



دانشگاه تهران

۲۶ و ۲۷ بهمن ماه ۱۳۹۰
نالز شهید چمران - انستیتو مصالح ساختمانی
پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران



اولین کنفرانس ملی بتن سبک

طرح اختلاط بتن‌های سبکدانه با استفاده از مدل دو فازی

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

^۱ پژوهشگر مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن،

^۲ استادیار مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن،

^۳ استادیار دانشکده عمران - دانشگاه علم و صنعت ایران.

چکیده

یکی از دغدغه‌های اکثر طراحان در تعیین نسبت اختلاط اجزا بتن‌های سبکدانه، استفاده از روش یا روابطی است که با کمک آن امکان دستیابی به روانی و مقاومت فشاری مورد نظر در بتن‌های سبک حاوی سبکدانه، با دقت قابل قبولی فراهم شود و نیاز به ساخت تعداد زیادی مخلوط آزمایشی نیز نداشته باشد. 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 بر اساس مدل دو فازی (خمیر و دانه) بوده و بدلیل 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، جهت دستیابی به حداقل فضای خالی انتخاب می‌شود، لذا از حداقل خمیر سیمان برای دستیابی به الزامات فوق استفاده شده و از نظر اقتصادی نیز، سبب صرفه‌جویی می‌شود.

کلمات کلیدی: بتن سبکدانه، رس منبسط شده، سبکدانه، قیف جریان، خمیر سیمان

۱- مقدمه

تاریخچه کاربرد سبکدانه در مصالح ساختمانی، به قبل از میلاد برمی‌گردد، اما از قرن ۱۸ و ۱۹، کاربرد انواع سبکدانه (به خصوص سبکدانه‌های مصنوعی) در بتن توسعه یافت [۱ و ۲].
به طور کلی در اکثر منابع اروپائی، بتن سبکدانه به بتنی با جرم حجمی خشک کمتر از 2000 kg/m^3 و در منابع آمریکائی به بتنی با وزن مخصوص کمتر از 1850 kg/m^3 اطلاق می‌شود [۳ و ۵]. براین اساس، بتن‌های سبکدانه دارای جرم حجمی حدود 300 تا 2000 kg/m^3 ، مقاومت فشاری (مکعبی) ۱ تا بیش از ۶۰ مگاپاسکال و ضریب هدایت حرارتی $0/1$ تا w/m^2k می‌باشند [۴]. معمول‌ترین روش برای کاهش جرم حجمی بتن (به خصوص بتن سازه‌ای)، جایگزین کردن قسمتی از سنگدانه‌های معمولی (با وزن معمولی) با سنگدانه‌های سبک می‌باشد.

^۱ - مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، صندوق پستی ۱۶۹۶-۱۳۱۴۵، raissghasemim@bhrc.ac.ir

در سال‌های اخیر تلاش‌های زیادی جهت ارائه روشی جدید برای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن‌های سبکدانه به عمل آمده و سعی شده‌است که حتی‌الامکان تاثیر ویژگی‌های انواع سبکدانه‌ها را در آن، لحاظ کرد. از مهمترین پارامترهای موثر، شکل دانه‌ها و جذب آب زیاد آن‌ها است که می‌تواند در خواص بتن‌های تازه و سخت شده موثر باشد [۸، ۹ و ۱۰]. برای تعیین نسبت‌های اختلاط بتن‌های سبکدانه و به خصوص بتن سبکدانه توانمند، روشی که بتواند تاثیر خواص انواع سبکدانه‌ها را در نظر گرفته و امکان دستیابی به الزامات مورد نظر (کارایی و مقاومت) را داشته‌باشد، وجود ندارد. در اکثر 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 توسط کمیته ACI 211-2 می‌باشد. این روش، هم از لحاظ عدم در نظر گرفتن نوع و خواص سبکدانه و هم بدلیل عدم توجه به رویکرد جهانی برای کاربرد بتن‌های توانمند سبکدانه، دارای محدودیت‌هایی می‌باشد [۷]. بر اساس توصیه ACI 213، جهت دستیابی به مقاومت‌های بیش از 35 MPa، مصرف ۴۰۰ تا 500 Kg/m³ سیمان توصیه می‌شود. همچنین این منبع مصرف سیمان بیش از 600 Kg/m³ را برای کسب مقاومت‌های زیاد پیش‌بینی کرده‌است. در حالت عادی، بتن سبکدانه دارای مقاومت فشاری ۲۱ تا ۲۸ مگاپاسکال است که می‌توان با تمهیداتی آن را افزایش داد [۶].

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

۲- مدل خمیر - دانه

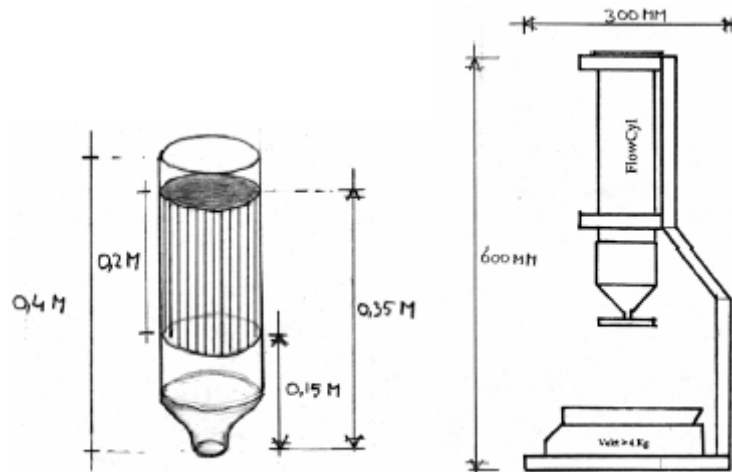
یکی از پارامترهای مهم در طرح بتن‌های سبک، ایجاد روانی کافی در عین حفظ انسجام و کارایی می‌باشد. کارایی بتن تحت تاثیر خصوصیات ذاتی مواد تشکیل دهنده، نسبت اختلاط و آندرکنش شیمیایی و فیزیکی بین آن‌ها قرار می‌گیرد. ساده‌ترین راه مدل کردن چنین سیستم پیچیده‌ای، آن است که بتن تازه را به صورت یک ماده دو فازی 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 نیز می‌باشد)، و «فاز دانه» یا «مواد دارای اصطکاک» که شامل سنگدانه‌های بزرگتر از ۰/۱۲۵ میلی‌متر می‌باشد.

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. بر این اساس امکان دستیابی به خواص رئولوژی و مکانیکی بتن براحتی امکان پذیر خواهد بود. به نظر می‌رسد این مدل مخصوصاً برای بتن توانمند که اساساً تاثیر کاهش فاز خمیر و کاهش نسبت آب به مواد سیمانی، در آن مهم می‌باشد، بسیار مناسب است.

در مدل دو فازی خمیر و دانه، خواص بتن با کمک دو پارامتر کنترل می‌شود، «خواص خمیر»، که با پارامتر نسبت مقاومت در برابر جریان (λ_Q)، و «خواص دانه» که با پارامتر مدول فضای خالی ذرات (H_m) تعیین می‌شود. در ادامه به صورت گذرا به تشریح آن‌ها پرداخته شده است [۲۱].

۱-۱- مقاومت در برابر جریان (λ_Q)

مقاومت در برابر جریان توسط یک قیف مخصوص (قیف جریان) اندازه‌گیری می‌شود. این قیف از استوانه‌ای فلزی که انتهای آن، به یک قیف متصل می‌باشد، تشکیل شده‌است. قطر قسمت استوانه‌ای، ۸۰ میلی‌متر و قطر قسمت خروجی قیف، ۸ میلی‌متر می‌باشد (شکل ۱).



شکل ۱- قیف جریان، جهت تعیین مقاومت در برابر جریان خمیر (λQ) [۱۲]

قیف بصورت 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 می‌گردد. از آنجائی 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 می‌باشد، در محاسبات در نظر گرفته می‌شود [۲۱].

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

۱-۲- مدول فضای خالی ذرات (H_m)

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

نتایج تحقیقات [۱۱ و ۱۲] نشان می‌دهد، کارائی بتن را می‌توان به مازاد خمیر موجود در بتن، نسبت به حالت «بدون اسلامپ» نسبت داد. عبارت دیگر، یک حداقل خمیری برای پوشانیدن سطح دانه‌ها و اتصال آن‌ها به یکدیگر نیاز می‌باشد، که در اصطلاح به این حالت، بتن «بدون اسلامپ»، اطلاق می‌گردد. افزایش مقدار خمیر، سبب افزایش میزان کارائی می‌شود.

اما در عمل تناسبات پیچیده بیشتری بین نسبت فضای خالی فاز دانه‌ها و حجم خمیر، در حالت «بدون اسلامپ» وجود دارد، که می‌تواند به دلیل تغییرات محسوس در اندازه و یا توزیع اندازه ذرات سنگدانه‌ها باشد. از آنجایی که کارایی بیشتر به سرعت زیاد نیروی برشی وابسته است، تا به تراکم سیستم دانه‌ها، بنابراین، ممکن است مشخصات اصلی سنگدانه‌ها که متأثر از تداخل دانه‌ها است، اهمیت بیشتری در کارایی بتن داشته باشد، تا تراکم سنگدانه‌ها.

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 بگونه‌ای که بیان‌کننده حجم خمیر متناظر برای انتقال از حالت بدون کارایی به کارایی کم باشد، اصلاح می‌گردد. رابطه مدول فضای خالی در زیر ارائه شده است.

$$H_m = v_f (H_f / \sqrt{Fm_f} + T_f) + v_c (H_c / \sqrt{Fm_c} + T_c) \quad (۱)$$

که در آن :

V_c و V_f : درصد حجمی ریزدانه‌ها و درشت دانه‌ها
 H_c و H_f : نسبت فضای خالی ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها
 T_f : پارامتر کالیبراسیون ریزدانه‌ها (ذرات بین ۴ تا ۰/۱۲۵ میلی متر)
 T_c : پارامتر کالیبراسیون درشت‌دانه‌ها (ذرات بزرگتر از ۴ میلی متر)
 F_{m_c} و F_{m_f} : مدول نرمی ریزدانه و درشت دانه

۱-۳- تابع کارائی

بر اساس مدل خمیر-دانه، از ترکیب خمیر با دانه‌ای با ویژگی‌های مشخص، کارائی بتن بطور منحصر بفردی، تابعی از نسبت حجمی فاز خمیر به دانه خواهد بود. اما نکته مهم ارائه مدل ریاضی با دقت مناسب جهت بیان این وابستگی می‌باشد. Mortsell از تابع تانژانت هیپربولیک، جهت تعریف تابع کارائی استفاده نمود. این تابع به شکل نمودار «S» ظاهر می‌شود. در شکل ۵ نمونه‌ای از این تابع ارائه شده‌است که مقدار اسلامپ را در برابر حجم خمیر، نشان می‌دهد.

تابع کارائی (K_p) که توسط Mortsell ارائه شده، بصورت زیر می‌باشد [۱۲]:

$$K_p = (n-m) \cdot [\tanh(x)+1]/2 + m \quad (۲)$$

که در آن:

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

x : متغیر تابع که طبق رابطه ذیل تعریف می‌شود:

$$x = \alpha (2 \cdot F_p - 1 - \beta) \quad (۳)$$

که در آن:

F_p : حجم خمیر؛

α : ضریب شیب تابع کارایی، طبق رابطه (۴)؛

β : پارامتر مربوط به حالت «بدون اسلامپ»، طبق رابطه (۵).

$$\alpha = K_1 \cdot e^{-K_2 \lambda_Q} \quad (۴)$$

که در آن:

λ_Q : نسبت مقاومت جریان؛

K_1 و K_2 : ضرائب ثابت، که از طریق تحلیل رگرسیون یک سری داده به دست می‌آید.

$$\beta = 2 \cdot H_m - 1 + 1/\alpha \quad (۵)$$

که در آن:

H_m : مدول فضای خالی ذرات است.

۳- مطالعات آزمایشگاهی

در این مقاله، بخشی از نتایج مطالعات انجام شده در خصوص کاربرد مدل خمیر-دانه، برای نمونه‌هایی از لیکای تولید کشور، ارائه شده‌است. در این مقاله به بررسی امکان کاربرد این مدل، برای لیکای رده Leca 650 (با جرم حجمی انبوهی 650 kg/m^3) پرداخته شده‌است.

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

با توجه به اینکه، با تغییر در مشخصات مصالح اولیه، ضرائب ثابت تابع کارائی (K_p) نیز می‌تواند تغییر کند و سبب عدم انطباق این مدل با آن نوع سبکدانه شود، لازم است تا این پارامترها با توجه به مصالح مورد نظر کالیبره شوند.

۴-۱- برنامه آزمایشگاهی

در تحقیق انجام شده، نوع فوق‌روان کننده، نوع فیلر و همچنین نسبت آب به سیمان، به عنوان پارامترهای متغیر بوده و نوع سیمان، سبکدانه و سنگدانه ریز، ثابت در نظر گرفته شده‌است. در بخش اول، مشخصات سبکدانه، فیلر و سیمان تعیین گردید، در بخش دوم، جهت انتخاب خمیر مناسب (از نظر مقاومت در برابر جریان و مقاومت فشاری) و تعیین مشخصات مورد نیاز، تعدادی مخلوط ساخته و مورد بررسی قرار گرفت. همچنین برای تعیین مدول فضای خالی ذرات، بر اساس تئوری حداکثر چگالی انباشتگی، نسبت اختلاط ترکیب سبکدانه و سنگدانه ریز انتخاب و سپس پارامترهای مورد نیاز محاسبه گردید. در بخش سوم، جهت تعیین ضرائب ثابت تابع کارائی و کالیبره نمودن مدل، تعدادی مخلوط بتن ساخته و خواص بتن تازه و سخت شده بدست آمد. شایان ذکر است، برای انتخاب نوع و مشخصات خمیر از نتایج قبلی [۲۱] استفاده و در این مقاله نتایج مربوط به خمیر ارائه نشده است.

۵-۱- مشخصات مواد و مصالح

سیمان: سیمان مورد استفاده، سیمان نوع ۱ بوده که از کارخانه سیمان تهران تهیه شده است. در جدول ۱ مشخصات شیمیائی و مکانیکی آن، که طبق استانداردهای ملی ایران آزمایش شده، ارائه شده است.

مواد افزودنی شیمیائی: فوق‌روان کننده مورد استفاده بر پایه لیگنوسولفونات بوده که بصورت اختصاری با R نشان داده می‌شود، مشخصات آن در جدول ۲ ارائه شده است.

جدول ۱- خواص سیمان نوع ۱ مصرفی

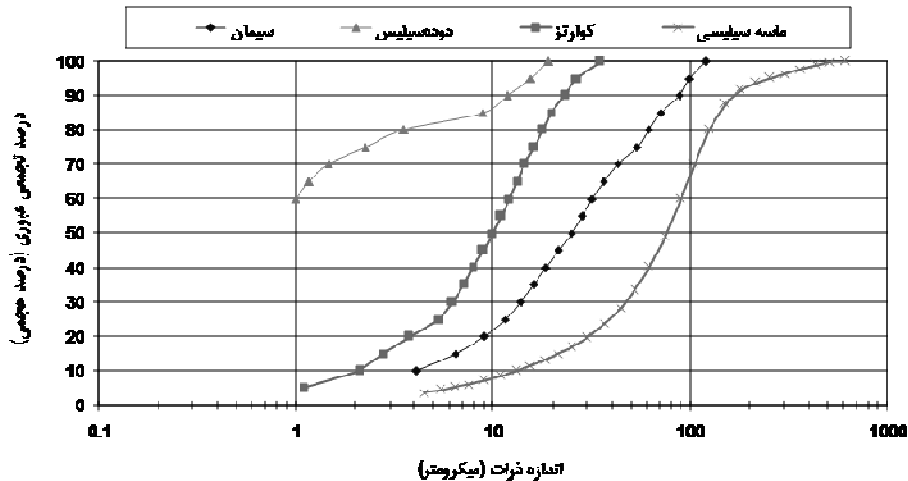
خواص شیمیائی	نتایج آزمون
% SiO ₂	۱۹/۹۴
Al ₂ O ₃ %	۴/۱۲
% Fe ₂ O ₃	۴/۰۸
% MgO	۴/۲۵
% CaO	۶۰/۱۵
% SO ₃	۲/۰۳
افت ناشی از سرخ شدن %	۴/۱۰
باقی مانده نامحلول %	۰/۷۰
خواص مکانیکی	نتایج آزمون
مقاومت فشاری ۲۸ روزه kg/cm ²	۴۱۰

جدول ۲- مشخصات فیزیکی، شیمیائی و محدوده مصرف توصیه شده مواد افزودنی فوق‌روان کننده

نام افزودنی	رنگ	وزن مخصوص، kg/m ³	pH	کلرید %	درصد مصرف (نسبت به وزن سیمان)
R	قهوه‌ای	۱/۱۹۵ تا ۱/۲	-	۰	۰/۳ تا ۱/۸

فیلر: اگرچه در تحقیق انجام شده تاثیر کاربرد دو نوع فیلر سیلیسی با دانه‌بندی‌های متفاوت و یک نمونه دوده‌سیلیس (به عنوان فیلر) مورد بررسی قرار گرفته، ولی در این مقاله تنها نتایج کاربرد یک نوع فیلر سیلیسی به همراه دوده‌سیلیس، ارائه شده‌است، در شکل ۲ منحنی دانه‌بندی انواع فیلر مورد استفاده ارائه گردیده‌است. در این پروژه هدف از کاربرد دوده‌سیلیس بیشتر ایجاد چسبندگی و لزجت در خمیر سیمان می‌باشد و خواص پوزولانی آن در درجه دوم اهمیت قرار دارد.

سنگدانه: سنگدانه‌های مورد استفاده، از نظر وزنی به دو گروه سنگدانه‌های با وزن معمولی (وزن مخصوص بیشتر از 2 g/cm³) و سبکدانه‌ها (وزن مخصوص کمتر از 2 g/cm³) تقسیم می‌شوند.



شکل ۲- منحنی دانه‌بندی انواع فیلر، دوده سیلیس و مقایسه آن با دانه‌بندی سیمان مصرفی - سنگدانه‌های طبیعی (با وزن مخصوص بیشتر از 32g/cm³)

سنگدانه ریز (ماسه) مورد مصرف از نوع گردگوشه و رودخانه‌ای بوده که مشخصات آن در جدول ۳ ارائه شده است. منحنی دانه‌بندی آن نیز در محدوده استاندارد ایران می‌باشد.

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

سبکدانه‌های رس منبسط شده (Leca)

سبکدانه‌های مورد استفاده در این تحقیق از نوع رس منبسط شده بوده، که توسط شرکت لیکای ایران تولید شده است. این سبکدانه‌ها در جرم حجمی انبوهی ۲۵۰ تا 750 Kg/m³ قابل تولید می‌باشد، که در این مقاله نتایج آزمایش‌های انجام شده با لیکای 650 Kg/m³ ارائه شده است. کلیه آزمایش‌ها بر اساس استانداردهای [EN14] انجام شده است. منحنی دانه‌بندی سبکدانه‌ها، در شکل ۳ و مشخصات آن‌ها در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- نتایج آزمایش‌های تعیین وزن مخصوص ظاهری، جذب آب، جرم حجمی انبوهی و درصد حفرات سبکدانه‌ها

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	
۲/۱۴	۳۲/۵	۶۴۹/۰	۱۰/۳۲	۷/۷۱	۹۶۱/۴	۸۹۷	10-20 mm
۵/۴۴	۴۳/۳	۶۵۳/۲	۱۱/۷۰	۱۰/۱۰	۱۱۵۲/۹	۱۰۴۰/۵	4-10 mm
۷/۵۳	۵۵/۸	۶۴۶/۶	۱۴/۳۱	۱۴/۳۱	۱۴۶۳/۳	۱۲۳۴/۵	2-4 mm

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

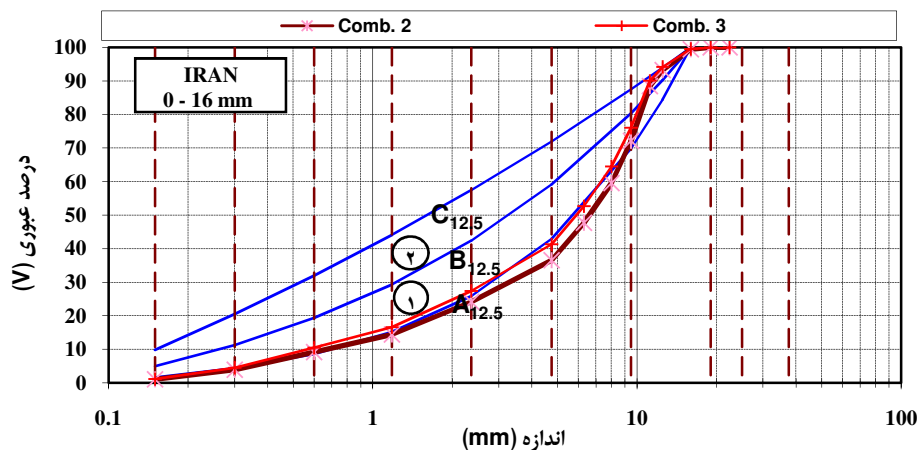
۷-۱- تعیین نسبت اختلاط سنگدانه‌ها و مدول فضای خالی

پس از بررسی تاثیر پارامترهای مورد نظر بر خواص خمیر و سپس انتخاب خمیر مناسب، نیاز به تعیین نسبت اختلاط سنگدانه‌ها (اعم از سبک و معمولی) و سپس تعیین مدول فضای خالی (H_m) می‌باشد.

از آنجائی که، دستیابی به حداکثر تراکم با استفاده از توزیع دانه‌ها، چه در بتن‌ها توانمند و چه در این روش از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است، با توجه به مطالعات قبلی [۱۶ و ۱۷] برای ساخت بتن‌های توانمند با استفاده از روش حداکثر چگالی انباشتگی، از منحنی اصلاح شده فولر و تامسون استفاده شد. در این روش، توزیع ذرات بر اساس دانه‌بندی کل مواد تشکیل دهنده جامد (سنگدانه، سیمان، مواد افزودنی معدنی، فیلر و...) انجام می‌گیرد. در جدول ۷ سه ترکیب سنگدانه و در شکل ۴ منحنی اصلاح شده فولر و تامسون برای حداکثر اندازه ۱۶ میلی‌متر نشان داده شده‌است. همان‌گونه که مشاهده می‌شود، بعلت دانه‌بندی نامناسب سبکدانه‌های 4-10mm، منحنی ترکیبی، از یکنواختی و توزیع مناسبی برخوردار نمی‌باشد.

جدول ۷- درصد اختلاط سنگدانه‌ها و مشخصات ترکیب آن‌ها

شناسه	درصد اختلاط دانه‌ها			مدول فضای خالی H_m
	Leca 10-20 mm	Leca 4-10 mm	ریزدانه طبیعی 0-4 mm	
Comb. 2	۳۵	۳۲	۳۳	۶/۵
Comb. 3	۳۲	۳۲	۳۶	۶/۳
Comb. 4	۳۰	۳۲	۳۸	۶/۲



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی ترکیب سبکدانه‌های Leca 250 و ریزدانه‌های طبیعی

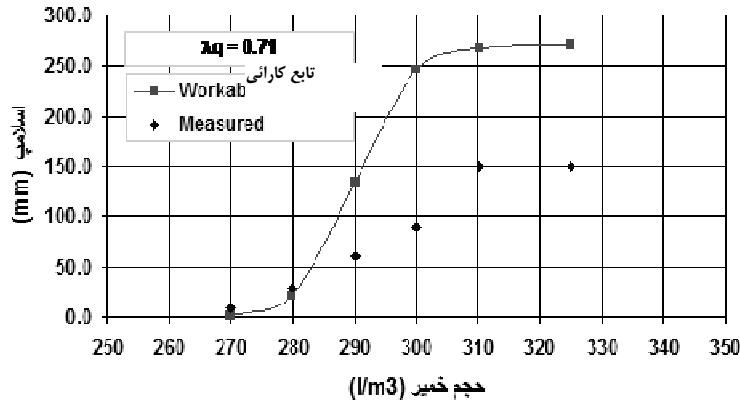
۸-۱- تخمین میزان کارائی بر اساس تابع کارائی (K_p)

رابطه کارائی ارائه شده توسط Mortsell (برای بتن‌ها معمولی)، در پروژه Eurolight Con برای برخی از انواع سبکدانه‌ها مورد آزمایش قرار گرفت [۱۱]. در جدول ۸ پارامترها و ضرایب ثابت رابطه K_p که برای سبکدانه‌های Leca، Liapor و Lytag، در پروژه مذکور بدست آمده، ارائه شده‌است.

جدول ۸- پارامترها و ضرایب ثابت تابع کارائی ارائه شده در پروژه Eurolight Con

R^2	ضرایب ثابت تابع کارائی				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	Lytag

چنانچه از ضرائب ثابت K_1 و K_2 لیکا، که در پروژه فوق بدست آمده، در تخمین کارائی بتن‌های ساخته شده با لیکای ایران استفاده شود، خطایی مشابه نمونه نشان داده شده در شکل ۵ بوجود خواهد آمد. بدین جهت لزوم بررسی قابلیت کاربرد مدل، و کالیبره کردن آن بر اساس مشخصات مصالح داخل کشور مشخص می‌گردد.



شکل ۵- استفاده از رابطه پروژه Eurolight Con و نتایج بدست آمده برای یک نمونه خمیر با $\lambda_Q=0.71$ و لیکای ایران

۹-۱- کالیبراسیون تابع کارائی

مهمترین گام در بررسی امکان کاربرد مدل خمیر - دانه برای سبکدانه‌های تولید کشور کالیبره کردن مدل بر اساس ساخت مخلوط بتن و فرضیات اولیه می‌باشد، تا قابلیت کاربرد مدل، مورد ارزیابی قرار گیرد. کالیبراسیون بر اساس حداقل کردن مجذور تفاضل ثابت‌های K_1 , K_2 در بحث پارامترهای کارایی و ثابت سنگدانه‌ها (T_f , T_c) انجام گردید. سپس مدل بر اساس مقادیر جدید، مجدداً به صورت همزمان کنترل و بهینه گردید. 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 مدل با سبکدانه‌های تولید ایران، با ساخت مخلوط‌های بیشتر امکان پذیر خواهد بود. ساخت مخلوط‌ها بر اساس انتخاب خمیرهای ساخته شده و ترکیب آن‌ها با دانه‌ها می‌باشد. بر اساس نتایج بدست آمده در بند ۳-۳ و [۲۱]، خمیر P14 بعنوان خمیر مناسب انتخاب و با نسبت‌های اختلاط سنگدانه که در جدول ۷ ارائه شده، ترکیب شدند. کلیه نسبت‌های انتخاب شده بر اساس حجم بوده که سپس به نسبت وزنی تبدیل شده‌اند. به منظور کالیبره کردن و بررسی تأثیر حجم خمیر بر خواص بتن تازه و سخت شده، حجم خمیر بین ۳۰۰ تا ۳۲۰ Lit/m³ متغیر در نظر گرفته شد. در جدول ۹ جزئیات طرح مخلوط‌ها ارائه شده است.

نتایج بتن تازه: جهت 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، 10 دقیقه پس از افزودن آب اختلاط، بدست آمد [۱۹، ۲۰]. نتایج مشخصات بتن تازه کلیه طرح‌ها در جدول ۱۰ ارائه شده است.

نتایج بتن سخت شده: آزمایش‌های انجام شده روی بتن سخت شده، شامل: تعیین جرم حجمی بتن پس از خروج از قالب و تعیین مقاومت فشاری در سنین ۱، ۷ و ۲۸ روز می‌باشد. جهت تعیین پارامترهای فوق از نمونه‌های مکعبی به ضلع ۱۰ سانتی‌متر استفاده گردید. نتایج در جدول ۱۰ ارائه شده است.

جدول ۹- نسبت‌های اختلاط و اجزاء تشکیل دهنده بتن سبک‌دانه (Leca 650) و خمیر با $\lambda Q = 0.64$

شناسه مخلوط	سیمان	دوده سیلیس	آب	فیلر	سبک‌دانه mm ۲۰-۱۰	سبک‌دانه mm ۱۰-۴	ریزدانه طبیعی	فوق روان کننده
	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	Kg/m ³	% وزن سیمان
300-2	۳۴۴/۳	۱۰/۳	۱۵۳/۳	۸۸/۷	۲۷۳/۲	۲۴۵/۵	۶۰۰/۷	۱/۳
310-2	۳۵۶/۲	۱۰/۷	۱۵۸/۵	۹۱/۷	۲۳۳/۷	۲۴۱/۹	۵۹۱/۸	۱/۳
310-3	۳۵۶/۲	۱۰/۷	۱۵۸/۵	۹۱/۷	۲۱۳/۷	۲۴۱/۹	۶۴۵/۷	۱/۳
325-3	۳۷۳/۴	۱۱/۲	۱۶۶/۳	۹۶/۲	۲۰۹/۰	۲۳۶/۷	۶۳۱/۶	۱/۳
305-4	۳۵۰/۲	۱۰/۵	۱۵۵/۹	۹۰/۲	۲۱۵/۳	۲۲۸/۵	۶۸۶/۶	۱/۳
310-4	۳۵۶/۰	۱۰/۷	۱۵۸/۵	۹۱/۷	۲۱۳/۷	۲۲۶/۸	۶۸۱/۷	۱/۳
320-4	۳۶۷/۴	۱۱/۰	۱۶۳/۵	۹۴/۶	۲۱۰/۶	۲۲۳/۶	۶۷۱/۹	۱/۳

در شناسه مخلوط‌ها، اعداد سمت چپ بیانگر حجم خمیر و اعداد سمت راست نشان‌دهنده ترکیب سنگدانه می‌باشد.

جدول ۱۰- نتایج آزمایش‌های بتن تازه و سخت شده

نسبت مقاومت فشاری به وزن مخصوص (%)	مقاومت فشاری N/mm ²			میزان هوا %	اسلامت mm	وزن مخصوص بتن تازه Kg/m ³	وزن مخصوص محاسباتی Kg/m ³	نسبت آب به مواد سیمانی	حجم خمیر L/m ³	شناسه مخلوط
	۲۸ روز	۷ روز	۱ روز							
۱/۹۳	۳۴/۰	۲۸/۰	۶/۳	۲/۰	۴۰	۱۷۷۰	۱۶۸۴	۰/۴۲	۲۹۹/۹	300-2
۱/۸۰	۳۱/۵	۲۷/۰	۶/۵	۲/۰	۸۵	۱۷۹۵	۱۶۸۹	۰/۴۲	۳۱۱۰/۲	310-2
۱/۸۴	۳۱/۸	۲۹/۰	۷/۰	۳/۰	۴۰	۱۷۸۶	۱۷۲۳	۰/۴۲	۳۱۰/۲	310-3
۲/۰۱	۳۴/۵	۲۸/۰	۶/۰	۳/۰	۹۰	۱۷۵۰	۱۷۲۹	۰/۴۲	۳۲۵/۲	325-3
۱/۹۸	۳۳/۸	۲۵/۸	۵/۰	۳/۰	۲۵	۱۷۵۹	۱۷۴۲	۰/۴۲	۳۰۵/۰	305-4
۱/۹۲	۳۳/۰	۲۷/۵	۵/۳	۳/۰	۴۵	۱۷۵۵	۱۷۴۴	۰/۴۲	۳۱۰/۱	310-4
۱/۹۶	۳۴/۸	۲۸/۰	۵/۵	۳/۵	۷۰	۱۷۴۸	۱۷۴۸	۰/۴۲	۳۲۰/۰	320-4

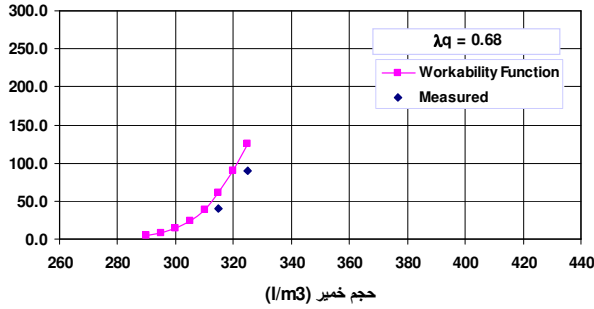
۴- تجزیه و تحلیل نتایج

با توجه به تحقیقات و نتایج بدست آمده در گذشته [۲۱]، در این مقاله تنها به بررسی قابلیت کاربرد مدل خمیر-دانه برای لیکای با وزن مخصوص انبوهی 650 kg/m³ و ارائه مدل پیشنهادی پرداخته می‌شود.

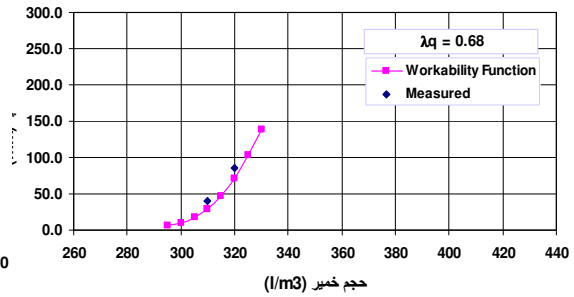
۱۰-۱- قابلیت کاربرد مدل خمیر-دانه و ارائه مدل

چنانچه از مدل خمیر - دانه Mortsell (که برای بتن‌های معمولی ارائه شده) با پارامترها و مقادیر ثابت بدست آمده در پروژه Eurolight Con (جدول ۸)، برای مصالح کشورمان استفاده شود، نتایجی مشابه نمودار شکل ۵ بدست می‌آید که نمی‌تواند در تخمین عملکرد بتن‌های سبک‌دانه موجود در ایران بکار رود. بدین لحاظ لازم است، تا قابلیت کاربرد مدل با استفاده از مشخصات مصالح مورد استفاده و با ساخت نمونه‌های متعدد سنجیده شود.

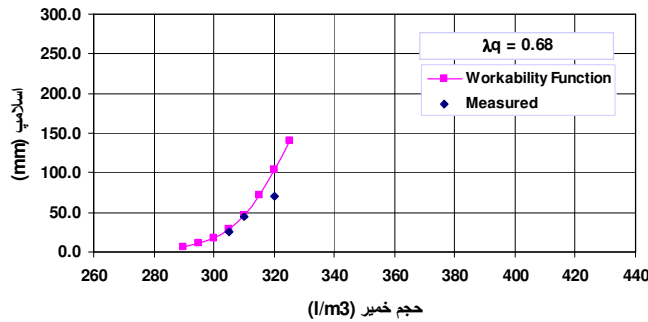
مدل ارائه شده (رابطه ۶)، با ساخت مخلوط‌های مختلفی با مقادیر λQ متفاوت، سبک‌دانه‌های متفاوت و مدول فضای خالی مختلف، کالیبره و مورد ارزیابی قرار گرفت. نتایج حاصله [۲۱]، بیانگر تطابق خوب این مدل بر اساس پارامترهای بدست آمده، با لیکای تولید شده در کشور (Leca 250 و Leca 650) می‌باشد، که در ادامه انطباق آن برای لیکای ۶۵۰ بر اساس پارامترهای پیشنهادی ارائه شده‌است (شکل ۶ الی ۸).



شکل ۷- رابطه بین حجم خمیر و مقدار اسلامپ مخلوط‌های با ترکیب سنگدانه ۳



شکل ۶- رابطه بین حجم خمیر و مقدار اسلامپ مخلوط‌های با ترکیب سنگدانه ۲



شکل ۸- رابطه بین حجم خمیر و مقدار اسلامپ مخلوط‌های با ترکیب سنگدانه ۴

در زیر تابع کارائی، مدول فضای خالی و ضرائب رابطه، برای لیکای رده ۶۵۰ ایران، ارائه شده‌است.

$$K_p = (n-m) \cdot \{ \tanh[2\alpha(F_p - H_m) - 1] + 1 \} / 2 + m \tag{6}$$

که در آن:

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

H_m : مدول فضای خالی ذرات است که از رابطه زیر بدست می‌آید.

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

که در آن متغیرها، مشابه معادله ۱ تعریف می‌شود.

α = ضریب شیب تابع کارایی که طبق رابطه زیر تعریف می‌شود.

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

که در آن:

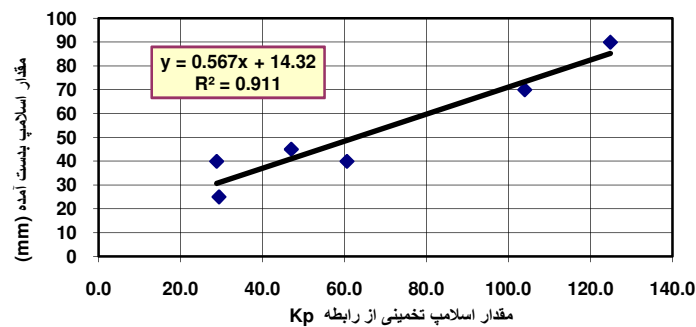
λ : نسبت مقاومت در برابر جریان؛

K_1 و K_2 : اعداد ثابت که از طریق تحلیل رگرسیون نتایج آزمایش‌ها مطابق زیر بدست آمده‌است.

جدول ۱۱- پارامترها و ضرائب ثابت رابطه کارائی برای لیکای رده ۶۵۰

R^2	T_c	T_f	K_2	K_1
۰/۹۱	۵	۵	-۱۷/۲	۳۲۷۰۰۰۰

T_c و T_f ضرائب ثابت ریزدانه‌ها و درشت‌دانه‌ها می‌باشند (رابطه ۱)، که بوسیله آزمون و خطا برای تعیین مدول فضای خالی ذرات (H_m)، به کار می‌روند، و R^2 نیز ضریب همبستگی می‌باشد (شکل ۹).



شکل ۹- رابطه همبستگی بین نتایج اسلامپ بدست آمده و تخمین مقدار اسلامپ از تابع کارائی

همان گونه که در شکل ۹ ملاحظه می‌شود، این معادله می‌تواند تطابق خوبی با مقدار اسلامپ بدست آمده در مخلوط‌های ساخته شده، داشته باشد.

۵- نتیجه گیری

نتایج بدست آمده نشان می‌دهد مدل پیشنهادی که بر اساس فرضیه دو فازی ارائه شده، می‌تواند برای طرح مخلوط بتن سبک‌دانه حاوی رس منبسط شده تولید کشور (رده ۶۵۰) بکار رود. روش پیشنهادی، قابلیت استفاده برای دیگر انواع سبک‌دانه را نیز دارد، ولی باید بر اساس مطالعات آزمایشگاهی این مدل برای هر مورد، به صورت جداگانه کالیبره شود.

در این روش جهت دستیابی به مقدار اسلامپ و مقاومت فشاری مورد نظر، مقدار خمیر سیمان بهینه و درصد اختلاط سنگدانه و سبک‌دانه‌ها انتخاب می‌شوند. بدین منظور خمیر سیمان بهینه، بر اساس پارامتر «مقاومت در برابر جریان» و «مقاومت فشاری» مورد نیاز، و درصد اختلاط سنگدانه و سبک‌دانه‌ها، برای دستیابی به «حداقل فضای خالی» تعیین می‌گردند. با توجه به مراتب فوق در این روش طرح مخلوط، از حداقل خمیر سیمان استفاده می‌شود. بعبارت دیگر در این روش، بر خلاف سایر روش‌های طرح مخلوط بتن سبک‌دانه، سیمان کمتری مورد مصرف قرار می‌گیرد و لذا از نظر اقتصادی نیز مقرون به صرفه می‌باشد.

۶- تقدیر و تشکر

از مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن برای فراهم نمودن امکانات و تجهیزات مورد نیاز برای انجام این تحقیق و همچنین شرکت لیکای ایران جهت تولید لیکای مورد نیاز، تشکر و قدردانی می‌گردد.

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. Grhtzcek, Ed, 37-41, 1994.
- ۲- محسن تدین، « بررسی و ارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پواسون و شدت خوردگی بتن سبک پر مقاومت با مصالح موجود در ایران»، پایان نامه 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.
- 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., Gjørsv, O.E., "Effect of water absorption by aggregate on properties of highstrength 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-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- 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., RaissGhasemi A. M., Ramezani pour 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.
- ۲۱- رئیس قاسمی، پرهیزکار، فامیلی، «ارائه مدل دو فازی خمیر - دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبکدانه حاوی لیکا»، مجله علمی - پژوهشی عمران مدرس، دوره یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰، صفحه ۱-۱۶.