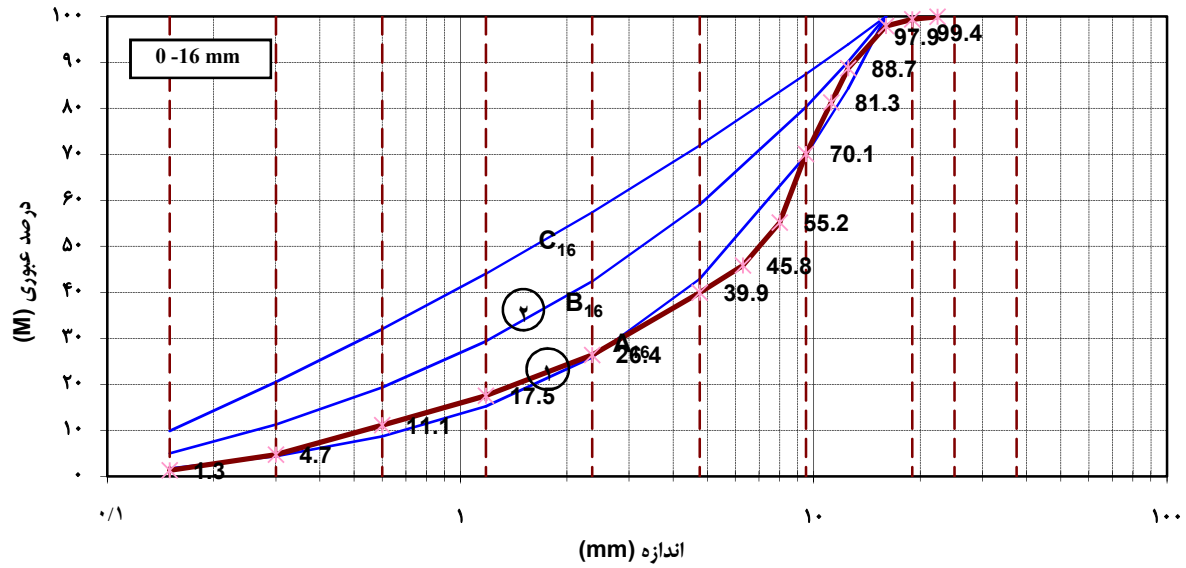
جدول (٦) درصد اختلاط سنگدانه‌ها ومشخصات ترکیب آن‌ها

شناسه	درصد اختلاط دانه‌ها			مدول نرمی	مدول فضای خالی H_m
	Leca 10- 20 mm	Leca 4-10 mm	ریزدانه طبیعی 0-4 mm		
Comb. 1	۳۰	۳۰	٤۰	٦/٦	۲۸/۱۸

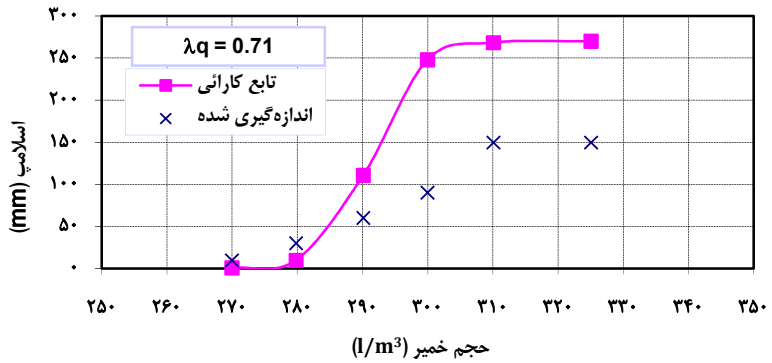


شکل (٤) نتایج آزمایش تعیین مقاومت فشاری خمیر

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]



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



شکل (٦) استفاده از رابطه پروژه Eurolight Con و نتایج به‌دست آمده برای یک نمونه خمیر با l_Q=۰/۷۱ و لیکای ایران

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

نوع سبکدانه	ضرائب ثابت تابع کارائی				R^2
	K_1	K_2	T_f	T_c	
Leca	۳۲۷۱۰۲۰	-۱۵/۳۵	۵	۵	۰/۸۹۹
Liapor	۳۲۷۱۰۲۰	-۱٤/۰۵	۵	۷/۵	۰/۹۳۹
Lytag	۳۲۷۱۰۲۰	-۱٤/۷۲	۵	۷/۵	۰/۹٤۳

- کالیبراسیون تابع کارایی

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

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

مـدل بـا سـبک‌دانـه‌ی تولیـد ایـران، بـه‌وسـیله‌ی سـاخت مخلوط‌های بیش‌تر امکان پذیر خواهد بود.

ساخت مخلوط‌ها براساس انتخاب خمیرهای سـاخته‌شـده و ترکیب آن‌ها با دانه‌ها است. بر اساس نتایج به‌دست آمـده در بند ۳-۳، خمیرهای P13، P7 و P16 به‌عنوان خمیرهای مناسب، انتخاب و با نسـبت ارائـه شـده در جـدول ۵، بـا سـنگدانه‌هـا ترکیب شدند. همه‌ی نسبت‌های انتخاب شده براسـاس حجـم است که به نسبت وزنی تبدیل شده‌اند.

بتن‌های ساخته شده را می‌توان براساس نوع خمیـر، بـه سه سری طرح اختلاط تقسیم کرد.

در طرح‌های سری اول از خمیرP13 (با مشخصات ارائه شده در بند۳-۳) و سنگدانه‌هایی با ترکیـب ارائـه شـده در جدول ۵ استفاده شد. برای کـالیبره کـردن و بررسـی تـأثیر حجم خمیر بر خواص بتن تازه و سخت شده، حجم خمیر بین ۲۷۰ تا ۳۲۵ Lit/m^3 متغیر در نظر گرفته شد. در جـدول ۸ جزئیات طرح مخلوط‌ها رامی‌بینید.

در طرح‌های سـری دوم و سـوم از خمیـرP7 وP16 (بـا مشخصـات ارائـه شـده در بنـد۳-۳) و همـان ترکیـب سنگدانه‌ها استفاده شد. به منظـور کـالیبره کـردن و بررسـی تأثیر حجم خمیر بر خواص بتن تازه و سخت‌شـده، حجـم خمیر بین ۲۸۰ تا ۳۵۰ Lit/m^3 متغیر در نظر گرفتـه شـد. در جدول ۹ جزئیات طرح مخلوط‌ها را می‌بینید.

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

شناسه مخلوط	اجزای تشکیل‌دهنده بر حسب kg/m^3						
	سیمان	دوده سیلیس	آب	فیلر	سبکدانه درشت Leca 10-20	سبکدانه درشت Leca 4-10	ریزدانه طبیعی
270-1	۳۳۳/٦	۱۰/۰	۱۳٤/٤	٦۸/۷	۱۱۳/۱	۱۲۲/۷	۷٥۹/۰
280-1	۳٤٥/۰	۱۰/٤	۱۳۹/۲	۷۱/۲	۱۱۱/٦	۱۲۱/۱	۷٤۹/۱
290-1	۳٥۸/۰	۱۰/۷	۱٤٤/٤	۷۳/۸	۱۱۰/۰	۱۱۹/٤	۷۳۸/۳
300-1	۳۷۰/٦	۱۱/۱	۱٤۹/۳	۷٦/۳	۱۰۸/٥	۱۱۷/۷	۷۲۸/۰
310-1	۳۸۳/۰	۱۱/٥	۱٥٤/۳	۷۸/۹	۱۰٦/۹	۱۱٦/۱	۷۱۷/٥
325-1	٤۰۱/٦	۱۲/۱	۱٦۱/۷	۸۲/۷	۱۰٤/٦	۱۱۳/٥	۷۰۱/۹

- 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 تشکیل‌دهنده بتن‌های سبکدانه سری دوم و سوم (خمیر با $\lambda Q = 0.81$ و $\lambda Q = 0.84$)

شناسه مخلوط	اجزای تشکیل‌دهنده بر حسب kg/m^3							نام فوق‌روان کننده	فوق روان کننده بر حسب درصد وزن سیمان
	سیمان	دوده سیلیس	آب	فیلر	سبکدانه درشت Leca 10-20 mm	سبکدانه درشت Leca 4-10 mm	ریزدانه طبیعی		
280-2	۳٤٤/۳	۲٤/۱	۱۳۳/٥	۷۳/۷	۱۱۱/٥	۱۲۱/۰	۷٤۷/۹	R	۱/۳
290-2	۳٥٦/٥	۲٤/۹	۱۳۸/۲	۷٦/۳	۱۰۹/۹	۱۱۹/۳	۷۳۷/٦	R	۱/۳
300-2	۳۷۱/۲	۲٥/۹	۱٤۳/۹	۷۹/٤	۱۰۸/۱	۱۱۷/۳	۷۲٥/۱	R	۱/۳
312-3	۳۸٤/۰	۲٦/۹	۱٤۸/۸	۸۲/۲	۱۰٦/٦	۱۱٥/٦	۷۱٥/۱	G	۰/۷
325-2	٤۰۰/۰	۲۸/۰	۱٥٥/۰	۸٥/٦	۱۰٤/٤	۱۱۳/۳	۷۰۰/۷	R	۱/۳
350-2	٤۲۹/۱	۳۰/۰	۱٦٦/۳	۹۱/۸	۱۰۰/۷	۱۰۹/۳	٦۷٦/۰	R	۱/۳

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

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

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 12350-7، EN 12350-6 و EN 12350-2، ۱۰ دقیقه پس از افزودن آب اختلاط، به‌دست آمد [۱۸و۱۹و۲۰]. نتایج مشخصات بتن تازه همه‌ی 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.

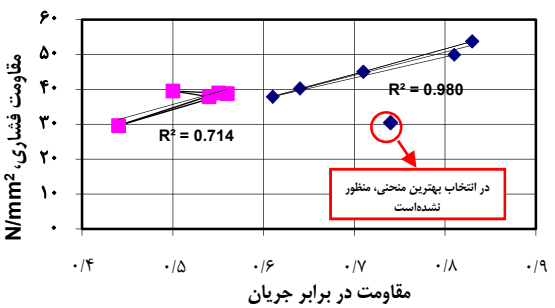
در شکل ۷ تأثیر نوع فیلرهای مصرفی بر مقاومت در برابر جریان و مقاومت فشاری انواع مخلوط‌ها را می‌بینید. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، به‌طور کلی مخلوط‌هایی که با فیلر نوع «ک» ساخته شده‌اند دارای مقاومت فشاری و λ_Q بیش‌تری نسبت به مخلوط‌های حاوی فیلر نوع «ف» است؛ هم‌چنین ارتباط بسیار خوبی بین مقاومت در برابر 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=۰/۳۸) انجام شده است.

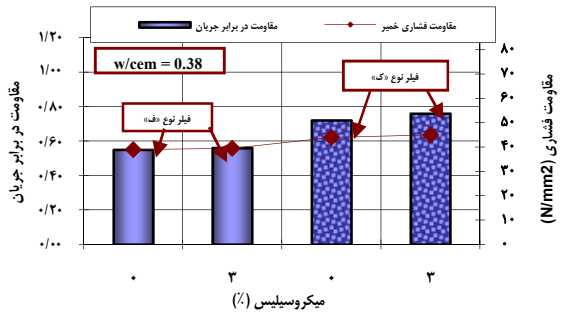
[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

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 ۱ روز	۷ روز	۲۸ روز	نسبت مقاومت فشاری به وزن مخصوص (٪)
270-1	۲۷۰/۰	۰/۳۸	۱۵٤٦	۱٦۹٤	۱۰	٤/۵	11/3	18/8	26/3	1/52
280-1	۲۷۹/۸	۰/۳۸	۱۵۵۳	۱٦۷٦	٤۰	٤/۵	7/8	15/5	23/0	1/41
290-1	۲۹۰/۰	۰/۳۸	۱۵٦۰	۱۵۹۳	٦۰	٤/۰	5/5	15/8	18/0	1/13
300-1	۳۰۰/۰	۰/۳۸	۱۵٦۷	۱٦۷۲	۷۰	۳/۵	6/3	13/8	21/3	1/30
310-1	۳۱۰/۱	۰/۳۸	۱۵۷۳	۱۷۰۰	۱٦۰	۳/۵	6/5	17/0	22/5	1/37
325-1	۳۲۵/۱	۰/۳۸	۱۵۸٤	۱۷۰۵	۱۵۰	۳/۰	8/0	20/8	25/5	1/55
280-2	۲۸۰/۸	۰/۳٤	۱۵٦۱	۱٦٤۹	۳۵	۳/۵	8/0	15/3	18/8	1/13
290-2	۲۹۰/۸	۰/۳٤	۱۵٦۸	۱٦۲۸	۲۵	۳/۵	8/8	17/5	20/8	1/28
300-2	۳۰۲/۸	۰/۳٤	۱۵۷٦	۱۷۰۱	٤۵	۲/۵	11/8	22/3	22/9	1/34
312-3	۳۱۲/٤	۰/۳٤	۱۵۸۲	۱٦٦۳	۲۷۰	۲/۵	11/8	22/5	23/0	1/32
325-2	۳۲٦/۳	۰/۳٤	۱۵۹۳	۱٦۰٦	٦۵	۲/۵	10/3	20/3	22/5	1/35
350-2	۳۵۰/۰	۰/۳٤	۱٦۰۹	۱۷۱۸	۹۵	۳/۰	8/5	23/5	26/5	1/55



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

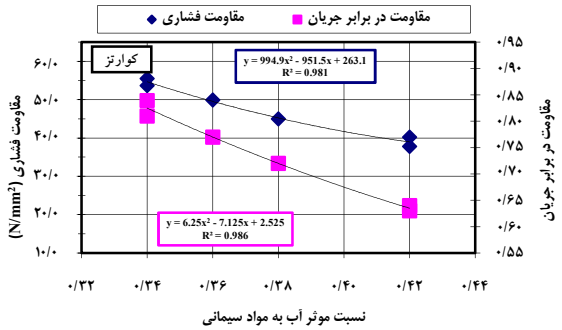


شکل (۸) تأثیر استفاده از دوده‌سیلیس بر مقاومت فشاری و مقاومت در برابر جریان

نسبت آب به مواد سیمانی و مقاومت در برابر جریان:

به‌طور کلی برای هر دو نوع فوق‌روان‌کننده و هر دو نوع 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 ۰/۳٤ تا ۰/٤۲، تأثیر نسبت w/c، روی مقاومت در برابر جریان، بیش‌تر از تاثیر 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 کوارتز)

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

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 کارآیی)، برای سبک‌دانه‌های رس منبسط‌شده مورد بررسی در این تحقیق (Leca-250)، قابل استفاده است.

مُدل ارائه شده (رابطه ۹) با ساخت مخلوط‌های مختلفی با مقادیر λ_Q متفاوت، سبک‌دانه‌ی متفاوت و مدول فضای خالی مختلف (با توجه به محدودیت‌های موجود)، کالیبره و ارزیابی شد. نتایج حاصل، بیانگر تطابق خوب این مُدل براساس مقادیر ثابت جدید به‌دست 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.

$$K_p = (n-m).\{\tanh[2\,\alpha\,(F_p - H_m) - 1] + 1\}/2 + m \qquad (۹)$$

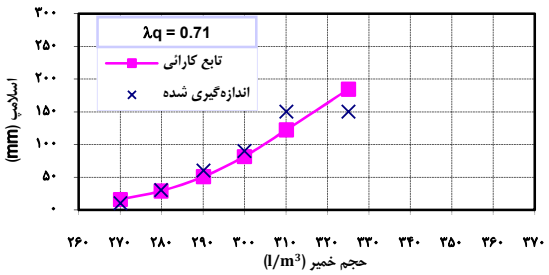
m,n: به ترتیب مقادیر حد بالا و پایین کارایی (اسلامپ) ؛

F_p: حجم خمیر؛

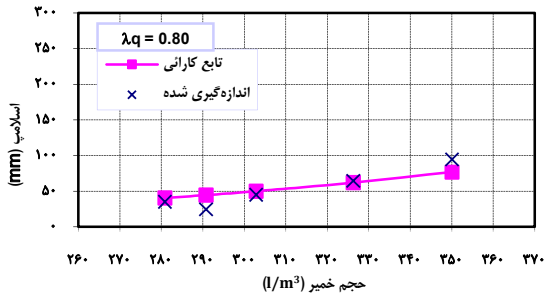
H_m: مدول فضای خالی ذرات که از رابطه زیر به‌دست می‌آید:

$$H_m = V_f\,(H_f/(Fm_f)0.5 + T_f) + V_c(H_c/(Fm_c)0.5 + T_c)$$

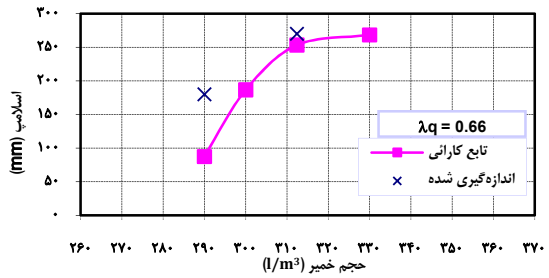
در آن متغیرها، مشابه معادله ٤ تعریف می‌شود.



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

$$\alpha = K_1.e^{-k2\ \lambda Q}$$

که در آن:

λ_Q: نسبت مقاومت در برابر جریان و

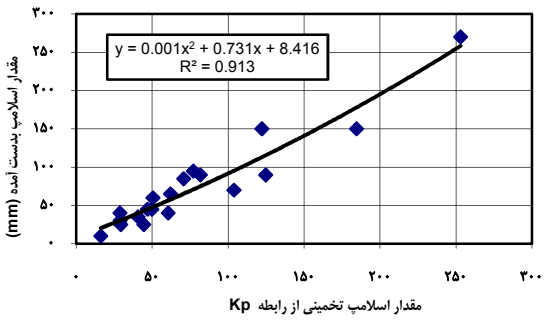
K_1 و K_2: اعداد ثابت از طریق تحلیل رِگراسیون. نتایج آزمایش‌ها به این شرح به‌دست آمده است.

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

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

T_f و T_c ضرایب ثابت ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها است (رابطه ٤) که به‌وسیله آزمون و خطا برای تعیین مدول فضای خالی ذرات (H_m) به‌کار می‌روند؛ و R^2 ضریب همبستگی است (شکل ۱۳).



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

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

۵- نتیجه‌گیری

۱- نتایج به‌دست آمده نشان می‌دهد مُدل پیشنهادی که براساس فرضیه دوفازی ارائه شده، می‌تواند برای طرح مخلوط بتن سبک‌دانه حاوی رس منبسط‌شده تولید کشور به‌کار رود.

۲- روش پیشنهادی، قابلیت استفاده برای دیگر انواع سبک‌دانه را نیز دارد ولی باید براساس مطالعات آزمایشگاهی، این مُدل برای هر مورد به‌شکل جداگانه کالیبره شود.

۳- 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 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؛ به‌عبارت 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.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

[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 Lightwieght 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., Gjørv, 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] Smepless S., "Applicability of the particle-matrix model to LWAC", Brite-Euram Project BE96-3942 Eurolightcon, Report BE 96-3942-R12, 2000.

[12] Mørtsell 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.

[13] Smepless 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.

[١٦] 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., Ramezanianpour 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.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]

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

A.M. Raeiss Ghasemi[1*], T. Parhizkar[2], H. Famili[3]

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

raiisghasemi@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.

[Downloaded from mcej.modares.ac.ir on 2024-04-20]