

# بهینه سازی طرح مخلوط بتن بدون اسلامپ با رویکرد اقتصادی

## با استفاده از الگوریتم ژنتیک



مازیار زرعی چیان  
دانشجوی دکتری عمران  
مهندسی و مدیریت ساخت  
دانشگاه علم و صنعت ایران



محمدعلی اعتباری قصبه  
دانشجوی کارشناسی ارشد عمران  
مهندسی و مدیریت ساخت  
دانشگاه علم و صنعت ایران



علی اکبر شیرزادی جاوید  
استادیار دانشکده مهندسی عمران  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
عضو انجمن بتن ایران



پرویز قدوسی  
استاد دانشکده مهندسی عمران  
دانشگاه علم و صنعت ایران  
رییس هیات مدیره انجمن علمی بتن ایران

### چکیده

رسیدن به طرح مخلوط بتن همواره یکی از چالش‌های مهم در صنعت بوده است. روش‌های مختلفی برای رسیدن به طرح مخلوط بتن وجود دارد اما اکثر این روش‌ها همواره تنها مقاومت فشاری بتن را در نظر می‌گیرند. با توجه به لزوم کنترل هزینه پروژه‌ها و مسائل اقتصادی، به روش‌های نوین به منظور رسیدن به طرح مخلوط مورد نظر با رویکرد اقتصادی نیاز است. یکی از این روش‌ها استفاده از الگوریتم‌های فرا ابتکاری است. در این پژوهش با استفاده از الگوریتم ژنتیک یک روش برای رسیدن به طرح مخلوط بتن بدون اسلامپ با مقاومت هدف ۶۰ مگاپاسکال و با رویکرد اقتصادی ارائه شده است. نتایج نشان می‌دهد که این روش‌ها می‌توانند بیش از ۱۰ درصد در مقدار هزینه بتن صرفه جویی کرده و جایگزین مناسبی برای روش‌های سنتی باشند و به کاهش هزینه‌های پروژه کمک کنند.

کلمات کلیدی: بتن بدون اسلامپ، بهینه یابی، طرح مخلوط، الگوریتم ژنتیک

### ۱. مقدمه

بتن بدون اسلامپ، بتنی با اسلامپ بسیار پایین یا اسلامپ صفر است که عموماً برای مقاصد پیش ساخته مورد استفاده قرار می‌گیرد [۱]. با توجه به ACI 211.3 بتن بدون اسلامپ، اغلب به عنوان بتن خشک شناخته می‌شود به طوری که اسلامپ این بتن در محدوده ۰-۲۵ میلی‌متر است [۲]. در کارخانه‌های بتن پیش ساخته نیاز است تا قالب بتن هرچه سریعتر پس از بتن‌ریزی برداشته شود تا زمان فرآیند تولید بتن به حداقل برسد. از این رو در این صنعت، بتن بدون اسلامپ کاربرد فراوانی دارد. این روش در صنایع تولید لوله‌های بتنی و نظیر آن بسیار مورد استفاده قرار

می‌گیرد. می‌توان گفت مهم‌ترین مشخصه بتن بدون اسلامپ مقاومت فشاری آن است که این مشخصه به طور مستقیم به اجزای مخلوط بتن وابسته است. از طرفی برای به حداقل رساندن هزینه ساخت بتن و مسائل اقتصادی بسیار حائز اهمیت است که طرح مخلوط بتن بهینه باشد تا بتوان با کمترین هزینه به مقاومت مورد نظر رسید.

روش‌های مختلفی برای تعیین نسبت مخلوط بتن وجود دارد که اکثر آنها بر اساس نتایج آزمون‌های تجربی بوده و فاکتور هزینه در آن‌ها دیده نشده است. بنابراین می‌توان نتیجه گرفت این روش‌ها برای ارائه طرح مخلوط بتن کافی نبوده و روش‌های نوین با در نظر گرفتن فاکتور هزینه نیاز ضروری است.

پارامترهای ورودی آن‌ها مقدار سیمان، آب، میکروسیلیس، سنگدانه درشت (شن)، سنگدانه ریز (ماسه) و فیلر می‌باشد. آن‌ها ۴ رابطه برای پیشبینی مقاومت فشاری بتن بدون اسلامپ ارائه کردند که در بین آنها رابطه خطی درجه ۲ با توجه به مقدار خطا به عنوان بهترین مدل انتخاب شد.

## ۲. روش تحقیق

در این پژوهش با استفاده از رابطه ارائه شده توسط سبحانی و همکاران [۱] برای پیش بینی مقاومت فشاری بتن بدون اسلامپ و در نظر گرفتن رابطه هزینه بتن، سعی در کمینه کردن هزینه تولید بتن با مقاومت مورد نظر شده است.

رابطه مقاومت فشاری بتن بدون اسلامپ که توسط سبحانی ارائه شده است به صورت زیر است:

$$F_c = a_0 + a_1C + a_2SF + a_3W + a_4FA + a_5CA + a_6FI + a_7C^2 + a_8SF^2 + a_9W^2 + a_{10}FA^2 + a_{11}CA^2 + a_{12}FI^2$$

که در این رابطه:

$F_c$  = مقاومت فشاری ۲۸ روزه

$C$  = سیمان

$SF$  = میکروسیلیس

$W$  = آب

$FA$  = سنگدانه ریز (ماسه)

$CA$  = سنگدانه درشت (شن)

$FI$  = فیلر

ضرایب  $a_0 \dots a_{12}$  که توسط رگرسیون به دست آمده اند

در جدول ۱ ارائه شده است.

از جمله روش‌های نوین میتوان به الگوریتم‌های هوشمند اشاره کرد. لیم ۱ و همکاران [۳] با استفاده از الگوریتم ژنتیک طرح مخلوط بتن HPC را بهینه یابی کرده‌اند. آن‌ها در ابتدا با استفاده از نتایج آزمایشگاهی و استفاده از رگرسیون، روابطی را برای مقاومت فشاری ۲۸ روزه و اسلامپ بتن به دست آورده و سپس با استفاده از الگوریتم ژنتیک این روابط را بهینه یابی کرده‌اند.

اوزبای ۲ و همکاران [۴] با استفاده از روش تاگوچی، یک بهینه سازی چند هدفه با در نظر گرفتن خواص بتن بر روی بتن خودتراکم با مقاومت بالا انجام داده‌اند و علاوه بر آن میزان اهمیت هر پارامتر ورودی بر روی پارامتر خروجی را بررسی کرده‌اند. پارامترهای ورودی آن‌ها نسبت آب به سیمان، مقدار آب، نسبت سنگدانه ریز به کل سنگدانه، مقدار خاکستر بادی، هوازا و فوق روان کننده و پارامترهای خروجی آنها مقدار جذب آب بتن، آزمون اولتراسونیک، مقاومت فشاری، مقاومت کششی و آزمون نفوذ آب است. در این تحقیق با استفاده از روش تاگوچی دریافتند که نسبت آب به سیمان بیشترین اثر را نسبت به پارامترهای ورودی دیگر بر پارامترهای خروجی دارد.

یه ۳ و همکاران [۵] توانستند با استفاده از الگوریتم ژنتیک و به کارگیری دو رابطه برای مقاومت فشاری و هزینه برای بتن معمولی، طرح مخلوط بتن را بهینه یابی کنند.

کنون ۴ و مورتی ۵ [۶] نیز به بهینه سازی طرح مخلوط بتن با الگوریتم های هوشمند پرداختند. آنها با در نظر گرفتن روابط مقاومت بتن و کارایی بتن یک برنامه کامپیوتری ایجاد کرده تا به طرح مخلوط بهینه با کمترین هزینه دست یابند.

سبحانی و همکاران [۱] با استفاده از داده‌های آزمایشگاهی، روابط خطی و غیر خطی را برای مقاومت بتن بدون اسلامپ ارائه داده‌اند. این روابط براساس مقادیر طرح مخلوط بوده به صورتی که

1 Lim

2 Ozbay

3 Yeh

4 Cannon

5 Murti

جدول ۱- مقادیر ضرایب رابطه مقاومت فشاری

a0	a1	a2	a3	a4	a5	a6	a7	a8	a9	a10	a11	a12
-3.665	1.563	-0.292	0.662	-1.72	8.627	-0.446	-1.013	0.736	-0.787	5.337	-5.198	0.703

سبحانی و همکاران [۱] برای ارائه رابطه بهتر و بالا بردن دقت مدل، قبل از انجام رگرسیون، داده ها را پیش پردازش کرده اند به این صورت که داده ها طبق رابطه زیر در محدوده ۰,۱ تا ۰,۹ نگاشت می شود.

$$i_M = 0.1 + 0.8 \times (i_R - i_{min}) / (i_{max} - i_{min})$$

که در این رابطه:

جدول ۲- مقادیر کمینه و بیشینه پارامتر های ورودی و خروجی مدل رگرسیون

پارامتر	کمترین مقدار (کیلوگرم)	بیشترین مقدار (کیلوگرم)
سیمان	۲۵۲,۶	۴۱۰
میکروسیلیس	۰	۲۷,۳
آب	۹۵	۱۳۹,۷
سنگدانه ریز (ماسه)	۳۵۴,۲	۱۳۰۰
سنگدانه درشت (شن)	۶۰۰	۱۴۴۰,۶
فیلر	۰	۱۸۸
مقاومت فشاری ۲۸ روزه	۵۰	۷۸
نسبت آب به سیمان	۰,۲۷	۰,۴

$$\text{MIN Cost} = P_{CC} + P_{SF}SF + P_{WW} + P_{FAFA} + P_{CACA} + P_{FIFI}$$

که در این رابطه  $P_{CC}, P_{SF}, P_{WW}, P_{FAFA}, P_{CACA}, P_{FIFI}$  به ترتیب هزینه یک کیلوگرم از سیمان، میکروسیلیس، آب، سنگدانه ریز (ماسه)، سنگدانه درشت (شن) و فیلر است که در جدول ۳ ارائه شده است.

## ۱.۲ تابع هدف

با توجه به لزوم کاهش هزینه، هدف اصلی این الگوریتم، کمینه کردن هزینه طرح مخلوط بتن با در نظر گرفتن مقاومت مورد نظر است. هزینه یک متر مکعب بتن از حاصل جمع هزینه اجزای مخلوط بتن به دست می آید. رابطه هزینه بتن به شرح زیر است:

جدول ۳- هزینه هر کیلوگرم از مصالح

پارامتر	هزینه یک کیلوگرم (ریال)
سیمان	۱۵۰۰
میکروسیلیس	۸۰۰۰
آب	۲۰۰
سنگدانه ریز (ماسه)	۲۵۰
سنگدانه درشت (شن)	۱۵۰
فیلر	۳۵۰

## ۲.۲ قیود طراحی

برای تعریف یک مساله، علاوه بر تابع هدف، نیاز به تعریف قید نیز است. پاسخ مدل زمانی قابل قبول است که تمامی قیود رعایت شده باشند.

### ۱.۲.۲ قید مقاومت فشاری

اولین قید این مدل مقاومت فشاری ۲۸ روزه است. در این پژوهش مقاومت مورد نیاز ۶۰ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است پس باید رابطه مقاومت فشاری برابر با ۶۰ باشد.

$$F_c = 60 \text{ MPa}$$

### ۲.۲.۲ قید کمینه و بیشینه پارامترها

مدل های رگرسیون برای حالاتی قابل استفاده هستند که متغیرها در محدوده کمینه و بیشینه داده های قبل از

رگرسیون باشد. به عبارت دیگر در صورتی پاسخ الگوریتم قابل قبول است که هر پارامتر در بازه ی کمینه و بیشینه ی خود باشد.

لازم به ذکر است نسبت آب به مواد سیمانی نیز از این قاعده مستثنی نبوده و باید بین ۰,۲۷ و ۰,۴ باشد.

### ۳.۲.۲ قید حجم واحد

طرح مخلوط بتن برای یک متر مکعب محاسبه می شود پس باید جمع حجم مواد تشکیل دهنده برابر با یک متر مکعب باشد.

چگالی مواد تشکیل دهنده در جدول ۴ ارائه شده است.

جدول ۴- چگالی مواد تشکیل دهنده بتن

پارامتر	سیمان	میکروسیلیس	آب	سنگدانه ریز (ماسه)	سنگدانه درشت (شن)	فیلر
چگالی	۳۱۵۰	۲۲۰۰	۱۰۰۰	۲۵۳۰	۲۵۶۰	۲۳۲۰

کروموزم ایجاد می شود. پس از ایجاد جمعیت اولیه، مقدار تابع هدف برای هر کدام محاسبه و آن ها با توجه به مقادیر تابع هدف، ارزیابی می شوند. در این پژوهش جمعیت اولیه ۵۰ عدد در نظر گرفته شده است.

پس از ایجاد جمعیت اولیه و ارزیابی آن ها، با استفاده از عملگرهای آمیزش و جهش، جمعیت ثانویه تشکیل می شود.

عملگر آمیزش: در این پژوهش برای عملگر آمیزش، از آمیزش تک نقطه ای استفاده شده است. در این عملگر، برای ایجاد جمعیت ثانویه ابتدا تعدادی از جمعیت اولیه به زوج های دوتایی تقسیم می شوند که اصطلاحاً والد نامیده می شوند. ۸۰٪ از جمعیت اولیه به عنوان والد برای آمیزش انتخاب شده اند. سپس یک نقطه به صورت تصادفی به عنوان نقطه شکست تعیین شده و والد ها از این نقطه شکسته می شوند. پس از شکست والدها، قطعه های شکسته شده از هر والد به والد دیگر چسبیده و جمعیت ثانویه را ایجاد می کند. شمانیک این عملگر به صورت شکل ۲ است.

در این تحقیق برای حل این مدل از الگوریتم ژنتیک استفاده شده است.

## ۳. الگوریتم ژنتیک

الگوریتم ژنتیک یک الگوریتم فرا ابتکاری است که برای بهینه سازی توابع، مورد استفاده قرار می گیرد. در الگوریتم ژنتیک هر جواب به صورت یک کروموزوم تشکیل شده از ژن های مختلف که ژن ها معرف پارامترهای تشکیل دهنده جواب هستند، معرفی می شود. به عنوان مثال با در نظر گرفتن مقادیر سیمان، میکروسیلیس، آب، سنگدانه ریز (ماسه)، سنگدانه درشت (شن) و فیلر برای یک طرح مخلوط، کروموزوم طرح مخلوط به صورت شکل ۱ نمایش داده می شود.

فیلر	ماسه	شن	آب	میکروسیلیس	سیمان
------	------	----	----	------------	-------

شکل ۱- کروموزوم طرح مخلوط

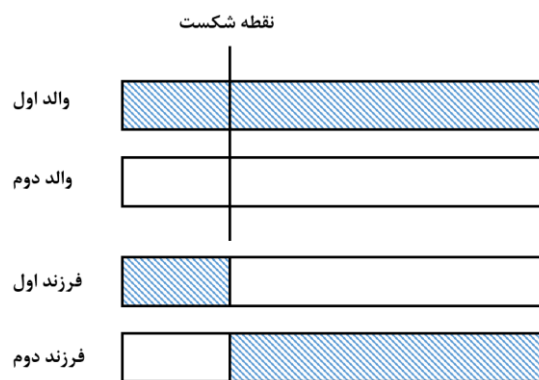
اولین مرحله در الگوریتم ژنتیک ایجاد جمعیت اولیه است. در این مرحله به صورت کاملاً تصادفی به تعداد مورد نیاز

پس از این مراحل، جمعیت اولیه، جمعیت حاصل از آمیزش و جمعیت حاصل از جهش همگی با توجه به تابع هدف آنها مرتب سازی شده و به تعداد جمعیت اولیه بهترین‌های آنها انتخاب و مابقی حذف می‌شوند. جمعیت انتخاب شده به عنوان جمعیت اولیه قرار گرفته و مراحل ایجاد جمعیت ثانویه دوباره تکرار می‌شود. این تکرار به تعداد مورد نظر از پیش تعیین شده (۵۰۰ بار در این پژوهش) انجام شده و در نهایت بهترین کروموزوم به عنوان جواب نهایی اعلام می‌شود.

#### ۴. نتیجه گیری

با توجه به این که الگوریتم‌های فرا ابتکاری، ممکن است بهترین جواب ممکن را پیدا نکنند، این الگوریتم به تعداد ۲۰ بار اجرا شده تا جواب‌های مختلف پیدا شده و بهترین جواب به عنوان طرح مخلوط نهایی ارائه شود. برای مشاهده عملکرد الگوریتم، بهترین جواب در هر تکرار ذخیره شده و روند کاهش مقدار تابع هدف در تکرارهای متوالی به صورت نمودار در شکل ۴ نمایش داده شده است.

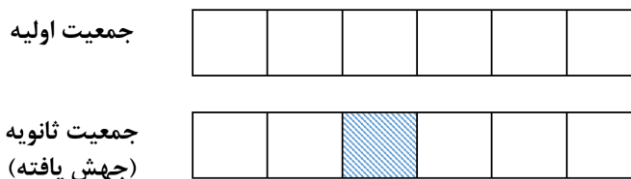
برای اجرای الگوریتم از نرم افزار Matlab ورژن 2016a استفاده شده است.



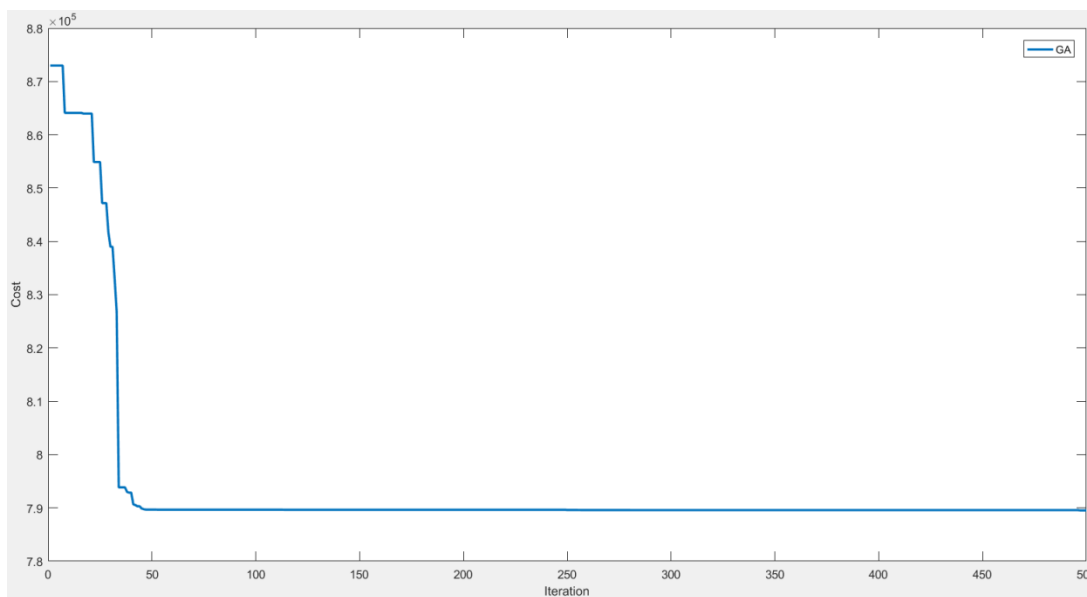
شکل ۲- شماتیک عملگر آمیزش

لازم به ذکر است برای انتخاب والد در عملگر آمیزش، از چرخ رولت استفاده شده است به این صورت که کروموزوم با تابع هدف بهتر، شانس بیشتری برای انتخاب دارد.

عملگر جهش: در این عملگر برای ایجاد جمعیت ثانویه، ابتدا مقداری از جمعیت اولیه انتخاب شده (در این پژوهش ۲۰٪ از جمعیت اولیه برای جهش انتخاب شده است) سپس یکی از پارامترهای کروموزوم به صورت تصادفی انتخاب شده و باز هم به صورت تصادفی با عدد دیگری جایگزین می‌شود. شماتیک این عملگر به صورت شکل ۳ است.



شکل ۳- شماتیک عملگر جهش



شکل ۴- روند بهبود پاسخ در تکرارهای الگوریتم ژنتیک

طرح مخلوط نهایی، هزینه و مقاومت پیش بینی شده توسط الگوریتم در جدول زیر ارائه شده است. مقادیر طرح مخلوط به کیلوگرم، مقدار مقاومت فشاری به مگاپاسکال و مقدار هزینه به ریال است.

جدول ۵- نتایج اعلام شده توسط الگوریتم ژنتیک

هزینه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	فیبر	سنگدانه درشت (شن)	سنگدانه ریز (ماسه)	آب	میکروسیلیس	سیمان
۷۸۹۵۲۳	۶۰	۲,۵۱	۱۱۳۴,۴	۸۴۸,۲۵	۹۸	۰	۲۵۵,۲

به منظور مقایسه عملکرد الگوریتم با روش‌های سنتی، هزینه طرح مخلوط بتن‌های با مقاومت حدوداً ۶۰ مگاپاسکال از پژوهش سبحانی و همکاران [۱] محاسبه و در جدول ۶ ارائه شده است.

جدول ۶- طرح مخلوط و هزینه بتن با مقاومت ۶۰ مگاپاسکال ارائه شده توسط سبحانی و همکاران

هزینه	مقاومت فشاری ۲۸ روزه	فیبر	سنگدانه درشت (شن)	سنگدانه ریز (ماسه)	آب	میکروسیلیس	سیمان
۹۵۲۳۱۰	۵۹,۹	۰	۱۲۷۳	۴۹۱,۲	۱۱۷,۸	۰	۴۱۰
۸۷۲۱۲۰	۶۰,۳	۵۷	۱۲۳۴,۲	۶۶۵,۶	۱۰۳,۲	۰	۳۲۰

همانطور که در جدول ۶ مشاهده می‌شود، الگوریتم توانسته است هزینه بتن با مقاومت ۶۰ مگاپاسکال را بیشتر از ۱۰ درصد کاهش دهد که مقدار قابل توجهی در پروژه‌های عمرانی است.

## مراجع

- [1] Sobhani, J., Najimi, M., Pourkhorshidi, A. R., & Parhizkar, T. (2010). Prediction of the compressive strength of no-slump concrete: A comparative study of regression, neural network and ANFIS models. *Construction and Building Materials*, 24(5), 709-718.
- [2] ACI-211.3, Guide for selecting proportions for no-slump concrete. Farmington Hills (MI): American Concrete Institute; 2002, 2002
- [3] Lim, C. H., Yoon, Y. S., & Kim, J. H. (2004). Genetic algorithm in mix proportioning of high-performance concrete. *Cement and Concrete Research*, 34(3), 409-420.
- [4] Ozbay, E., Oztas, A., Baykasoglu, A., & Ozbebek, H. (2009). Investigating mix proportions of high strength self compacting concrete by using Taguchi method. *Construction and building materials*, 23(2), 694-702.
- [5] Yeh, I. C. (2007). Computer-aided design for optimum concrete mixtures. *Cement and Concrete Composites*, 29(3), 193-202.
- [6] Cannon, J. P., & Murti, G. K. (1971). Concrete optimized mix proportioning (COMP). *Cement and Concrete Research*, 1(4), 353-366.

## ارزیابی کیفیت بتن‌های اجرا شده در مناطق زلزله زده استان کرمانشاه



جعفر سبحانی

عضو هیئت علمی و رییس بخش فناوری بتن  
مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی



مهدی نعمتی چاری

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات  
راه، مسکن و شهرسازی  
عضو انجمن بتن ایران



بابک احمدی

عضو هیئت علمی مرکز تحقیقات  
راه، مسکن و شهرسازی  
عضو انجمن بتن ایران

### چکیده

در زلزله استان کرمانشاه که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۸/۲۱ به وقوع پیوست، خرابی‌های گسترده‌ای در بتن‌های به کار رفته در عناصر سازه‌ای ساختمان‌ها به خصوص ساختمان‌های دارای اسکلت بتنی مشاهده شد. بخش فن‌آوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی مأمور شد که به بررسی کیفیت بتن‌های به کار رفته در مناطق زلزله زده بپردازد. به همین منظور، بازدیدهایی از شهرهای اسلام آباد غرب و سرپل ذهاب انجام پذیرفت. در بازدیدهای انجام گرفته، وضعیت کلی بتن در سازه‌ها به صورت ظاهری مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین از آزمایش غیر مخرب چکش اشمیت برای تخمین مقاومت فشاری بتن سازه‌ها استفاده شد. در این مقاله، نتایج ارزیابی به سه بخش بیمارستان‌ها، پروژه‌های مسکن مهر و مسکن‌های شخصی ساز تقسیم‌بندی شده است. مقاومت تخمینی بتن در بسیاری از ساختمان‌های با اسکلت بتنی بسیار کم به دست آمد. نتایج مقاومت در برخی از موارد کمتر از یک سوم مقاومت فشاری مندرج در نقشه‌ها و بسیار کمتر از حداقل مقاومت فشاری مجاز در آئین‌نامه‌ها برای بتن سازه‌ای (۲۰ مگاپاسکال) بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت کم بتن یکی از عوامل تخریب‌های گسترده سازه‌ای در زلزله بوده است. کلمات کلیدی: زلزله، کرمانشاه، بتن

### ۱- مقدمه

بتن پر مصرف‌ترین مصالح ساختمانی ساخته شده توسط بشر است و امروزه تقریباً سازه‌ای وجود ندارد که از بتن در ساخت آن استفاده نشده باشد. بدیهی است که کیفیت بتن نقش بسیار مهمی در عملکرد سازه‌ها به خصوص در برابر زلزله دارد. در زلزله استان کرمانشاه که در تاریخ ۱۳۹۶/۰۸/۲۱ به وقوع پیوست، خرابی‌های گسترده‌ای در بتن‌های به کار رفته در عناصر سازه‌ای ساختمان‌ها به خصوص ساختمان‌های دارای اسکلت بتنی مشاهده شد. لذا بخش فن‌آوری بتن مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی

مأمور شد که به بررسی کیفیت بتن‌های به کار رفته در مناطق زلزله زده بپردازد. به همین منظور، بازدیدهایی از شهرهای اسلام آباد غرب و سرپل ذهاب در تاریخ‌های ۱۳۹۶/۰۸/۲۸ تا ۱۳۹۶/۰۸/۳۰ انجام پذیرفت.

در بازدیدهای انجام گرفته، وضعیت کلی بتن در سازه‌ها به صورت ظاهری مورد ارزیابی قرار گرفت و همچنین از آزمایش غیر مخرب چکش اشمیت برای تخمین مقاومت فشاری بتن سازه‌ها استفاده شد. لازم به ذکر است که روش چکش اشمیت برای ارزیابی مقاومت فشاری بتن دقت کمی دارد و نمی‌تواند به عنوان معیار پذیرش یا عدم پذیرش بتن قرار گیرد زیرا عوامل متعددی مانند طرح مخلوط،

## ۲- بیمارستان‌ها

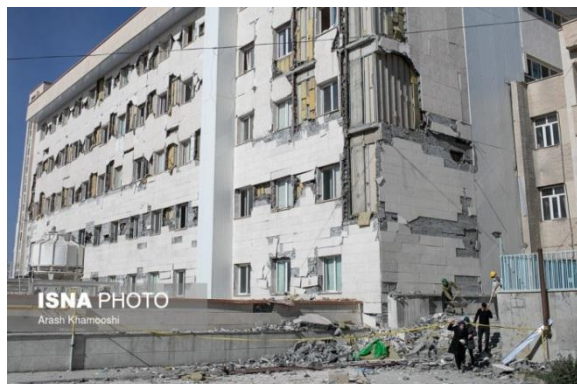
شهرهای اسلام‌آباد غرب و سرپل ذهاب هر کدام دارای یک بیمارستان هستند که در زلزله دچار آسیب دیدگی شدند. ساختمان جدید بتنی بیمارستان امام خمینی (ره) در شهر اسلام‌آباد غرب نسبت به بیمارستان شهدای سرپل ذهاب دچار آسیب بیشتری در زلزله شده است.

### ۱،۲. بیمارستان امام خمینی (ره) در اسلام‌آباد غرب

این بیمارستان دارای دو ساختمان قدیمی (با سن حدود ۳۰ سال) و جدیدالاحداث است. ساختمان قدیمی چهار طبقه و دارای اسکلت فلزی و ساختمان جدید شش طبقه و دارای اسکلت بتنی می‌باشند (شکل ۱). متأسفانه ساختمان جدیدالاحداث دارای خرابی‌های شدید در عناصر سازه‌ای و غیر سازه‌ای شده است، در حالیکه در ساختمان قدیمی، بخش‌های محدودی از نما دچار آسیب شده است (شکل ۱ و ۲).

سن، نوع مصالح به کار رفته، کیفیت سطح و غیره بر نتایج آن تأثیرگذار است [۱،۲]. لکن، به دلیل اینکه این روش غیر مخرب است و زمان کمی برای انجام آن لازم است و همچنین باید سازه‌های زیادی در مدت زمان محدود بررسی می‌گردید، از این روش برای ارزیابی کلی مقاومت فشاری بتن سازه‌ها استفاده شد. مسلماً، برای ارزیابی دقیق مقاومت فشاری بتن در سازه‌ها نیاز به مغزه‌گیری است و نتایج آن می‌تواند برای بررسی کفایت سازه‌ای و تقویت سازه‌ای (در صورت نیاز) استفاده گردد. در نتیجه، نتایج مقاومت فشاری به دست آمده از روش چکش اشمیت که در این مقاله ارائه شده است، به هیچ وجه نمی‌تواند مبنای متقنی برای بررسی کفایت سازه‌ای موارد بررسی شده باشد و هر سازه باید به صورت دقیق‌تر و گسترده‌تر مورد آزمایش و بررسی قرار گیرد.

در این مقاله، نتایج ارزیابی به سه بخش بیمارستان‌ها، پروژه‌های مسکن مهر و مسکن‌های شخصی ساز تقسیم‌بندی شده است.



شکل ۱- ساختمان قدیمی (سمت راست) و ساختمان جدید الاحداث (سمت چپ) بیمارستان امام خمینی (ره) در اسلام‌آباد غرب



شکل ۲- خرابی‌های گسترده در ساختمان جدید الاحداث بیمارستان امام خمینی (ره) در اسلام‌آباد غرب



سیستم سازه‌ای ساختمان جدید الاحداث، در یک جهت قاب خمشی و در جهت دیگر دیوار برشی بتنی می‌باشد. بیشترین خرابی‌ها در اسکلت بتنی در دو طبقه فوقانی مشاهده شد، به طوری که بتن کلیه ستون‌ها و دیوارهای برشی این دو طبقه دچار گسیختگی و ترک خوردگی شده‌اند (شکل ۳) و ظاهراً عناصر سازه‌ای افقی شامل تیرها و سقف‌ها دچار آسیب کمتری (شکل ۴) شده‌اند. در برخی از طبقات دیگر نیز ترک خوردگی در ستون‌ها مشاهده شد.



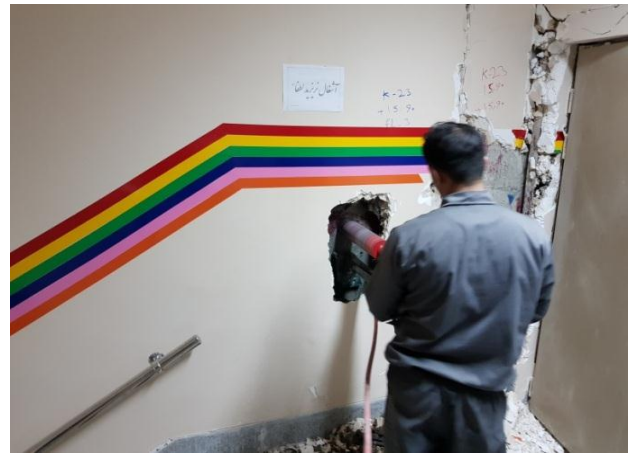
شکل ۳- گسیختگی بتن در یکی از ستون‌های طبقه پنجم ساختمان جدید الاحداث بیمارستان امام خمینی (ره) در اسلام آباد غرب



شکل ۴- عدم مشاهده خرابی ظاهری در تیرها و سقف‌های ساختمان جدید الاحداث بیمارستان امام خمینی (ره) در اسلام آباد غرب

نتایج مقاومت فشاری معادل نمونه مکعبی  $20 \times 20 \times 20$  سانتیمتری به روش چکش اشمیت در این ساختمان در محدوده ۸ تا ۲۲ مگاپاسکال به دست آمد. به طور کلی نتایج مقاومت فشاری بتن در عناصر سازه‌ای افقی (تیرها و سقف‌ها) بیشتر از عناصر سازه‌ای عمودی (ستون‌ها و دیوارهای برشی) به دست آمد. بطوریکه نتایج مقاومت فشاری ستون‌ها و دیوارهای برشی دو طبقه فوقانی که دچار بیشترین تخریب شده‌اند، در حدود ۱۰ مگاپاسکال به دست آمد. لازم به ذکر است که مقاومت مشخصه در نقشه‌های سازه‌ای این پروژه، برابر با ۲۵ مگاپاسکال برای نمونه استوانه‌ای  $15 \times 30$  سانتیمتری یا برابر با ۳۰ مگاپاسکال برای نمونه مکعبی  $20 \times 20 \times 20$  سانتیمتری درج شده است. لذا می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت فشاری بتن اجرا شده به مراتب کمتر از مقاومت مشخصه بوده است.

هم اکنون مطالعات دقیق‌تری به منظور امکان‌سنجی تعمیر و تقویت این سازه با مشارکت مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، شرکت مهندسین مشاور تدبیر ساحل پارس و آزمایشگاه فنی و مکانیک خاک استان کرمانشاه در جریان است. به دلیل گسیختگی بتن و تراکم زیاد میلگردها در ستون‌ها و دیوارهای برشی، به ویژه در دو طبقه فوقانی، اخذ مغزه سالم از این بخش‌ها میسر نبوده است (شکل ۵).



شکل ۵- عدم امکان اخذ مغزه سالم از ستون‌ها و دیوارهای برشی آسیب دیده در ساختمان جدید الاحداث بیمارستان امام خمینی (ره) در اسلام آباد غرب

مشاهده شد که فواصل خاموت ستون‌ها بیش از ۳۰ سانتی‌متر است که با ضوابط آرماتورگذاری آئین‌نامه فعلی ۲۸۰۰ و آئین‌نامه بتن ایران که بعد از ساخت این پروژه تدوین شده‌اند، مطابقت ندارد (شکل ۷). نتایج مقاومت فشاری بتن به روش چکش اشمیت در حدود ۲۰ مگاپاسکال تا ۳۰ مگاپاسکال به دست آمد.

## ۲.۲. بیمارستان شهدا در سرپل ذهاب

ساخت اسکلت بتنی این بیمارستان در اواخر دهه ۶۰ به اتمام رسیده است و هنوز بخش‌هایی از عملیات ساختمانی آن به پایان نرسیده است. در زلزله، تخریب‌هایی در عناصر سازه‌ای و غیر سازه‌ای ایجاد شده است (شکل ۶). بخش‌هایی از بتن برخی از ستون‌ها در نزدیک اتصال به تیرها دچار گسیختگی شده است (شکل ۷). همچنین



شکل ۶- آسیب دیدگی عناصر سازه‌ای و غیر سازه‌ای ساختمان بیمارستان شهدا در سرپل ذهاب



شکل ۸- تخریب دو بلوک بتنی در مجموعه مسکن مهر شرف آباد در اسلام آباد غرب



شکل ۷- تخریب بتن یکی از ستون‌های ساختمان بیمارستان شهدا در سرپل ذهاب



شکل ۹- ستون گسیخته شده در یکی ساختمان‌های اسکلت بتنی در مجموعه مسکن مهر شرف آباد در اسلام آباد غرب

### ۲،۳. مسکن مهر شهید شیروودی در سرپل ذهاب

ساختمان‌های مسکن مهر شهید شیروودی دارای اسکلت بتنی هفت طبقه هستند. در کلیه این ساختمان‌ها عناصر غیر سازه‌ای به شدت تخریب شده است، همچنین خرابی‌های قابل توجهی در اسکلت بتنی برخی از بلوک‌ها مشاهده شد. نتایج مقاومت فشاری بتن به روش چکش اشمیت در حدود ۲۰ مگاپاسکال به دست آمد. به نظر می‌رسد، مقاومت فشاری نسبتاً مطلوب یکی از دلایل عدم تخریب گسترده در عناصر غیر سازه‌ای باشد.

### ۳- پروژه‌های مسکن مهر

در شهرهای اسلام آباد غرب و سرپل ذهاب چند مجموعه پروژه مسکن مهر اجرا شده است که متأسفانه بخش‌های قابل توجهی از آنها در زلزله آسیب شدید دیده‌اند. بیشترین آسیب دیدگی‌های مربوط به مسکن مهر در شهرهای اسلام-آباد غرب و سرپل ذهاب به ترتیب مربوط به مسکن مهر شرف آباد و مسکن مهر شهید شیروودی بوده است که بازدید از این دو مجموعه انجام شد.

#### ۱،۳. مسکن مهر شرف آباد در اسلام آباد غرب

ساختمان‌های مسکن مهر شرف آباد در زلزله دچار تخریب عناصر سازه‌ای و غیر سازه‌ای شده‌اند و در دو بلوک که دارای اسکلت بتنی می‌باشد، گسیختگی سازه‌ای و فروریزش اتفاق افتاده است (شکل ۸). بنا به اظهار مسئولین، بتن ریزی این ساختمان‌ها در حدود ۲ سال پیش به اتمام رسیده است. طی بررسی اجمالی دو بلوکی که در آنها گسیختگی سازه‌ای ایجاد شده است، نتایج مقاومت فشاری بتن به روش چکش اشمیت در نواحی سالم در حدود ۲۰ مگاپاسکال و در ستون‌های آسیب دیده (شکل ۹) در حدود ۱۰ مگاپاسکال به دست آمد.



شکل ۱۰- تخریب گسترده در عناصر غیر سازه‌ای در ساختمان‌های اسکلت بتنی در مجموعه مسکن مهر شهید شیرودی در اسلام‌آباد غرب

#### ۱.۴. مسکن‌های شخصی ساز در اسلام‌آباد غرب

۱.۱.۴. ساختمان بتنی نیمه‌کاره فرو ریخته در اسلام‌آباد غرب (الف)

این ساختمان در حال ساخت بوده است و تا کنون سه سقف اجرا شده است و عملیات سفت کاری آن آغاز نشده است (شکل ۱۱). سقف‌های این ساختمان با وجود آنکه کاملاً تحت بارهای مرده و زنده قرار نگرفته‌اند در طی زلزله فرو ریخته است، در حالیکه ساختمان‌های دو طبقه اطراف آن که بدون سیستم سازه‌ای مشخصی هستند و مهاربندی جانبی نشده‌اند سالم باقی مانده‌اند (شکل ۱۲). مقاومت فشاری ستون‌ها به روش چکش اشمیت کمتر از ۱۰ مگاپاسکال به دست آمد و بتن دارای تراکم مناسب نبوده است (شکل ۱۳). بنا به اظهار همسایگان، از بتن خراطه‌ای در ساخت ستون‌ها و از بتن آماده در ساخت تیرها و سقف‌ها استفاده شده است. به نظر می‌رسد، کیفیت نازل بتن مخصوصاً در ستون‌ها یکی از عوامل تخریب این ساختمان باشد.



شکل ۱۱- ساختمان بتنی نیمه‌کاره فرو ریخته در اسلام‌آباد (الف)

#### ۴- مسکن‌های شخصی ساز

علاوه بر بیمارستان‌ها و مجموعه‌های مسکن مهر، از برخی از ساختمان‌های شخصی ساز که دارای اسکلت بتنی می‌باشند نیز بازدید به عمل آمد. تخریب‌های ایجاد شده در شهر سرپل ذهاب به مراتب بیشتر از اسلام‌آباد غرب می‌باشد.

طبق آمارگیری اداره کل راه و شهرسازی استان کرمانشاه تا کنون از ۹۰ مورد ساختمان شخصی ساز آسیب دیده در شهر سرپل ذهاب، تقریباً نیمی از این ساختمان‌ها بتنی و نیمی دیگر فولادی بوده‌اند. پروانه‌های صادر شده برای ساختمان‌های فلزی و بتنی در این شهر نیز تقریباً به همین نسبت بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که ساختمان‌های فلزی و بتنی در این زلزله به نسبت مساوی تخریب شده‌اند.

لازم به ذکر است که بنا بر بررسی‌های انجام شده، بسیاری از ساختمان‌های مسکونی در استان کرمانشاه بر خلاف نقشه طراحی شده مصوب اجرا می‌شوند و مساحت بیشتری به صورت پیشروی در سطح یا افزایش تعداد طبقات اجرا می‌شود. در نهایت، با جریمه مالک این ساختمان‌ها در کمیسیون ماده صد شهرداری، این ساختمان‌ها گواهی پایان کار عملیات ساختمانی دریافت می‌کنند. به نظر می‌رسد که این موضوع سبب عدم کنترل دقیق مقررات ملی ساختمان می‌شود و به دلیل عدم کنترل دقیق مسائل فنی می‌تواند منجر به ضعف در اجرا و استحکام سازه‌ها شود.

همچنین آزمایش‌های بتن، میلگرد و جوش با آنکه ضوابط مشخصی در مورد انجام آن در مقررات ملی ساختمان وجود دارد در پروژه‌های شخصی ساز استان کرمانشاه چندان رواج ندارد. در حالیکه طبق مقررات ملی ساختمان، تقریباً در کلیه سازه‌ها باید این آزمایش‌ها انجام شود.

از ساختمان بتنی نیمه‌کاره‌ای که اسکلت آن به اتمام رسیده است بازدیدی انجام شد. سازه این ساختمان دارای چهار سقف است و دیوارهای آن هنوز اجرا نشده‌است (شکل ۱۵). هیچگونه آسیب ظاهری در این ساختمان مشاهده نشد. طبق اظهار همسایگان، از بتن آماده در ساخت ستون‌ها و سقف‌ها استفاده شده است. همچنین، مقاومت فشاری بتن این ساختمان به روش چکش اشمیت در حدود ۲۵ مگاپاسکال به دست آمد. به نظر می‌رسد، مقاومت نسبتاً مطلوب بتن این ساختمان برخلاف دو ساختمان توضیح داده شده قبل و استفاده از بتن آماده مرغوب، از عوامل آسیب ندیدن این سازه باشد.



شکل ۱۵- ساختمان بتنی در حال ساخت سالم در اسلام آباد غرب

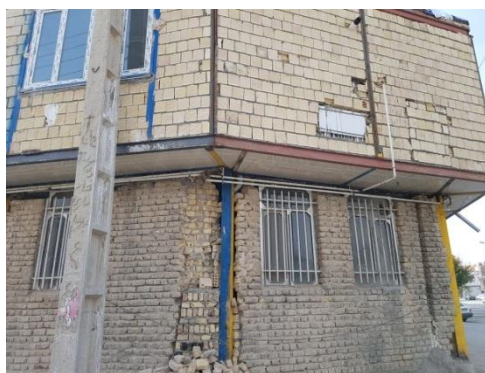
#### ۲.۴. مسکن‌های شخصی ساز در سرپل ذهاب

##### ۱،۲،۴. ساختمان بتنی آسیب دیده در سرپل ذهاب (الف)

این ساختمان نوساز است و دارای سه سقف می‌باشد. در محل اتصال ستون‌ها به تیرها گسیختگی ایجاد شده است. در این پروژه، نتایج مقاومت فشاری بتن به روش چکش اشمیت در حدود ۳۰ مگاپاسکال به دست آمد. به نظر می‌رسد دلایل دیگری غیر از مقاومت بتن، عامل آسیب دیدگی این ساختمان در زلزله است.



شکل ۱۶- ساختمان بتنی آسیب دیده در سرپل ذهاب (الف)



شکل ۱۲- ساختمان سالم مانده در اسلام آباد بدون سیستم سازه‌ای استاندارد



شکل ۱۳- عدم تراکم مناسب بتن در ساختمان بتنی نیمه‌کاره فرو ریخته در اسلام آباد (الف)

##### ۲،۱،۴. ساختمان بتنی نیمه کاره فرو ریخته در اسلام آباد غرب (ب)

این ساختمان در حال ساخت بوده است و هفت طبقه در آن اجرا شده است (شکل ۱۴). بنابر اظهار همسایگان، جواز این ساختمان برای چهار سقف صادر شده است، در حالیکه سه طبقه غیر مجاز به آن اضافه شده است. همچنین طبق اظهار ایشان، بتن این ساختمان به صورت دستی اجرا شده است. مقاومت فشاری ستون‌ها به روش چکش اشمیت کمتر از ۱۰ مگاپاسکال به دست آمد. به نظر می‌رسد که مقاومت نازل بتن و افزودن غیر مجاز به تعداد طبقات عوامل اصلی تخریب این ساختمان باشد.



شکل ۱۴- ساختمان بتنی نیمه‌کاره فرو ریخته در اسلام آباد (ب)

##### ۳،۱،۴. ساختمان بتنی در حال ساخت سالم در اسلام آباد غرب



شکل ۱۸- ساختمان بتنی نوساز فروریخته در سرپل ذهاب



شکل ۱۹- آرماتورهای یکی از ستون‌های ساختمان بتنی نوساز فروریخته در سرپل ذهاب

۴،۲،۴. ساختمان بتنی نوساز با تخریب شدید عناصر غیر سازه‌ای در سرپل ذهاب

این ساختمان دارای سه سقف می‌باشد و عملیات اجرای این ساختمان در سال ۱۳۹۵ به اتمام رسیده است. تخریب ظاهری گسترده‌ای در اسکلت بتنی این ساختمان به غیر از گسیختگی شمشیری راه پله مشاهده نشد (شکل ۲۰). لکن عناصر غیر سازه‌ای دچار تخریب شدید شده‌اند. طبق اظهار مالک این ساختمان، تغییراتی در نقشه مصوب این پروژه انجام شده است و در کمیسیون ماده ۱۰۰ شهرداری جریمه نقدی برای این تخلف در نظر گرفته شده و نهایتاً پایان کار آن صادر شده است. همچنین بنا بر گفته مالک، از بتن آماده برای اجرای ستون‌ها و سقف‌های این ساختمان استفاده شده است. مقاومت فشاری بتن به روش چکش اشمیت در این ساختمان در حدود ۲۵ مگاپاسکال تا ۳۰ مگاپاسکال به دست آمد. به نظر می‌رسد مقاومت نسبتاً مناسب بتن و استفاده از بتن آماده از عوامل عدم تخریب سازه این ساختمان در زلزله باشد.

۴،۲،۴. ساختمان بتنی آسیب دیده در حال ساخت در سرپل ذهاب (ب) این ساختمان سه طبقه است و ساخت اسکلت آن به اتمام رسیده و سفت‌کاری آن هنوز اجرا نشده است. بتن ستون‌ها در محل اتصال با تیرها دچار گسیختگی شده است (شکل ۱۷). در این پروژه، نتایج مقاومت فشاری بتن به روش چکش اشمیت در حدود ۲۵ مگاپاسکال به دست آمد. فواصل خاموت‌ها در ستون‌ها بیش از ۳۰ سانتی‌متر بود که مخالف با ضوابط آرماتورگذاری آئین‌نامه ۲۸۰۰ و مبحث نهم مقررات ملی ساختمان است. به نظر می‌رسد عدم رعایت ضوابط آرماتور گذاری یکی از عوامل تخریب در این ساختمان باشد.



شکل ۱۷- ساختمان بتنی آسیب دیده در حال ساخت در سرپل ذهاب (ب)

۴،۲،۴. ساختمان بتنی نوساز فروریخته در سرپل ذهاب این ساختمان در زلزله کاملاً واژگون شده است (شکل ۱۸) و متأسفانه سه نفر از هموطنان در زیر آوار این ساختمان جانشان را از دست داده‌اند. نتایج مقاومت فشاری بتن به روش چکش اشمیت در حدود ۲۰ مگاپاسکال به دست آمد. طبق اظهار همسایگان، از بتن آماده برای اجرای ستون‌ها و سقف‌ها در این ساختمان استفاده شده است. همچنین به نظر می‌رسد ضوابط آرماتورگذاری در این ساختمان تا حدودی رعایت شده است (شکل ۱۹). به نظر می‌رسد که دلیل فروریختن این ساختمان به غیر از کیفیت بتن و نحوه آرماتورگذاری باشد.

\* در بررسی‌های انجام گرفته، در عمده‌ساختمان‌های آسیب‌دیده، گسیختگی در محل ستون‌ها ایجاد شده است. در این پروژه‌ها، عموماً مقاومت بتن ستون‌ها نسبت به تیرها و سقف‌ها کمتر به دست آمد. به نظر می‌رسد استفاده از بتن دستی در ستون‌ها عامل این مشکل باشد. مسلماً بتن دستی ساخته شده در کارگاه‌ها قابل کنترل نمی‌باشد و عناصر سازه‌ای مهمی همچون ستون‌ها که با این نوع بتن ساخته می‌شود نمی‌تواند عملکرد مناسبی در زلزله داشته باشد.

\* در برخی از ساختمان‌های تخریب شده دارای اسکلت بتنی، مقاومت بتن در محدوده قابل قبولی به دست آمد. هرچند که نتیجه گیری دقیق و اصولی با مغزه‌گیری قابل انجام است. همچنین علت تخریب در این سازه‌ها می‌تواند موارد دیگری همچون عدم اجرای مناسب ضوابط آرماتورگذاری، ایرادات طراحی یا ایرادات در مطالعات ژئوتکنیکی باشد.

\* آزمایش‌های بتن، میلگرد و جوش با آنکه ضوابط مشخصی در مورد انجام آن در مقررات ملی ساختمان وجود دارد، در پروژه‌های شخصی‌ساز استان کرمانشاه چندان رواج ندارد. درحالی‌که طبق مقررات ملی ساختمان، تقریباً در کلیه سازه‌ها باید این آزمایش‌ها انجام شود.

\* بررسی‌های انجام گرفته مقدماتی بوده‌اند و نمی‌تواند مبنای قضاوت در مورد کلیه جوانب فنی ساختمان‌های آسیب‌دیده مورد اشاره در متن مقاله باشد. بلکه باید جمیع جهات مؤثر در بررسی استحکام مستحدمات با انجام مطالعات دقیق‌تر مقاومت بتن، مطالعات سازه‌ای و ژئوتکنیکی و غیره مورد نظر قرار گیرد.

### تشکر و قدردانی

نویسندگان این مقاله از اداره کل راه و شهرسازی استان کرمانشاه به پاس همکاری و همراهی با مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، کمال تشکر و امتنان را دارند.



شکل ۲۰- ساختمان بتنی نوساز با تخریب شدید راه پله و عناصر غیر سازه‌ای در سرپل ذهاب

### جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

با توجه به بازدید انجام گرفته و تخمین مقاومت به روش چکش اشمیت بر روی بتن برخی از ساختمان‌های بتنی شهرهای اسلام-آباد غرب و سرپل ذهاب می‌توان موارد زیر را جمع‌بندی و نتیجه‌گیری کرد:

\* طبق آمارگیری اداره کل راه و شهرسازی استان کرمانشاه تا کنون از ۹۰ مورد ساختمان آسیب‌دیده در شهر سرپل ذهاب، تقریباً نیمی از این ساختمان‌ها بتنی و نیمی دیگر فولادی بوده‌اند. پروانه‌های صادر شده برای ساختمان‌های فلزی و بتنی در این شهر نیز تقریباً به همین نسبت بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که ساختمان‌های فلزی و بتنی در این زلزله به نسبت مساوی تخریب شده‌اند.

\* مقاومت بتن در بسیاری از ساختمان‌های با اسکلت بتنی بسیار کم به دست آمد. نتایج مقاومت در برخی از موارد کمتر از یک سوم مقاومت فشاری مندرج در نقشه‌ها و بسیار کمتر از حداقل مقاومت فشاری مجاز در آئین‌نامه‌ها برای بتن سازه‌ای (۲۰ مگاپاسکال) بوده است. می‌توان نتیجه گرفت که مقاومت کم بتن یکی از عوامل تخریب‌های گسترده سازه‌ای در زلزله بوده است.

### منابع

- [1] Brencich, A, Cassini, G, Pera, D, Riotto, G (2013). "Calibration and reliability of the rebound (Schmidt) hammer test". *Civil Engineering and Architecture*, Vol. (3), pp 66-78.
- [2] Aydin, F, Saribiyik, M (2010). "Correlation between Schmidt Hammer and destructive compressions testing for concretes in existing buildings". *Scientific Research and Essays*, Vol. 5(13), pp 1644-1648.

# بررسی مشخصات فیزیکی و مکانیکی سبکدانه شیل

## و تاثیر آن بر مقاومت بتن سبک



سید حسین حسینی لواسانی  
دکترای مهندسی عمران-سازه  
عضو هیات علمی دانشگاه خوارزمی  
عضو انجمن علمی بتن ایران



سعید بزرگمهرنیا  
دکترای مهندسی عمران-سازه  
مدیر R&D شرکت آپتوس ایران  
عضو انجمن بتن ایران

### چکیده

در سال‌های اخیر، بتن سبک سازه‌ای به دلیل ویژگی‌هایی مانند وزن کم، عایق حرارتی و صوتی مناسب و مقاومت مناسب در برابر سرما و گرما مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در حال حاضر دانه‌های شیل انبساط‌پذیر که به روش فرآیند خشک در داخل کوره گردان افقی تولید می‌شود، یکی از مهم‌ترین نوع سبک‌دانه‌های مصنوعی است که کاربرد گسترده‌ای در تولید بتن سبک سازه‌ای دارد.

در این تحقیق به منظور تعیین اثر اندازه قطر بر وزن مخصوص، درصد جذب آب و مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌های شیل، آزمایش‌های مختلف بر روی سه رده از دانه بندی شیل انجام شده است. همچنین با ترکیب سبک‌دانه‌ها و ملات ماسه و سیمان و ساخت نمونه‌های با درصد حجمی ۱۰ الی ۳۰ درصد از سبک‌دانه‌ها و تعیین مقاومت فشاری به بررسی مشخصات مکانیکی بتن سبک ساخته شده از آنها پرداخته شده است. نتایج آزمایش‌ها بیانگر تأثیر قابل توجه اندازه قطر سبک‌دانه‌های شیل بر مشخصات مکانیکی دانه‌ها و بتن ساخته شده از آنها می‌باشد.

کلمات کلیدی: مشخصات مکانیکی، شیل، بتن سبک سازه‌ای، سبک‌دانه‌های مصنوعی، مقاومت فشاری

### ۱-مقدمه

مهمترین مزیت سبک‌دانه‌ها مربوط به وزن مخصوص کم این مصالح است. بطوری که از آنها می‌توان برای ساخت بتن سبک، قطعات پیش ساخته و غیره استفاده نمود که با توجه به وزن کم آنها، باعث کاهش بار مرده، نیروهای جانبی، نشست و تغییر مکان در سازه‌ها می‌شود [1,2,3]. این ویژگی‌ها سبب گسترش استفاده از بتن سبک‌دانه در ساختمان‌های بلند، پل‌های با دهانه‌ی بلند، پلت فرم‌های

دریایی و عایق سازی حرارتی و صدا در ساختمان‌ها شده است [4,5].

سبک‌دانه را می‌توان به دو نوع طبیعی و مصنوعی تقسیم کرد. از سبک‌دانه‌های طبیعی می‌توان به پومیس، اسکوریا و دیاتومه اشاره کرد. پومیس و اسکوریا منشأ آذرین و آتشفشانی دارند و دیاتومه از بقایای پوسته آهکی جانوران دریایی تشکیل شده است. سبک‌دانه‌های مصنوعی از رس، شیل، سنگ لوح، پرلیت، ورمیکولیت، خاکستر سوخت پودر



شده، روباره کوره آهنگدازی، شیشه، ذرات چوب و پلاستیک ساخته می‌شوند [6]

در کشور ما تولید سبک‌دانه‌های مصنوعی لیکای سازه‌ای و شیل سبب شده چشم انداز روشنی برای صنعت بتن سبک سازه‌ای کشور ترسیم شود. لیکا، از رس انبساط پذیر به روش فرآیند تر در داخل کوره گردان افقی و شیل، از شیل انبساط‌پذیر به روش فرآیند خشک در داخل کوره گردان افقی تولید می‌شود. در فرآیند خشک که برای تولید شیل استفاده می‌شود سنگ شیل ابتدا با کمک آسیاب به صورت پودر بسیار نرم در می‌آید و این پودر به صورت همگن است و برای فرآیند گندوله‌سازی انبار می‌شود [7] در فرآیند گندوله سازی با دستگاه پلوتایزر پودر شیل به همراه ذرات آب ترکیب و دانه‌های کروی ایجاد می‌شود که با تغییر در سرعت و زاویه دستگاه پلوتایزر می‌توان دانه‌های با ابعاد متفاوتی تولید کرد. در مرحله‌ی آخر، دانه‌های تولید شده در کوره گردان پخته می‌شوند که دانه‌های بیرون آمده از کوره غالباً یک شکل اند ( این فرآیند تولید به روش آلمانی نیز معروف است).

با توجه به اینکه هر چه سبک‌دانه سنگین‌تر باشد دارای مقاومت بیشتری می‌باشد، قابلیت لیاپور در تولید بتن با مقاومت فشاری بالاتر بیشتر است.

در این تحقیق به منظور تعیین اثر اندازه قطر بر وزن مخصوص، درصد جذب آب و مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌های شیل، سه رده از دانه بندی شیل تهیه و با انجام آزمایش‌های مختلف بر روی نمونه‌های سبک‌دانه و بتن‌های ساخته شده از آنها که شامل نسبت‌های حجمی ۱۰ الی ۳۰ درصد از سبک‌دانه هستند، ویژگی‌های سبک‌دانه‌ها و بتن‌های ساخته شده از آنها مقایسه شد.

## ۲- تحقیقات گذشته

تا به حال تحقیقات بسیاری در مورد بررسی اثر استفاده از سبک‌دانه‌های مختلف در ساخت بتن سبک صورت گرفته است. در این تحقیقات از سبک‌دانه‌های با دانه‌بندی

مشخص به عنوان مصالح استفاده شده است و تفکیکی از نظر تأثیر قطر بر ویژگی ماده مرکب ساخته شده، صورت نگرفته است.

در تحقیقات داخل کشور از آن‌جایی که خط تولید سبک‌دانه شیل به تازگی درون کشور راه اندازی شده است، به طور عمده تحقیقات گذشته بر روی سبک‌دانه‌ی لیکا و سبک‌دانه‌های طبیعی انجام شده است و تا کنون تحقیقی بر روی خواص شیل صورت نگرفته است.

استفاده از این محصول به عنوان سبک‌دانه در بتن و بلوک سیمانی به شرط رعایت کلیه الزامات زیر بلامانع است. رعایت استاندارد ملی ایران به شماره ۷۶۵۷ الزامی است. از لحاظ ویژگی‌های شیمیایی، مواد زیان آور موجود در سنگدانه‌های سبک باید در حد مجاز به شرح زیر باشند:

\* ناخالصی‌های آلی : ناخالصی‌های آلی سنگدانه‌های سبک که از طریق آزمون تعیین می‌شود ۰ طبق روش استاندارد ملی ایران به شماره ۴۹۷۹، نباید رنگی تیره‌تر از استاندارد ایجاد کند مگر آنکه ثابت شود که تغییر رنگ پس از آزمون به دلیل موجود مقادیر کمی از موادی است که برای بتن زیان آور نیست.

\* لکه گذاری : لکه ایجاد شده توسط یک سنگدانه سبک با شاخص ۶۰ یا بیشتر به واسطه وجود مقداری آهن (بر حسب  $Fe_2O_3$ ، که با تجزیه شیمیایی اندازه‌گیری شمی-شود (روش ASTM C-641) باید معادل یا بیشتر از ۱,۵ میلی گرم در ۲۰۰ گرم نمونه باشد.

\* افت ناشی از سرخ شدن : افت ناشی از سرخ شدن سنگدانه‌های سبک به دست آمده از فرآورده‌های جانبی سوخت زغال سنگ یا کک (استاندارد ملی ایران به شماره ۱۶۹۲)، نباید بیشتر از ۱۲ درصد و افت سرخ شدن سایر سنگدانه‌های سبک نباید بیشتر از ۵ درصد باشد.

از لحاظ ویژگی‌های فیزیکی، سنگدانه‌های سبک تحت آزمون باید مطابق الزامات زیر باشند: \* کلوخه‌های رسی و ذرات خرد شونده : مقدار کلوخه‌های

رسمی نباید بیشتر از ۲ درصد وزن نمونه خشک باشد. \*دانه‌بندی: الزام خاصی برای دانه‌بندی پیشنهاد نمی‌شود و دانه‌بندی می‌تواند براساس درخواست متقاضی تولید شود. در پیوست الف استاندارد ملی ایران به شماره ۷۶۵۷ به عنوان راهنما، دانه‌بندی سنگدانه سبک ارائه شده است. \*یکنواختی دانه‌بندی: برای اطمینان از یکنواختی در دانه بندی محموله‌های متوالی سنگدانه سبک، مدول نرمی نمونه‌های برداشت شده از محموله‌ها باید در فواصل زمانی مقرر شده توسط خریدار، تعیین شود. مدول نرمی سنگدانه‌های سبک در هر محموله نباید بیش از ۷ درصد از نمونه‌هایی که برای آزمونهای تعیین کیفیت ارائه شده، تفاوت داشته باشد مگر آنکه برای تولید بتنی در موارد خاص استفاده شود. برخی از تحقیقات انجام گرفته بر روی سبک‌دانه‌ی لیکا و سبک‌دانه‌های طبیعی به شرح زیر است:

رئیس قاسمی و همکاران (۱۳۹۰) یک مدل دو فازي خمیر-دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبک‌دانه حاوی لیکا برای رسیدن به روانی و مقاومت فشاری ارائه کردند [8].

اردکانی و یزدانی (۱۳۹۰) به مقایسه‌ی مشخصات دانه‌های رس منبسط شده با وزن مخصوص و قطرهای مختلف پرداختند [9].

رحمانی و یزدانی (۱۳۹۰) به کاربرد روش تاگوچی در تعیین طرح اختلاط بهینه‌ی بتن سبک سازه‌ای ساخته شده با سبک‌دانه‌های اسکوریا پرداختند [10].

شکرچی زاده و همکاران (۱۳۸۷)، به بررسی طرح اختلاط بتن بهینه، با استفاده از لیکا پرداختند [11].

حسین افشین و علی اکبر بابا لو (۱۳۸۵)، به یافتن طرح اختلاط بهینه بتن‌های سبک‌دانه سازه‌ای با روش تاگوچی پرداختند [12].

تدین (۱۳۸۱)، به بررسی مشخصات بتن سبک پر مقاومت با مصالح موجود در ایران پرداخت [13].

مصطفی باغی و همکاران (۱۳۹۵)، به بررسی مشخصات ارتجاعی سبک‌دانه‌های مصنوعی شیل و رس منبسط شده ایران پرداختند [14].

### ۳- برنامه آزمایشگاهی و مصالح مصرفی

با توجه به هدف تحقیق، بر روی سبک‌دانه‌های انتخاب شده آزمایش‌های وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای، درصد جذب آب، مقاومت در برابر ضربه و مقاومت در برابر خردشدگی بر اساس استانداردهای مختلف انجام شد. همچنین با ترکیب ماتریس ماسه سیمانی و سبک‌دانه، ماده مرکب دو فازي ساخته شده و با اندازه‌گیری مقاومت فشاری، به بررسی مقاومت آنها در قالب ماده مرکب بتنی پرداخته شد. تمامی آزمایش‌ها در آزمایشگاه همکار آپتوس ایران انجام شده است.

با توجه به هدف تحقیق مصالح مورد استفاده در این تحقیق عبارت‌اند از:

سبک‌دانه: سبک‌دانه شیل از شرکت شیل سمنان تهیه شد و با توجه به اینکه هدف تحقیق تعیین اثر اندازه قطر بر مشخصات مکانیکی سبک‌دانه‌ها و بتن ساخته شده از آنها بود، سه رده از دانه بندی شیل با مشخصات زیر تهیه شد.

- دانه‌های S<sub>1</sub>، مانده بین الک ۰/۵" (۱۲/۵ میلی‌متر) و

"۰/۳۷۵ (۹/۵ میلی‌متر) با قطر متوسط ۱۱ میلی‌متر.

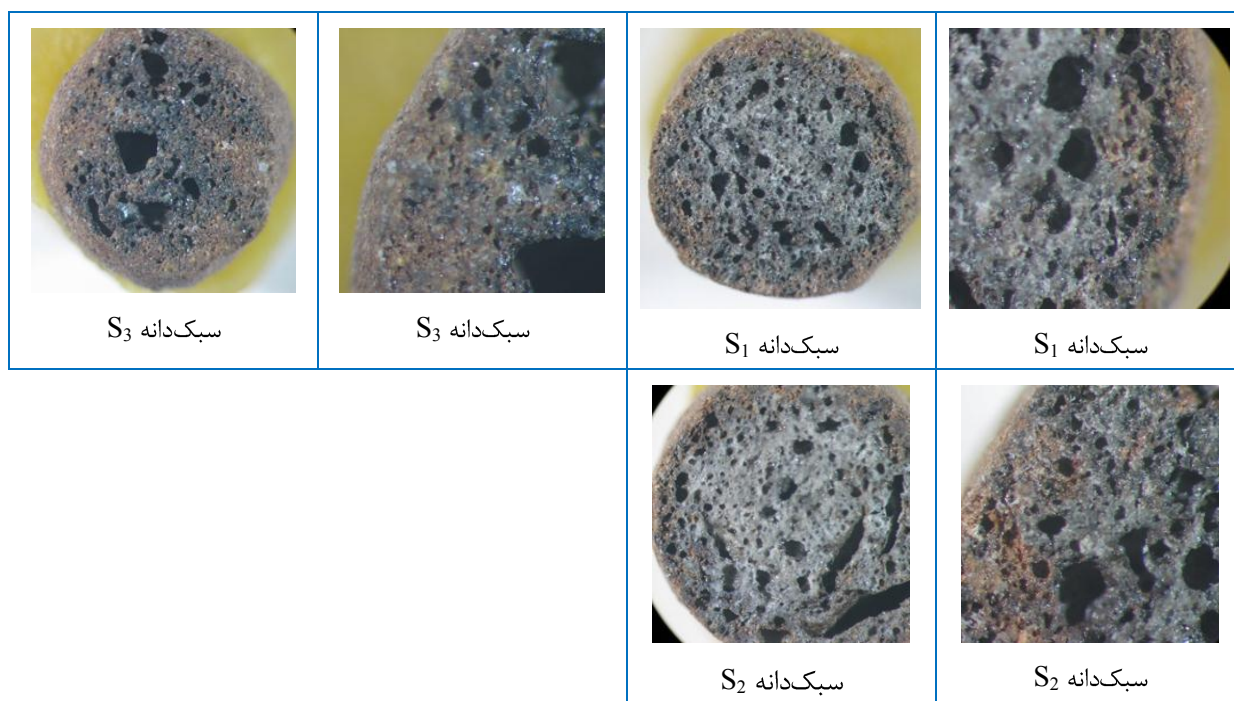
- دانه‌های S<sub>2</sub>، مانده بین الک "۰/۳۷۵ (۹/۵ میلی‌متر) و

"۰/۲۵ (۶/۳۵ میلی‌متر) با قطر متوسط ۸ میلی‌متر.

- دانه‌های S<sub>3</sub>، مانده بین الک "۰/۲۵ (۶/۳۵ میلی‌متر) و #۶

(۳/۳۵ میلی‌متر) با قطر متوسط ۴/۹ میلی‌متر.

در شکل ۱ نمایی از ریز ساختار سبک‌دانه‌های لیاپور نشان داده شده است. با توجه به شکل تخلخل در دانه‌های ریز کمتر از دانه‌های متوسط و در دانه‌های متوسط کمتر از دانه‌های درشت است و همچنین دانه‌های ریز به مراتب دارای پوسته‌ی خارجی ضخیم‌تری نسبت به دانه‌های متوسط و درشت هستند.



شکل ۱. ریز ساختار سبک‌دانه‌های شیل

عبوری ماسه ی به کار رفته در جدول ۲ و شکل ۲ مشخص شده است. محدوده درصد عبوری ماسه مصرفی با محدوده ی درصد عبوری استاندارد 33 ASTM مطابقت دارد، شکل ۲.

جدول ۲. حدود دانه بندی ماسه مصرفی

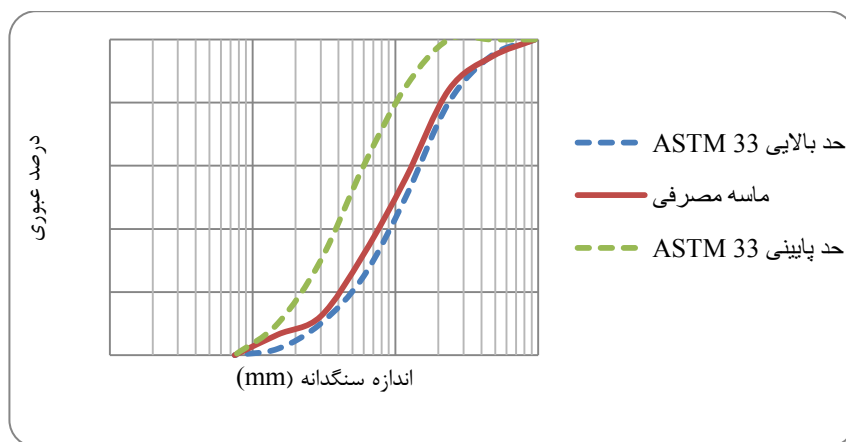
شماره الک	درصد عبوری
۳/۸	۱۰۰
۴	۹۴/۶
۸	۸۴
۱۶	۵۶
۳۰	۳۲
۵۰	۱۲/۳
۱۰۰	۶/۵
۲۰۰	۰
ته الک	-

ماتریس: از ملات ماسه و سیمانی، با طرح اختلاط ارائه شده در جدول ۱ به عنوان ماتریس استفاده شده است. در این طرح سیمان مصرفی، سیمان پرتلند نوع ۲ تولید سیمان آبیگ و ماسه مورد استفاده از نوع شکسته دو بار شور و با مدول نرمی ۳ از معادن تهراندشت کرج بوده که در شکل ۲ نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده نشان داده شده است. همچنین از ابر روان کننده بر پایه ی کربوکسیلاتی P-10 شیمی ساختمان برای روانی بیشتر استفاده شده است.

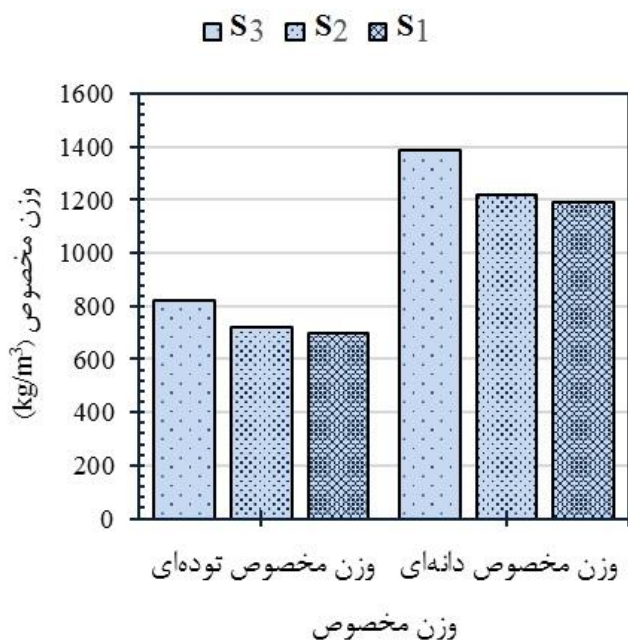
جدول ۱. طرح اختلاط ماتریس‌های انتخابی (kg/m<sup>3</sup>)

	ماسه	سیمان	آب	ابر روان کننده
وزن	۱۵۰۰	۴۵۰	۲۲۵	۴
چگالی	۲۵۵۰	۳۱۵۰	۱۰۰۰	۱۱۰۰

با توجه به اینکه تمامی انواع ریزدانه ها برای استفاده در بتن سبک مجاز می باشند، در این تحقیق از ماسه با اندازه ی اسمی (۶ mm - ۰) استفاده شد. میزان درصد



شکل ۲. نمودار دانه بندی ماسه مورد استفاده



شکل ۳. وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای سبک‌دانه‌ها

ASTM C330,331 [15] سنگدانه‌های ریزدانه با وزن مخصوص غیر متراکم  $1120 \text{ Kg/m}^3$  یا کمتر و سنگدانه‌های درشت دانه با وزن مخصوص غیر متراکم  $880 \text{ Kg/m}^3$  یا کمتر را سبک‌دانه می‌داند. همچنین وزن مخصوص مخلوط درشت دانه و ریزدانه را به  $1040 \text{ Kg/m}^3$  محدود کرده است. فاصله قابل قبول وزن مخصوص توده‌ای شیل با حداکثر وزن مخصوص استاندارد، حاکی از مناسب بودن این سنگدانه از نظر سبکی می‌باشد. همچنین مطابق نتایج با افزایش قطر وزن مخصوص دانه‌ها کاهش می‌یابد و

مشخصات مکانیکی ماسه مصرفی شامل وزن مخصوص و درصد جذب آب آن در جدول ۳ آورده شده است. اندازه گیری میزان جذب آب سنگدانه برای تعیین میزات دقیق آب مصرفی در ساخت بتن مورد استفاده قرار می‌گیرد.

جدول ۳. مشخصات مکانیکی مصالح

نوع	وزن	درصد
سنگدانه	مخصوص	جذب
	$\text{kg/m}^3$	آب
ماسه	۲/۶	۲,۱

#### ۴-انجام آزمایش‌ها و بررسی نتایج

##### ۴-۱- وزن مخصوص سبک‌دانه‌ها

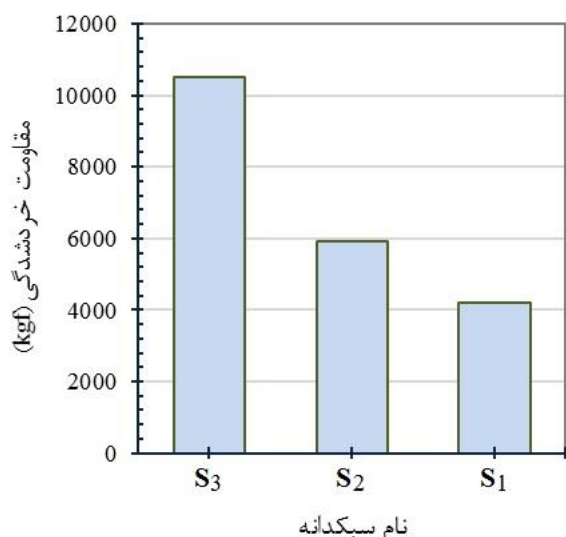
آزمایش وزن مخصوص توده‌ای و دانه‌ای بر اساس استاندارد ASTM C29 [15] و EN 10976-8-c [16] برای سه نوع دانه‌بندی شیل انجام شد که نتایج آن در شکل ۳ ملاحظه می‌گردد. با توجه به اینکه امکان خرد شدن سبک‌دانه‌ها در اثر متراکم شدن آنها توسط کوبه وجود دارد، وزن مخصوص میله خورده آن‌ها اندازه‌گیری نشده است.

مخصوص سبک‌دانه‌های شیل، از روش اول استاندارد مذکور استفاده شده است.

نتایج این آزمایش در شکل ۵ نشان داده شده است. مطابق نتایج با افزایش قطر مقاومت خردشدگی دانه‌ها کاهش می‌یابد و دانه‌های با قطر متوسط ۴/۹ میلی‌متر مقاومت خردشدگی به مراتب بیشتری نسبت به دو رده دانه‌بندی دیگر دارد.

#### ۴-۴- ارزش ضربه‌ای سبک‌دانه‌ها<sup>۲</sup>

این آزمایش طبق استاندارد BS 812 - Part 112 [17] بر روی سبک‌دانه‌های تک اندازه انجام می‌شود. در این آزمایش، ۱۵ مرتبه وزنه ۱۳/۵ کیلوگرمی از ارتفاع ۳۸۰ میلی‌متری بر روی سنگدانه‌های متراکم شده‌ی در استوانه مخصوص، سقوط می‌کند و مقدار درصد عبوری از الک جداکننده گزارش می‌شود. با توجه به مقاومت کمتر سبک‌دانه‌ها نسبت به سنگدانه‌های معمولی، این آزمایش در حالت ۵ ضربه نیز تکرار شد.



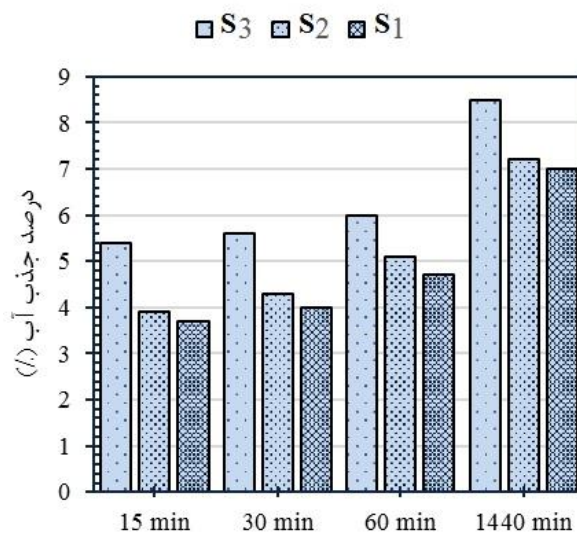
شکل ۵. مقاومت خردشدگی سبک‌دانه‌ها

ضریب تبدیل وزن مخصوص توده‌ی به دانه‌ای به طور متوسط ۱/۷ بدست آمده است.

#### ۴-۲- درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها

برای تعیین درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها در بازه‌های زمانی مشخص، آنها را در زمان معین درون آب قرار داده و بر اساس استاندارد EN 1097-6-C [16] درصد رطوبت جذبی آنها محاسبه شد. در شکل ۴ درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها در بازه‌های زمانی مشخص نشان داده شده است.

با توجه به شکل، ارتباط مشخصی بین درصد جذب آب و قطر دانه وجود ندارد و حداکثر درصد جذب آب ۲۴ ساعته دانه‌های شیل ۸/۵ درصد بدست آمده است.



شکل ۴. درصد جذب آب سبک‌دانه‌ها

#### ۴-۳- مقاومت خردشدگی سبک‌دانه‌ها<sup>۱</sup>

این آزمایش به صورت غیر مستقیم معیاری برای نشان دادن مقاومت دانه‌ها و خردشدگی آنها در اثر اعمال بار می‌باشد.

این آزمایش بر طبق استاندارد EN 13055-1 [16] انجام شده است و با توجه به بیشتر از  $150 \text{ Kg/m}^3$  بودن وزن

<sup>2</sup> Impact Value

<sup>1</sup> Crushing resistance

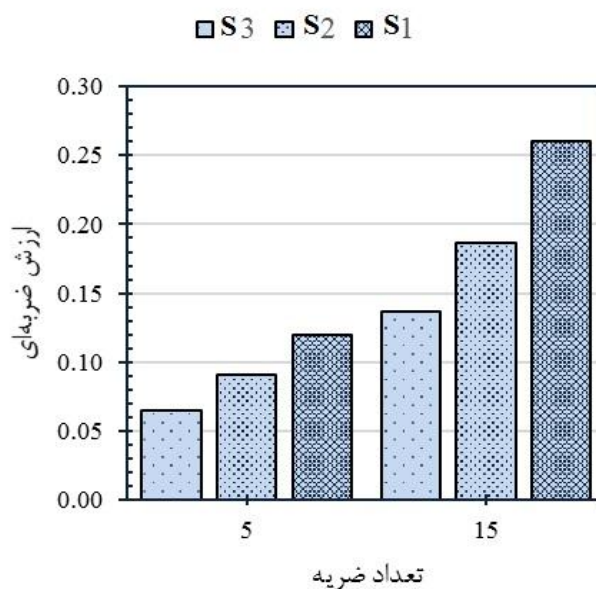
غوطه‌ور شدند. سپس از آب خارج شده، و در هوای آزاد خشک و و بعد از کپینگ کردن (کلاهدک گذاری)، مقاومت فشاری آنها تعیین شد. نتایج حاصل از آزمایش‌ها تعیین مقاومت فشاری بدست آمده از یک نمونه آزمایش در هر سری در جدول ۴ ارائه شده است.

با افزایش قطر سبکدانه همان طور که در شکل ۳ مشاهده شد وزن مخصوص توده ای سبکدانه کاهش میابد این امر موجب سبکتر شدن وزن مخصوص کل بتن ساخته شده میشود. همچنین افزایش درصد جایگزینی سبکدانه نیز کاهش وزن مخصوص بتن را در پی دارد. تغییرات وزن مخصوص نمونه‌ها در جدول ۴ آورده شده است که طبق استاندارد نمونه‌هایی که دارای وزن مخصوص کمتر از  $1800 \text{ kg/m}^3$  هستند، بتن سبک محسوب میشوند.

در شکل تغییرات مقاومت فشاری نسبت قطر سبکدانه مورد استفاده نمایش داده شده است.

در شکل نمودارها بر حسب نسبت حجمی سبکدانه به کار رفته در آنها مجزا شده‌اند. که نسبت ۰/۰ مربوط به ماتریس یا بتن بدون سبکدانه است. مطابق این شکل مشاهده می‌شود با افزایش قطر، مقاومت فشاری تک محوری کاهش پیدا می‌کند. همچنین با افزایش نسبت حجمی سبکدانه ۱۱ و ۸ میلی‌متری در بتن، مقاومت کاهش پیدا می‌کند ولی با افزایش نسبت حجمی سبکدانه ۴/۹ میلی‌متری در بتن، مقاومت افزایش پیدا می‌کند. این موضوع به این معنی است که دانه‌های لیاپور با قطر متوسط ۱۱ و ۸ میلی‌متر در ماتریس انتخابی نقش ناهمگنی تضعیف کننده و دانه‌های لیاپور با قطر متوسط ۴/۹ میلی‌متر نقش ناهمگنی تقویت کننده را دارند.

نتایج این آزمایش در شکل ۶ نشان داده شده است. مطابق شکل ۶ با افزایش قطر، ارزش ضربه‌ای دانه‌ها افزایش می‌یابد. با توجه به این روند به نظر می‌رسد این آزمایش بیشتر متأثر از دانه‌بندی دانه‌ها می‌باشد.



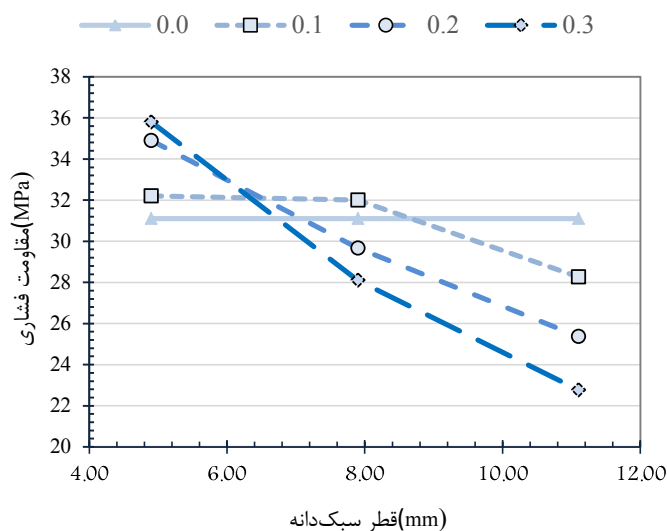
شکل ۶. ارزش ضربه‌ای سبکدانه‌ها

#### ۴-۶- ساخت و تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های بتن سبک حاوی شیل

جهت تعیین مقاومت فشاری نمونه‌های ماتریس و مواد مرکب شامل شیل، نمونه‌های استوانه‌ای استاندارد با قطر ۱۵ و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر از ماتریس (ملات ماسه و سیمانی) به تنهایی و همچنین مواد مرکب با ترکیب حجمی ۹۰ درصد ماتریس و ۱۰ درصد سبکدانه، ۸۰ درصد ماتریس و ۲۰ درصد سبکدانه و ۷۰ درصد ماتریس و ۳۰ درصد سبکدانه ساخته شد. به منظور جلوگیری از جذب آب ماتریس توسط سبکدانه، قبل از اختلاط آنها سبکدانه‌ها را به مدت ۳۰ دقیقه درون آب قرار داده و سپس توسط پارچه‌ی جاذب آب، آب سطحی آن گرفته شد. نمونه‌های ساخته شده پس از ۲۴ ساعت از قالب باز شده و تا سن ۲۸ روزگی در حوضچه آب حدود ۲۰ درجه

جدول ۴. مقاومت فشاری و وزن مخصوص نمونه‌ها

متوسط مقاومت فشاری استوانه‌ای	نسبت حجمی دانه موجود در ماده مرکب	وزن مخصوص بتن متناظر	سبک‌دانه موجود در ماده مرکب (بتن)
(MPa)	(%)	Kg/m <sup>3</sup>	-
۴۱,۱	0	۲۲۲۰	ماتریس
32.2	10	۲۰۹۰	S <sub>3</sub>
34.9	20	۱۹۵۰	
35.8	30	۱۸۰۰	
32.0	10	۲۰۸۵	S <sub>2</sub>
29.7	20	۱۹۴۰	
28.1	30	۱۷۸۵	
28.3	10	۲۰۸۰	S <sub>1</sub>
25.4	20	۱۹۳۰	
22.8	30	۱۷۷۰	



شکل ۷. تغییرات مقاومت فشاری ماده مرکب نسبت قطر سبک‌دانه

ساخته شده از دانه‌های شیل و مقایسه‌ی تأثیر اندازه قطر بر مشخصات مکانیکی آنها صورت گرفت. در حالت کلی مشاهده شد وزن مخصوص و مقاومت دانه‌ها با افزایش قطر کاهش می‌یابد و رابطه خاصی بین درصد جذب آب و اندازه قطر دانه‌ها وجود ندارد. مقاومت بتن سبک ساخته شده از شیل با ریزتر شدن سبک‌دانه‌ها افزایش می‌یابد.

#### ۵- نتیجه‌گیری

در این تحقیق، تأثیر قطر دانه‌های شیل بر ویژگی‌هایی مثل وزن مخصوص، درصد جذب آب و مشخصات مکانیکی آنها مورد مطالعه قرار گرفت. به منظور مقایسه مشخصات مکانیکی آنها، هم با انجام آزمایش‌های ارزش ضربه‌ای و مقاومت خردشدگی و تعیین مقاومت فشاری بتن سبک

[1] Wisconsin Energy Corporation, "Coal Combustion Products Utilization Handbook", Chapter 10: Minergy LWA – Structural, Masonry, and Geotechnical Lightweight Aggregates., 2004

[2] <http://www.liapor.com>

[3] شکرچی‌زاده، محمد، امدادی، آرزو، و لیبر، نیکلاس علی، "بتن سبک‌دانه، دانش، فن آوری و کاربردها"، موسسه انتشارات و چاپ دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.

[4] K. Melby, E.A. Jordet, C. Hansvold, "Long-span bridges in Norway constructed in high-strength LWA concrete", *Eng. Struct.* 18 (11) (1996) 845–849.

[5] A.K. Haug, S. Fjeld, "A floating concrete platform hull made of lightweight aggregate concrete", *Eng. Struct.* 18 (11) (1996) 831–836

[6] European Union-Brite Euram III, "LAW Material Properties State-of-the-Art", *Eurolight Con, Document BE96-3942/R2*, 1998.

[7] Chandra, S., and Berntsson, L., "Lightweight Aggregate Concrete, Science, Technology and Applications", *Noyes Publications, United States*, 2002.

[8] رئیس قاسمی، امیر مازیار؛ پرهیزگار، طیب‌به؛ و فامیلی، هرمز؛ "ارائه مدل دو فازی خمیر-دانه برای تعیین نسبت اختلاط بتن‌های سبک‌دانه حاوی لیکا". *مجله علمی و پژوهشی عمران مدرس*، دوره یازدهم، شماره ۱، بهار ۱۳۹۰.

[9] اردکانی، علیرضا، و محمود یزدانی، "مقایسه مشخصات دانه‌های رس منبسط شده با وزن مخصوص و قطرهای مختلف"، *اولین کنفرانس ملی بتن سبک*، تهران، دانشگاه تهران، انستیتو مصالح دانشکده فنی، ۱۳۹۰.

[10] رحمانی، حمیدرضا، و محمود یزدانی، "کاربرد روش تاگوچی در تعیین طرح اختلاط بهینه بتن سبک سازه‌های ساخته شده با سبک‌دانه‌های اسکوریا"، *اولین کنفرانس ملی بتن سبک*، تهران، دانشگاه تهران، انستیتو مصالح دانشکده فنی، ۱۳۹۰.

[11] شکرچی‌زاده، محمد؛ لیبر، نیکلاس علی؛ ماهوتیان، مهرداد؛ و آشوری، احسان؛ "راهنمای کاربردی بتن سبک‌دانه سازه‌ای لیکا". گزارش شماره CMI-8707294، انستیتو مصالح ساختمانی دانشکده فنی دانشگاه تهران، ۱۳۸۷.

[۱۲] افشین، حسن، و علی اکبر بابالو، "یافتن طرح اختلاط بهینه بتن‌های سبک‌دانه سازه‌ای با استفاده از روش تاگوچی"، *هفتمین کنگره بین‌المللی مهندسی عمران*، دانشگاه تربیت مدرس، دانشکده عمران، تهران، ۱۳۸۵.

[۱۳] تدین، محسن، "بررسی و ارزیابی مقاومت کششی، مدول ارتجاعی، ضریب پوآسون و شدت خوردگی بتن سبک پرمقاومت با مصالح موجود در ایران"، رساله دکتری در رشته مهندسی عمران-سازه، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران، ایران، ۱۳۸۱.

[14] باغی، مصطفی، یزدانی، محمود، و اردکانی، علیرضا "تعیین مشخصات ارتجاعی سبک‌دانه‌های مصنوعی شیل و رس منبسط شده ایران" *مهندسی عمران شریف*، دوره ۳۲-۲ شماره ۲/۲، ۱۳۹۵

[15] ASTM, "American Society For Testing And Materials", 1999.

[16] The European Standard EN 10976-8-c and 13055-1 : 2002

[17] BSI, "British Standards Institution", BS 812-110 to 112, 1990

[18] A.Sadrmomtazi, O.Alidoust, I.Sadrinejad, A.K.Haghi, *Partial replacement of aggregates by recycled polymer fibers in Cement-matrix composites, Kinetics and Thermodynamics for Chemistry and Biochemistry*, (2008).



## روش ۸-۱۸ برای کنترل مخلوط سنگدانه‌های بتن



علی اکبر کفاش بازاری  
رئیس آزمایشگاه مرکز تحقیق و توسعه سیمان تهران  
عضو انجمن بتن ایران

### چکیده

چکیده: همواره کنترل بهینه دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای در بتن جهت دستیابی به مشخصات فنی مطلوب، مورد توجه کارشناسان و فعالان صنعت بوده است. روش‌های مختلفی برای این پایش وجود دارد که در حال حاضر پرکاربردترین آنها در کشور عزیزمان، روش ملی مخلوط بتن می‌باشد. در این مقاله، روش ساده ۸-۱۸ برای این مهم معرفی می‌گردد. همچنین شاخص‌های مرتبط با این روش یعنی ضرایب درشتی و کارائی و نیز نحوه استفاده از آنها تشریح شده است. در ادامه مقایسه کلی مابین روش‌های ۸-۱۸ و طرح ملی مخلوط بتن جهت تعیین نسبت سنگدانه‌ها (شن و ماسه) صورت گرفت. برای تبیین بهتر موضوع، مثالی از یک شن و ماسه آورده شد تا محاسبه به هر دو روش برای تعیین مخلوط سنگدانه‌های بتن انجام گردد. واژگان کلیدی: دانه‌بندی مطلوب، سنگدانه، روش ۸-۱۸، کارائی، بتن.

### ۱- مقدمه:

برای طراحی مخلوط بتن، انتخاب دانه‌بندی مناسب سنگدانه‌ها اهمیت ویژه‌ای دارد که برای این مهم با توجه به کاربرد و شرایط مصرف از روش‌های مختلفی همچون روش ملی مخلوط بتن [۱]، امریکائی-ACI<sup>۱</sup> [۲ و ۳]، انگلیسی-BRE<sup>۲</sup> و موسسه تحقیقات راه [۴ و ۵]، کانادائی-CSA [۶]، هندی [۷]، روش آلمانی و غیره استفاده می‌شود.<sup>۳</sup> از این رو برای کنترل مخلوط سنگدانه‌های بتن، محدوده‌های مختلفی ارائه شده است، که بر اساس آنها می‌توان دانه‌بندی بتن را طراحی و بررسی نمود. البته درشت‌بافت یا ریزبافت نمودن مخلوط سنگدانه‌های بتن (تغییر آرایش دانه‌ها<sup>۴</sup>)

اثرات مختلفی بر کارائی بتن تازه و شرایط بتن سخت شده دارد [۸].



در این زمینه در دهه ۹۰ میلادی آقای شیل‌استون تحقیقات گسترده‌ای بر روی دانه‌بندی با رویکرد کارائی بتن انجام داد و

روش ۸-۱۸ را معرفی نمود که به صورت گسترده‌ای در آمریکا مورد استفاده قرار گرفت و در اکثر ادارات راه ایالات مختلف و نیروهای نظامی بکار گرفته شد.

### ۲- معرفی روش ۸-۱۸:

قبل از معرفی روش مذکور، ضروری است که طی یک مثال محاسبه مولفه‌های دانه‌بندی مرور می‌شود (جدول ۱). تاکید می‌شود که اساس روش بر حسب مقادیر درصد مانده روی هر الک است. بر اساس این قاعده درصد مانده روی هر الک نباید کمتر از ۰.۸٪ و بیش از ۱.۸٪ باشد که در مورد الک‌های حدود MSA و شماره ۲۰۰ صدق نمی‌کند.

<sup>۱</sup> American Concrete Institute

<sup>۲</sup> Building Research Establishment (BRE)

<sup>۳</sup> روش‌های ACI و BRE دانه‌بندی مطلوبی ارائه نداده‌اند.

<sup>۴</sup> Arrangements of Aggregate

جدول ۱- مثالی برای محاسبه مولفه‌های دانه‌بندی (درصد‌های مانده، مانده تجمعی، عبوری)

شماره و اندازه الک	وزن مانده روی الک (gr)	درصد مانده روی الک		درصد مانده تجمعی	درصد عبوری از الک	
		D	(وزن کل/100)*		U=I-M	۱۰۰%
اینچ/شماره ۲"	۵۰	۰/۰	E	۰%	M=E	۱۰۰%
۱ ۱/۲"	۳۷/۵	۰/۰	F	۰%	N=E+F	۱۰۰%
۱"	۲۵	۱۸۷/۵	G	۸%	O=E+F+G	۹۲%

$$WF adj = \frac{\text{بخش ریزدانه}}{\text{کل دانه‌ها}} +$$

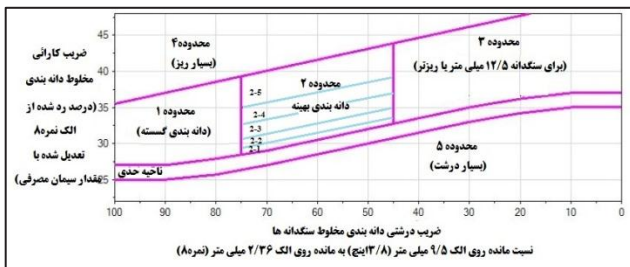
$$2.5 \times \frac{336 - \text{عیارسیمان}}{56}$$

وی برای کنترل بیشتر و با توجه به مصارف مختلف، محدوده ۲ (دانه‌بندی بهینه) نمودار خود را به ۵ بخش دسته‌بندی نمود (جدول ۲) [۱۱] (شکل ۲).

جدول ۲- دسته‌بندی محدوده ۲ نمودار شیل‌استون

نام دسته	وضعیت دانه‌بندی بتن
۲-۱	بتن با دانه‌بندی عالی که نیاز به کنترل زیادی دارد؛
۲-۲	بتن با دانه‌بندی عالی برای زیربنا <sup>۸</sup> و اجرای قالب لغزنده؛
۲-۳	بتن با دانه‌بندی ایده‌آل برای دال با کیفیت بالا؛
۲-۴	دانه‌بندی مناسب برای بتن با مصارف عمومی؛
۲-۵	دانه‌بندی مناسب با توجه به نیاز و نوع مصالح.

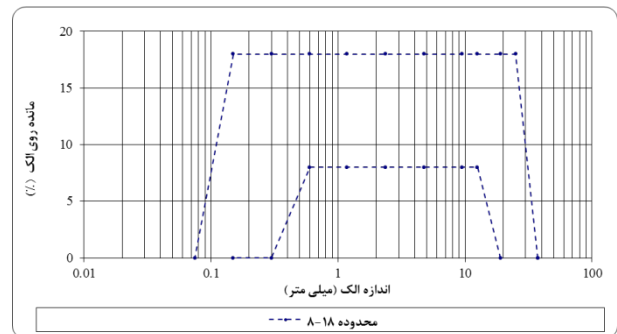
در حقیقت اگر مخلوط سنگدانه در هر محدوده‌ای از نمودار مذکور واقع گردید، کاربرد آن بتن معرفی می‌گردد. به بیانی بهتر اگر بخواهیم بتن با دانه‌بندی عالی داشته باشیم، باید ترکیب مصالح سنگدانه‌ای (شن و ماسه) را به گونه‌ای تنظیم نمود که در محدوده ۲-۱ قرار گیرد. جهت دستیابی به شرایط مذکور حتی شاید نیاز به استفاده از مصالح جدیدی (مثلا پودر سنگ یا ماسه بادی) باشد.



شکل ۲- نمودار ضریب درشتی-کارآئی بتن و محدوده‌های دانه‌بندی

مخلوط سنگدانه‌های بتن در روش ۱۸-۸

آقای شیل‌استون برای تعیین محدوده مجاز دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های بتن از درصد مانده روی هر الک استفاده نمود. وی دانه‌بندی حجمی مجموع مصالح سنگدانه‌ای بتن را به سه محدوده شامل: ۱- بخش درشت‌دانه «Q» -دانه‌های بزرگ‌تر از ۹/۵ میلی‌متر (الک ۳/۸ اینچ)؛ ۲- بخش میانی «I» -دانه‌های مابین ۹/۵-۲/۳۶ میلی‌متر؛ ۳- بخش ریزدانه «W» -دانه‌های ریزتر از ۲/۳۶ میلی‌متر (الک نمره ۸) تقسیم نمود. سپس بر اساس میزان مانده روی الک‌ها، منحنی توده‌کاه<sup>۹</sup> را معرفی کرد که به قاعده «۸-۱۸» معروف شد (شکل ۱) [۹ و ۱۰].



شکل ۱- نمودار کلی دانه‌بندی محدوده ۸-۱۸ برای مخلوط سنگدانه‌های بتن

او همچنین ۲ عامل مهم را معرفی نمود: ۱- ضریب درشتی<sup>۶</sup>: نسبت دانه‌های بخش درشت (Q) به مجموع دانه‌های بخش میانی و درشت (I+Q)؛ ۲- ضریب کارآئی<sup>۷</sup>: نسبت دانه‌های عبوری از الک نمره ۸ (W) به کل دانه‌ها (I+W+Q) که البته برای مشارکت ریزدانه‌ها (>۷۵ میکرون یا سیمان) این ضریب تصحیح می‌گردد. مطابق تحقیقات آقای شیل‌استون در یک یارد مکعب (۰/۷۶ مترمکعب) به ازای افزایش یا کاهش هر ۱ پاکت سیمان آمریکائی (۵۶ کیلوئی) نسبت به ۶ پاکت سیمان مینا (۳۳۶ کیلوگرم)، معادل ۲/۵ درجه به ضریب کارآئی افزوده یا کاسته می‌شود:

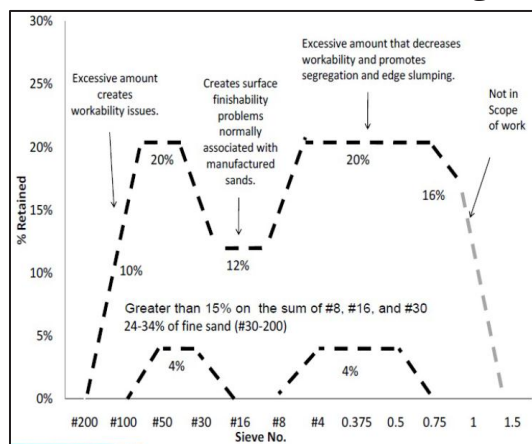
<sup>5</sup> Hay stack

<sup>6</sup> Coarseness Factor (CF)

<sup>7</sup> Workability Factor (WF)

<sup>8</sup> Substructure

مزایای بهینه‌سازی مخلوط سنگدانه‌ها (به کمک روش ۱۸-۸) در منابع مختلفی [۱۸-۱۲] بررسی شده است. باید اشاره نمود که روش ۱۸-۸ جایگزین نمودار ترانتولا<sup>۹</sup> (شکل ۳) می‌باشد [۱۹].



شکل ۳- نمودار ترانتولا برای دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های بتن

### ۳- مقایسه روش ۱۸-۸ و روش ملی طرح مخلوط بتن:

در طراحی مخلوط سنگدانه‌های بتن به روش ملی اولین گام تعیین توان متناظر در رابطه اصلاح شده فولر-تامسون بر اساس محل مصرف بتن و با استفاده از جدول پیشنهادی مربوطه (جدول ۳) است.

جدول ۳- تقسیم‌بندی نواحی مطلوب دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های بتن و توان‌های متناظر با آن به همراه موارد کاربرد پیشنهادی [۲۰].

ناحیه	منطقه	توان منحنی بالایی	توان منحنی پایینی	موارد کاربرد پیشنهادی مناطق مختلف <sup>۹</sup>
(۱)	۱-۱	۰/۵۵	۰/۶۷	شالوده و قطعات حجیم با روانی کم تا متوسط و رده اسلابل S <sub>1</sub> و S <sub>2</sub> و غیر پمپی
	۱-۲	۰/۴۵	۰/۵۵	تیر و دال با روانی متوسط و رده اسلابل S <sub>2</sub> و بتن پمپی درشت بافت و نسبتا سفت
	۱-۳	۰/۳۵	۰/۴۵	ستون و دیوار با روانی رده S <sub>3</sub> بتن پمپی ریز، بتن ترمی درشت بافت یا رده اسلابل S <sub>4</sub> و بتن تعمیری درشت بافت
(۲)	۲-۱	۰/۲۲۵	۰/۳۵	بتن ترمی ریز بافت، بتن‌های پاشیدنی با بافت دانه‌بندی متوسط، بتن خودتراکم درشت بافت و بتن تعمیری ریز بافت
	۲-۲	۰/۱	۰/۲۲۵	بتن پاشیدنی ریز بافت، بتن خودتراکم ریز بافت

در ادامه رابطه فولر دیده می‌شود:

$$P_i(\%) = \left[ \frac{D_i}{D_{max}} \right]^{0.5} * 100 \quad \text{رابطه ۱:}$$

رابطه تامسون عبارتست از:

$$P_i(\%) = \left[ \frac{D_i}{D_{max}} \right]^n * 100 \quad \text{رابطه ۱:}$$

که  $d_i$ : هر اندازه یا الک،  $P_i$ : درصد گذشته از هر الک،  $D_{max}$ : حداکثر اندازه سنگدانه می‌باشند. لذا جهت محاسبه، محدوده‌های (مجاز) دانه‌بندی بر اساس حداکثر اندازه دانه‌ها (MSA) با استفاده از رابطه اصلاح شده فولر-تامسون ترسیم می‌گردد. (رابطه ۳).

$$P_i(\%) = \frac{100\%}{1 - \left(\frac{d_0}{D}\right)^n} \times \left[ \left(\frac{d}{D}\right)^n - \left(\frac{d_0}{D}\right)^n \right] \quad \text{رابطه ۳:}$$

که در آن  $P_i$ : درصد تجمعی از الک با قطر  $d$  (به صورت حجمی)،  $D$ : حداکثر اندازه سنگدانه‌ها و  $n$  توانی است که برای منحنی A برابر ۰/۶۷، برای منحنی B برابر ۰/۳۵ و برای منحنی C برابر ۰/۱ می‌باشند. بنابراین به صورت کلی منحنی A مبین حداکثر درشتی و منحنی B معرف حداقل ریزی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های بتن است. لذا پس از انتخاب توان منحنی بالایی و توان منحنی پائینی، محدوده دانه‌بندی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های بتن مدنظر ترسیم می‌گردد. در مرحله بعدی به روش آزمون و خطا مقادیر درصد وزنی سنگدانه‌ها اعم از شن، ماسه، پودر سنگ و غیره تعیین می‌شود تا منحنی دانه‌بندی حاصله در محدوده مجاز مخلوط سنگدانه‌های بتن قرار گیرد [۲۰]. البته رابطه ۴، (توسط آندرسون و همکارش) صورت ساده‌تر شده همان رابطه اصلاح شده فولر-تامسون می‌باشد. در روش ملی مخلوط بتن،  $d_0$  مرز سنگدانه و مواد ریزدانه برابر ۰/۰۷۵ میلی‌متر می‌باشد و در روش آلمانی از مقدار ۰/۱۲۵ میلی‌متر استفاده شده است.

$$P_i(\%) = 100 \times \left[ \frac{d_i - d_0}{D_{max} - d_0} \right]^n \quad \text{رابطه ۴:}$$

$d_i$ : هر اندازه یا الک،  $P_i$ : درصد گذشته از هر الک  $d_i$ ،  $D_{max}$ : حداکثر اندازه سنگدانه و  $d_0$ : الکی که کوچکتر از آن سنگدانه تلقی نمی‌شود.)

برخلاف روش ملی طرح مخلوط بتن، در روش ۱۸-۸ محاسبه محدوده دانه‌بندی مجاز وجود ندارد و بر اساس جدول ۳ است. لیکن در مرحله بعدی مشابه روش ملی طرح مخلوط بتن، به روش آزمون و خطا مقادیر درصد وزنی سنگدانه‌ها تعیین می‌شود تا منحنی دانه‌بندی حاصله در محدوده مجاز مخلوط سنگدانه‌های بتن قرار گیرد.

طبق منابع و تحقیقات متعدد [۲۱ و ۲۲]، ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون نقش مهمی در بتن دارند. در طراحی سنگدانه‌ها به روش ملی طرح مخلوط بتن، میزان این ذرات کنترل می‌شود، اما در روش ۱۸-۸ به این ذرات توجهی نشده است.

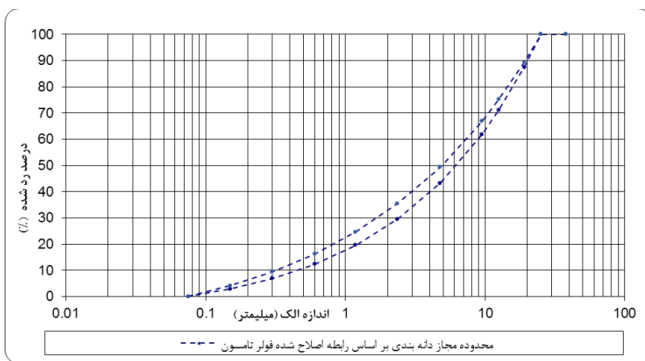
در روش ملی مخلوط بتن، تاثیر حداکثر اندازه سنگدانه‌ها لحاظ گردیده، اما در روش ۱۸-۸ چندان توجهی به آن نشده است. همچنین در روش ۱۸-۸ نام الک‌ها برای ترسیم محدوده ذکر

<sup>9</sup> Tarantula Curve

۰/۴۵ می‌باشند. لذا محدوده دانه‌بندی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های بتن ترسیم می‌گردد (جدول ۵ و شکل ۵).

جدول ۵- محدوده دانه‌بندی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های بتن به روش ملی (محاسباتی به کمک رابطه فولر-تامسون اصلاح شده و توان‌های ۰/۳۵ و ۰/۴۵)

شماره و اندازه الک	درصد عبوری		
	محدوده پائینی (n:0.45)	محدوده بالایی (n:0.35)	میلیمتر اینچ/شماره
۱"	۱۰۰	۱۰۰	۲۵
۳/۴"	۸۹	۸۷	۱۹
۱/۲"	۷۵	۷۱	۱۲/۵
۳/۸"	۶۷	۶۲	۹/۵
شماره ۴	۴۹	۴۳	۴/۷۵
شماره ۸	۳۵	۳۰	۲/۳۶
شماره ۱۶	۲۵	۲۰	۱/۱۸
شماره ۳۰	۱۶	۱۲	۰/۶
شماره ۵۰	۹	۷	۰/۳
شماره ۱۰۰	۴	۳	۰/۱۵
شماره ۲۰۰	۰	۰	۰/۰۷۵



شکل ۵- محدوده دانه‌بندی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های بتن به روش ملی

در گام بعدی به روش آزمون و خطا مقادیر درصد وزنی سنگدانه‌ها شامل شن و ماسه تعیین می‌شود تا منحنی دانه‌بندی حاصله در محدوده مجاز مخلوط سنگدانه‌های بتن قرار گیرد. این مقادیر به صورت ۵۵٪ شن و ۴۵٪ ماسه تعیین شد که دانه بندی آن در نمودار شکل ۶ دیده می‌شود. منحنی دانه‌بندی ترکیبی مصالح تقریباً بهینه و در محدوده مجاز است و مدول نرمی آن ۵/۳ می‌باشد.

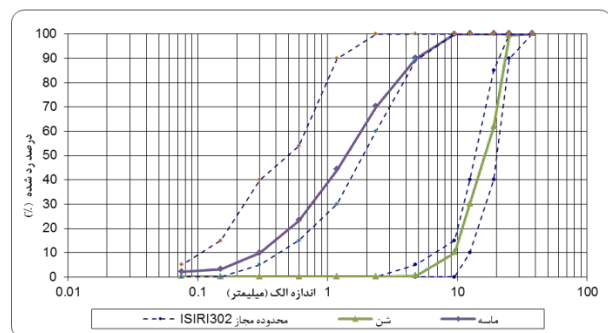
نشده است، لذا برای تعیین محدوده (حد مجاز بالا و پائین منحنی دانه‌بندی ترکیب سنگدانه‌ها) محاسبه درصد عبوری از هر الک، مشکل و مبهم می‌باشد.

۴- مثالی برای مقایسه طراحی مخلوط سنگدانه‌های بتن به روشهای ۱۸-۸ و ملی:

فرض کنیم که مصالح سنگدانه‌ای موجود در کارگاه دارای دانه‌بندی مندرج در جدول ۴ و شکل ۴ می‌باشند و مصرف بتن در دیوار و ستون با اسلامپ ۱۵-۱۰ سانتی‌متر خواهد بود.

جدول ۴- دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای مفروض در کارگاه

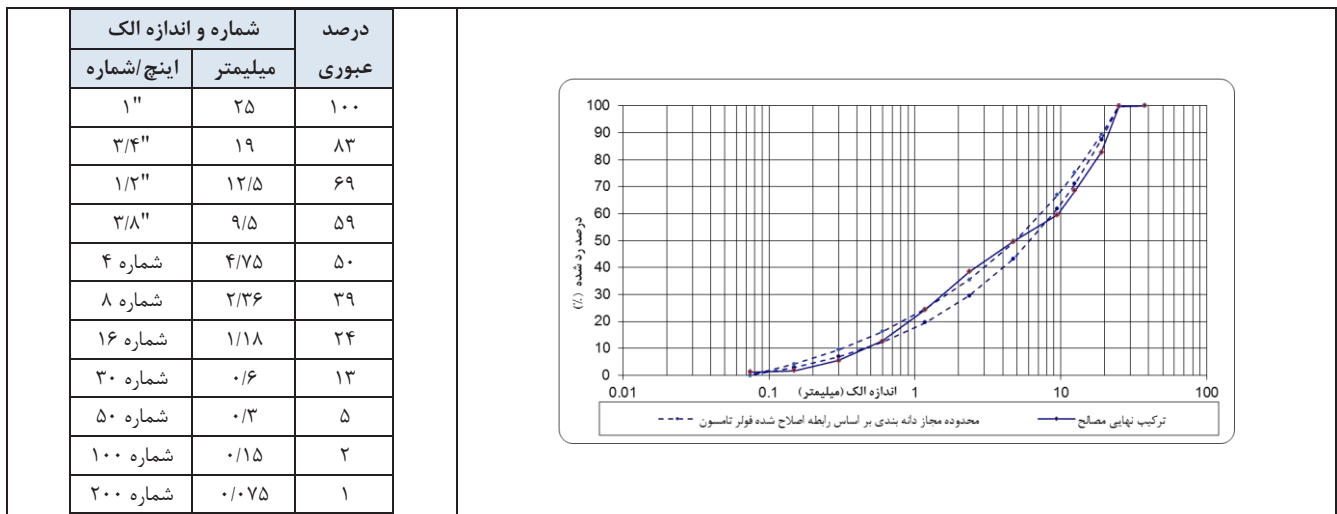
شماره و اندازه الک	درصد عبوری		درصد مانده	
	میلیمتر	شن	ماسه	شن
۱"	۲۵	۱۰۰	۰	۰
۳/۴"	۱۹	۶۲	۰	۳۸
۱/۲"	۱۲/۵	۳۰	۰	۷۰
۳/۸"	۹/۵	۱۰	۰	۹۰
شماره ۴	۴/۷۵	۹۰	۱۰	۱۰۰
شماره ۸	۲/۳۶	۷۰	۳۰	۱۰۰
شماره ۱۶	۱/۱۸	۴۴	۵۶	۱۰۰
شماره ۳۰	۰/۶	۲۳	۷۷	۱۰۰
شماره ۵۰	۰/۳	۱۰	۹۰	۱۰۰
شماره ۱۰۰	۰/۱۵	۳	۹۷	۱۰۰
شماره ۲۰۰	۰/۰۷۵	۲	۹۸	۱۰۰
Fm:			۳/۶	۷/۳



شکل ۴- منحنی دانه‌بندی مصالح سنگدانه‌ای مفروض در کارگاه

#### ۴-۱- حل مثال به روش ملی طرح مخلوط بتن:

برای ترسیم محدوده دانه‌بندی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های ۳ پارامتر تعیین می‌شود: ۱- حداکثر اندازه دانه‌ها بر اساس جدول ۳ و شکل ۴، MSA:25 است؛ ۲- بر اساس محل مصرف بتن (ستون و دیوار) توان منحنی بالایی در رابطه فولر تامسون: ۰/۳۵ و ۳- توان منحنی پائینی:



شکل ۶- ترسیم نمودار در محدوده دانه‌بندی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های بتن به روش ملی با داده‌های مفروض

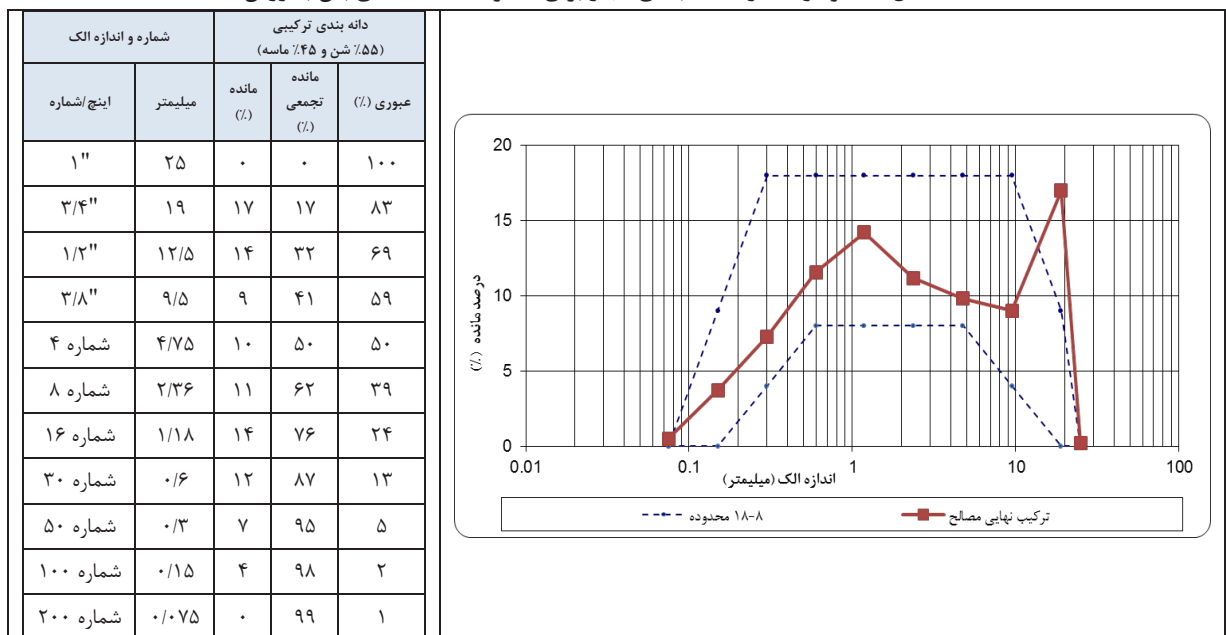
جدول ۶- محدوده دانه‌بندی برای مخلوط سنگدانه‌های بتن به روش ۱۸-۸

شماره و اندازه الک	درصد مانده روی الک		
	محدوده پائینی	محدوده بالائی	
اینچ/شماره	میلی متر		
۱"	۲۵	۰	۰
۳/۴"	۱۹	۹	۰
۳/۸"	۹/۵	۱۸	۸
شماره ۳۰	۰/۶	۱۸	۸
شماره ۵۰	۰/۳	۱۸	۰
شماره ۱۰۰	۰/۱۵	۹	۰
شماره ۲۰۰	۰/۰۷۵	۰	۰

۴-۲- حل مثال به روش ۱۸-۸:

این روش مشابه روش ملی نیست و نیاز به محاسبه و تعیین محدوده مجاز نمی‌باشد؛ لیکن برای تعیین نسبت مصالح (شن و ماسه) به روش آزمون و خطا، مقادیر درصد حجمی (در اینجا درصدها به صورت وزنی در نظر گرفته شد.) سنگدانه‌ها تعیین می‌شوند (شکل ۷ و جدول ۶). در اینجا نیز مقادیر به صورت ۵۵٪ شن و ۴۵٪ ماسه تعیین شد که دانه‌بندی آن در نمودار شکل ۷ دیده می‌شود. همچنین منحنی دانه‌بندی ترکیبی مصالح تقریباً بهینه و در محدوده مجاز است.

شکل ۷- نمودار محدوده دانه‌بندی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های بتن به روش ۱۸-۸



شکل ۸- ترسیم نمودار در محدوده دانه‌بندی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های بتن به روش ۱۸-۸ با داده‌های مفروض

بر اساس روابط ارائه شده:

۴۱=مانده روی الک ۹/۵ میلی متر Q (بخش درشت دانه) ۳۹=عبوری از الک ۲/۳۶ میلی متر W (بخش ریزدانه)

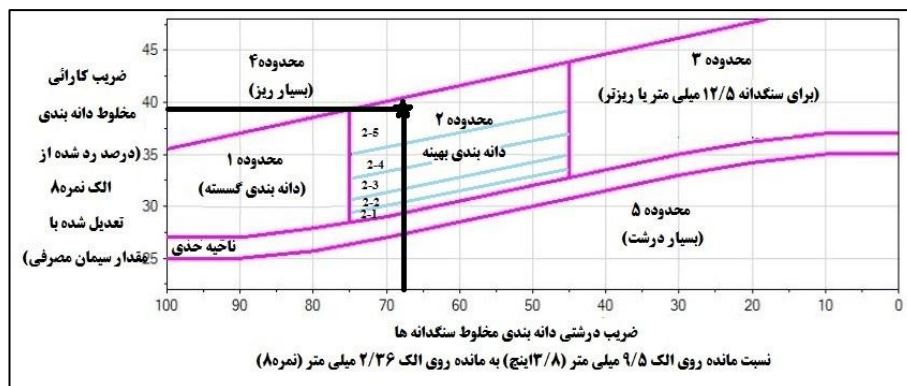
۲۰=(۳۹+۴۱)-۱۰۰=ذرات بین الک‌های ۹/۵ و ۲/۳۶ میلی متر I (بخش میانی)

$$\text{ضریب درشتی} = \frac{41}{41 + 20} = 67$$

$$\text{ضریب کارائی} = \frac{39}{39 + 20 + 41} = 39$$

کاربرد مخلوط سنگدانه‌های مذکور با نسبت تعیین شده در محدوده ۲-۵ (دانه‌بندی مناسب با توجه به نیاز و نوع مصالح) قرار می‌گیرد که مصرف این بتن برای ستون و دیوار مناسب است.

لذا در این مخلوط مقادیر Q، I و W به ترتیب ۴۱، ۲۰ و ۳۹ و نیز ضرایب درشتی و کارائی ۶۷ و ۳۹ می‌باشد. شکل ۹ کاربرد مخلوط سنگدانه‌ها براساس نمودار ارائه شده توسط آقای شیل‌استون را نشان می‌دهد. بر این اساس



شکل ۹- نقطه‌گذاری در نمودار ضریب درشتی-کارائی بتن و محدوده‌های دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های بتن در روش ۱۸-۸ با داده‌های مفروض

#### ۵- نتیجه‌گیری:

در این مقاله تعیین دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های بتن به روش ۱۸-۸ تشریح گردید. لذا مقایسه دو روش ملی و ۱۸-۸ برای طراحی مخلوط سنگدانه‌های بتن نشان می‌دهد که: ضرایب درشتی، کارائی و کارائی اصلاح شده برای دانه‌بندی بهینه در روش ۱۸-۸ معرفی می‌شوند؛ اما در روش ملی چنین ضرایبی معرفی نشده‌اند.

۱. در روش ملی محدوده مجاز دانه‌بندی ترکیب سنگدانه‌ها بر اساس ۳ پارامتر تعیین می‌شود: حداکثر اندازه دانه‌ها-MSA؛ محل مصرف بتن (توان‌های بالائی و پائینی منحنی در رابطه اصلاح شده فولر-تامسون). لذا محدوده دانه‌بندی مجاز برای مخلوط سنگدانه‌های بتن ترسیم می‌گردد.

۲. ذرات ریزتر از ۷۵ میکرون در روش ملی مورد توجه است، اما در روش ۱۸-۸ چندان بررسی نمی‌گردد.

۳. مثال حل شده در هر دو روش، دانه‌بندی نسبتاً بهینه برای ترکیب سنگدانه‌ها به صورت ۵۵٪ شن و ۴۵٪ ماسه را نشان داد.

#### ۶- تشکر:

از راهنمایی‌های آقای دکتر تدین بسیار سپاسگذارم.

در حقیقت مراحل مذکور در هر ۲ روش، برای حصول اطمینان از دانه‌بندی بهینه در بتن است. دانه‌بندی بهینه، یعنی از وجود همه نوع اندازه دانه‌ها با آرایش مناسب در بتن مطمئن گردید. به بیان دیگر جورشدگی دانه‌ها نقش مهمی در مقاومت بتن دارد. البته این موضوع (یعنی دانه‌بندی بهینه سنگدانه‌های بتن) توجیه اقتصادی نیز دارد، زیرا که به مصرف کمتر و بهینه سیمان در بتن کمک می‌نماید؛ همچنین قطعاً مقاومت و استحکام سنگدانه‌های طبیعی از مقاومت خمیر سخت شده سیمان بیشتر می‌باشد [۲۳]. سایر مشخصات بتن همچون روانی (Slump)، کارائی (Workability)، پرداخت‌پذیری (Finish ability)، پمپ‌پذیری (Pump ability) و غیره بسیار متأثر از دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌های بتن است. برای بررسی رعایت طرح مخلوط اولیه بتن، کنترل دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها به روش شستشوی بتن تازه بر روی الک ۷۵µ (شماره ۲۰۰) [۲۴] توصیه می‌گردد.

- [۱] "راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۳۳.
- [2] ACI 211.1-91 (Reapproved 2002). "Standard Practice for Selecting Proportions for Structural Normal, Heavyweight, and Mass Concrete". Pages 7-19.
- [3] Steven H. Kosmatka, Beatrix Kerkhoff, and William C. Panarese (2003). "Design and Control of Concrete Mixtures". PCA (Portland Cement Association). FOURTEENTH EDITION. P150.
- [4] BRE (Building Research Establishment) (Secend edition-1988), "Design of normal concrete mixes". P13.
- [5] SHETTY, M.S. (2000). "CONCRETE TECHNOLOGY THEORY AND PRACTICE". Ram Nagar, New Delhi - 110 055. P474.
- [6] CSA A23.1. (2014). "Concrete materials and methods of concrete construction / Test methods and standard practices for concrete".
- [7] Indian Standard "RECOMMENDED GUIDELINES FOR CONCRETE MIX DESIGN" Gr 6.
- [۸] کفاش، ع. "بررسی تاثیر تغییرات مدول نرمی مخلوط سنگدانه بر مشخصات بتن تازه و سخت شده". دهمین کنفرانس ملی بتن-۱۵ و ۱۶ مهر ماه ۱۳۹۷.
- [9] I. Shilstone, J. M., Sr., 1990, "Concrete Mixture Optimization," *Concrete International*, V. 12, No. 6, June, pp. 33-39
- [10] JAMES M. SHILSTONE, SR. AND JAMES M. SHILSTONE, JR (FEBRUARY 2002). "Performance-Based Concrete mixture and specifications for todays". *Concrete international*.
- [۱۱] قلعه، ک. نمودار ضریب درشتی، معیاری برای بتن با ترکیب مناسب فصلنامه علمی-نظری کیسون دور جدید شماره ۵۱
- [12] J. Mauricio Ruiz. David Santin. (4 December 2015). "The Optimized Mixtures Will Save You Headaches and Money". ACPA Annual Meeting. Texas department of transport.
- [13] BASIL ABDULKAREEM. (July, 2012) "OPTIMIZATION OF AGGREGATE GRADATION & CONCRETE MATURITY". Submitted to the Faculty of the Graduate College of the Oklahoma State University in partial fulfillment of the requirements for the Degree of MASTER OF SCIENCE.
- [14] Majella Anson-Cartwright. (2011) "Optimization of Aggregate Gradation Combinations to Improve Concrete Sustainability". A thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master of Applied Science Department of Civil Engineering University of Toronto.
- [15] Karthik Obla. & Haejin Kim. & Colin Lob. (May 2007) "Effect of Continuous (Well-Graded) Combined Aggregate Grading on Concrete Performance- Phase A: Aggregate Voids Content (Packing Density)". Project D340. NRMCA Research laboratory (National Ready Mixed Concrete Association).
- [16] Steve Waalkes. (4 October 2016). "QC/QA for local Agencies and optimized Aggregate gradations for DM and S2M concrete grades". MCA local concrete seminar.
- [17] Robert L. Varner, P.E. (December, 2012). "OPTIMIZING MISSISSIPPI AGGREGATES FOR CONCRETE BRIDGE DECKS". Mississippi Department of Transportation. State Study 231. Project No. 105803 153000 and FMS 106172-101000.
- [18] Ashrafa, W. B. and Noorb, M. A. (2011). "Performance-Evaluation of Concrete Properties for Different Combined Aggregate Gradation Approaches". Elsevier. 14 (2011) 2627-2634.
- [19] Peter Talor & Ezgi Yurdakul & Xuhao Wang & Xin Wang. (2015) "Concrete Pavement Mixture Design and Analysis (MDA): An Innovative Approach To Proportioning Concrete Mixtures". Iowa State University. Reports 106. TPF-5(205).
- [۲۰] "راهنمای روش ملی طرح مخلوط بتن" مرکز تحقیقات ساختمان و مسکن، ص ۳۳.
- [21] Priyanka A. Jadhava and Dilip K. Kulkarnibi. (June 2012) "AN EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE PROPERTIES OF CONCRETE CONTAINING MANUFACTURED SAND". *International Journal of Advanced Engineering Technology*. International Journal of Advanced Engineering Technology E-ISSN 0976-3945 IJAET/Vol.III/ Issue II/April-June, 2012/101-104.
- [22] ICAR 104-1F. "THE EFFECTS OF AGGREGATES CHARACTERISTICS ON THE PERFORMANCE OF PORTLAND CEMENT CONCRETE". P27.
- [۲۳] کفاش، ع. "بررسی اثر کیفیت مصالح سنگدانه‌ای بر کیفیت بتن". ماهنامه فناوری سیمان، شماره ۱۱۱، اسفند ۹۶، صفحه ۴۳.
- [24] JIS A 1112 (1989) (English), "Method of test for washing analysis of fresh concrete".