

استفاده از الگوریتم ترکیبی جستجوی مداری اتم-گرگ خاکستری برای شناسایی ترک در تیر یکسر گیردار



سعیده قائمی فرد
دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه
دانشگاه محقق اردبیلی



امین قنادی اصل
دانشیار مهندسی عمران-سازه
دانشگاه محقق اردبیلی

چکیده

وجود ترک در سازه، باعث کاهش عملکرد آن و افزایش اندازه ترک‌ها منجر به شکست سازه می‌شود. بنابراین، تعیین دقیق خصوصیات ترک، مانند مکان و عمق، یکی از مسائل کلیدی مهندسی برای ارزیابی قابلیت اطمینان سازه‌ها می‌باشد. یک همبستگی قوی بین تغییرات فرکانس طبیعی تیر و پارامترهای ترک وجود دارد. بنابراین، محل و عمق ترک در یک تیر را می‌توان با اندازه‌گیری فرکانس طبیعی آن پیش‌بینی کرد. از این رو، فرکانس طبیعی اندازه‌گیری شده را می‌توان به عنوان پارامتر ورودی الگوریتم استفاده کرد. برای شناسایی محل و عمق ترک در یک تیر کنسول، در این مطالعه ما یک تکنیک بهینه‌سازی ترکیبی جدید، جستجوی مداری اتم-گرگ خاکستری (AOS-GWO) را ارائه می‌کنیم. به طور کلی می‌توان گفت که هدف این مقاله، شناسایی ترک در تیر کنسول با استفاده از بهینه‌ساز هیبریدی جدید AOS-GWO است. ادغام متدولوژی گرگ خاکستری در چارچوب پایه الگوریتم جستجوی مداری اتم با موفقیت به موضوع تله بهینه محلی پرداخته و کیفیت راه‌حل‌های تولید شده توسط الگوریتم را به طور قابل توجهی افزایش داده است. هدف از روش هیبریداسیون پیشنهادی، ترویج بهبود روش‌های اکتشاف- بهره‌برداری جستجوی AOS بود. واژه‌های کلیدی: بهینه‌سازی، شناسایی ترک، الگوریتم گرگ خاکستری، الگوریتم جستجوی مداری اتمی، تیر یکسر گیردار

رویکردهای ریاضی توسعه یافته‌اند. اگرچه روش‌های بهینه‌سازی توسط شخصیت‌های تاریخی مانند نیوتن، لاگرانژ و کوچیسکی^۱ برای مسائل مقیاس کوچک‌تر مورد استفاده قرار گرفت، امروزه مهندسان برای حل مؤثر مسائل طراحی مهندسی گسترده‌تر و پیچیده‌تر به نسخه‌های بهبود یافته و ترکیبی این الگوریتم‌ها تکیه

۱. مقدمه

بهینه‌سازی بخشی ضروری از طراحی مهندسی است و از این رو در بسیاری از مسائل چالش برانگیز دنیای واقعی با چارچوب‌های مختلف، الگوریتم‌های فراابتکاری به عنوان ابزاری قوی برای بهینه‌سازی به طور فزاینده‌ای جذاب شده‌اند. مقررات مهندسی می‌تواند با استفاده از مدل‌های بهینه طراحی شده به مکانیزم‌های پایدار و کارآمد دست یابد. این مدل‌ها بر اساس قضایا و

I Cauchy'ski

می‌کنند. طی دو دهه گذشته، افزایش پدیده‌های زیست‌محیطی و جهانی به دلیل پیشرفت‌های فنی-منطقی و رشد جمعیت، طراحی‌های پیچیده مهندسی را چالش‌برانگیزتر کرده است. به عنوان یک راه‌حل، الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری، به یک انتخاب محبوب برای دستیابی به راه‌حل‌های معقول در زمان کمتر تبدیل شده‌اند [۱].

الگوریتم‌های بهینه‌سازی فراابتکاری متعددی توسعه داده شده‌اند و علیرغم فرآیندها و بافت‌های منحصر به فردشان در بهبود فرآیندهای بهینه‌سازی، به مراتب از پیشینیان خود مؤثرتر هستند. برای مقابله با مسائل بهینه‌سازی کلی، الگوریتم‌های فراابتکاری راه‌حلی هستند که اغلب مورد استفاده قرار می‌گیرند. راه‌حل بهینه در درجه اول با شبیه‌سازی طبیعت و هوش انسانی به دست می‌آید. با انجام یک جستجوی سراسری، آنها می‌توانند یک راه‌حل تقریبی را شناسایی کنند که تا حدی به راه‌حل بهینه نزدیک است. اکتشاف و بهره‌برداری، از اصول اساسی فراابتکاری‌ها هستند. اکتشاف برای جستجوی کامل کل فضا و یافتن راه‌حل بهینه، که به طور بالقوه می‌تواند در هر جایی در آن قرار گیرد، بسیار مهم است. برای به حداکثر رساندن استفاده از اطلاعات ارزشمند، مشارکت در بهره‌برداری مؤثر ضروری است. راه‌حل‌های بهینه عموماً به روش‌های خاصی مرتبط هستند. با استفاده از این همبستگی‌ها به تدریج تنظیم می‌شوند و به آسانی از راه‌حل اولیه جستجو شده تا به راه‌حل بهینه برسند. فراابتکاری‌ها، برای دستیابی به یک تعادل هماهنگ بین اکتشاف و بهره‌برداری تلاش می‌کنند. آنها در سال‌های اخیر به دلیل مزایای متعدد، از جمله عملکرد ساده و شهودی و همچنین سرعت سریع، مورد توجه محققان قرار گرفته‌اند. آنها را می‌توان بر اساس الهامات

مختلف طراحی به چهار گروه الگوریتم‌های مبتنی بر ازدحام، تکاملی، فیزیکی و مبتنی بر انسان دسته‌بندی کرد.

ترک موجود در یک جزء سازه‌ای، سختی موضعی آن را تغییر می‌دهد. بنابراین، دامنه ارتعاشات و فرکانس‌های طبیعی به دلیل وجود چنین ترک‌هایی تغییر می‌کند. یکی از روش‌های تعیین محل و عمق ترک، استفاده از اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی است. برای شناسایی آسیب‌های سازه-ای، می‌توان از روش معکوس استفاده کرد. برای این منظور، روش بهینه‌سازی تکرار می‌شود تا تابع هدف را به حداقل یا حداکثر برسانیم تا یک ترک را پیدا کنیم. در این عملیات مکرر، می‌توان مکان ناشناخته ترک را بر اساس برخی پارامترها تعیین کرد که با استفاده از روش بهینه‌سازی می‌توان آنها را برای رسیدن به بهترین پاسخ به روز کرد. دیماروگوناس و پاپادوپولوس^۲ [۲] و کیان و همکاران^۳ [۳] ماتریس سختی تیر ترک خورده را بدست آوردند و از فاکتورهای شدت برای بررسی ویژگی‌های پاسخ دینامیکی مانند اشکال مودی و فرکانس‌های طبیعی استفاده کردند. نحوی و جباری^۴ [۴] شدت شکست تیرهای ترک خورده کنسول را با استفاده از روش اجزاء محدود و داده‌های تجربی ارزیابی کردند. ارتعاش جانبی تیرهای اولیبر-برنولی ترک خورده توسط چندروس و همکاران^۵ ارزیابی شد [۵]. همچنین، کیم و استابز^۶ [۶] یک تکنیک عملی را برای محاسبه عمق ترک‌ها با استفاده از اصلاح در فرکانس‌های طبیعی بررسی کردند. قنادی اصل و قائمی فرد به تشخیص ترک در تیر کنسول با استفاده از الگوریتم‌های ترکیبی سه

2 Dimarogonas and Papadopoulos

3 Qian et al.

4 Nahvi and Jabbari

5 Chondros et al.

6 Kim and Stubbs

معادلات دیفرانسیل ارتعاش آزاد تیر اویلر-برنولی به صورت زیر است:

$$EI \frac{\partial^4 W}{\partial X^4} + \rho A \frac{\partial^2 W}{\partial t^2} = 0 \quad (2)$$

$$\left(\frac{E}{\rho}\right) \frac{\partial^2 V}{\partial X^2} = \frac{\partial^2 V}{\partial t^2} \quad (3)$$

معادله (۲) ارتعاش عرضی را نشان می‌دهد و معادله (۳) ارتعاش طولی را نشان می‌دهد که A سطح مقطع تیر است. ρ چگالی و V و W به ترتیب حرکات طولی و عرضی را نشان می‌دهند. توابع استاندارد تیر ترک خورده به صورت بدون بعد برای هر دو ارتعاشات خمشی و طولی به صورت ثابت است و معادله سیستم را می‌توان به صورت $|Q|=0$ ، که در آن Q یک ماتریس 12×12 است که مطابق مرجع [۷] از آن استفاده می‌شود.

۳. بررسی تابع هدف برای مکان‌یابی ترک با استفاده از الگوریتم بهینه‌سازی

همانطور که در بخش‌های بالا ذکر شد، تشخیص تغییرات فرکانس‌های طبیعی تیر ترک خورده برای یک مکان خاص و عمق ترک، فرآیند آسانی است. ارزیابی مکرر مکان و عمق ترک‌ها با استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی، هدف تکنیک معکوس است که منجر به محاسبه فرکانس‌های طبیعی واقعی و ارزیابی شده می‌شود. تابع هدف حداقل شده مسئله معکوس را می‌توان به صورت زیر در نظر گرفت:

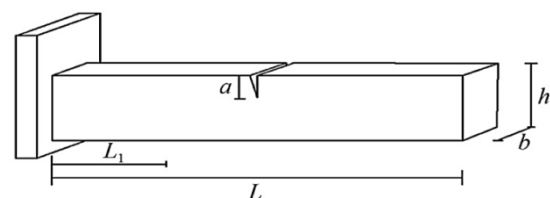
$$Obj = \sum_{i=1}^n w_i (f_i - f_i^*)^2 \quad (4)$$

الگوریتم بهینه‌سازی مکان و عمق ترک‌ها را به گونه‌ای جستجو می‌کند که در آن مجموع تغییرات بین فرکانس‌های ارزیابی و اندازه‌گیری شده به حداقل برسد. با توجه به محدودیت $0 < a < h$ و $0 < L_1 < L$

گانه جدید بر اساس بهینه‌سازی ازدحام ذرات پرداختند [۷]. در این مطالعه از الگوریتم ترکیبی جدید برای تشخیص ترک تیرهای کنسول استفاده شده است. این الگوریتم ترکیبی دوگانه، ترکیبی از الگوریتم گرگ خاکستری (GWO) و الگوریتم جستجوی مداری اتم (AOS) است. این الگوریتم برای به حداقل رساندن تابع هزینه برای شناسایی مکان‌ها و عمق ترک‌ها در تیرهای کنسول استفاده می‌شود. در نهایت، نتایج به دست آمده از این الگوریتم دوگانه با الگوریتم‌های دیگر مانند گرگ خاکستری، الگوریتم جستجوی مداری اتم مقایسه می‌شود.

۲. مدل‌سازی تیر ترک خورده

در این مقاله، تیر کنسول مطابق شکل ۱ در نظر گرفته شده است. این تیر دارای طول "L"، عرض "b"، عمق ترک "a" در محل قابل تغییر L_1 و ارتفاع "h" است. همانطور که می‌دانیم وجود ترک در تیر باعث کاهش سختی نسبت به تیر استاندارد می‌شود. از آنجایی که یک ماتریس می‌تواند سختی محلی کاهش یافته را فرموله کند، اندازه ماتریس در معرض درجات آزاد بودن مسئله است.



شکل ۱- تیر کنسول دارای ترک

در این مقاله، دو درجه آزادی را فرض می‌کنیم که به ماتریس سختی محلی 2×2 که با استفاده از معکوس ماتریس انطباق به عنوان معادله (۱) به دست می‌آید، به دست می‌آوریم:

$$K = \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} \\ C_{21} & C_{22} \end{bmatrix}^{-1} \quad (1)$$

فرض می‌شود. در معادله (۴)، "m" تعداد فرکانس‌های طبیعی است، "φ_i" iمین ضریب وزنی است، "f_i^d" آمین فرکانس طبیعی درخواستی یک تیر ترک خورده است، "f_i^s" به آمین فرکانس طبیعی اشاره دارد که توسط الگوریتم ارزیابی می‌شود و برای تخمین تابع هدف استفاده می‌شود.

۱.۳ الگوریتم جستجوی مداری اتم^۷ (AOS)

الگوریتم بهینه‌سازی AOS از اصول بنیادی نظریه اتمی مبتنی بر کوانتوم، دقیقاً آرایش چگالی الکترون و جذب یا انتشار انرژی توسط اتم‌ها، به عنوان اصل راهنمای خود استفاده می‌کند [۸].

۲.۳ الگوریتم گرگ خاکستری

این الگوریتم، به دلیل مزایایی که نسبت به سایر تکنیک‌های هوش ازدحام دارد، به طور گسترده برای بسیاری از مسائل بهینه‌سازی استفاده شده است. علاوه بر این، رهبری، سلسله مراتب و هنر شکار گرگ‌های خاکستری در طبیعت نمایش داده می‌شود. همچنین، چهار نوع گرگ خاکستری با نام‌های امگا (ω) دلتا (δ)، بتا (β) و آلفا (α) برای مدل‌سازی سلسله مراتب ارائه شده‌اند [۹].

۳.۳ عملکرد الگوریتم ترکیبی AOS-GWO

یک الگوریتم فراابتکاری، خوب توابع اکتشاف و بهره برداری خود را برای دستیابی به عملکرد بهینه متعادل می‌کند [۱۰]. روش جستجوی مداری اتمی دارای بهینه‌سازی، سازگاری و استحکام جهانی قوی است [۸]. الگوریتم گرگ

خاکستری، دارای توانایی‌های جستجوی محلی قوی و همگرایی سریع است، اما اغلب به جای یک راه‌حل بهینه جهانی به یک بهینه محلی همگرا می‌شود [۹]. این بخش الگوریتم پیشنهادی ترکیبی AOS-GWO را ارائه می‌کند که مزایای دو الگوریتم فراابتکاری را ترکیب می‌کند: GWO دارای قابلیت‌های اکتشافی قوی است که به آن امکان می‌دهد از تمام حالت‌های محلی و جهانی بازدید کند و راه‌حل‌های مناسب را بیابد، در حالی که AOS از قابلیت‌های بهره‌برداری بالایی برخوردار است. الگوریتم AOS-GWO بر سه اصل استوار است؛ الگوریتم‌های ترکیبی می‌توانند نقاط قوت و ضعف را تکمیل کنند. با ایجاد جمعیت‌های جدید که بهترین افراد از هر دو گروه را به اشتراک می‌گذارند، این ترکیب می‌تواند در مقابل همگرایی اولیه محافظت کند و در عین حال ویژگی‌های مفید AOS و GWO را حفظ کند. در نهایت، الگوریتم AOS-GWO تنها از پارامترهای الگوریتم‌های اصلی AOS و GWO استفاده می‌کند. شبه کد AOS-GWO در شکل ۲ نشان داده شده است.

Procedure Atomic Orbital Search- Greywolf Algorithm

Objective function (x), $x = (x_1, x_2, \dots)^T$

Determine initial positions of solution candidates (X_i) in the search space with m candidates

Evaluate fitness values (E_i) for initial solution candidates

Determine the binding state(BS) and binding energy (BE) of the atom

Determine the candidate with the lowest energy level in the atom (LE)

While Iteration < Maximum number of iterations

Generate n as the number of imaginary layers

Create imaginary layers

Sort solution candidates in an ascending or descending order

Distribute solution candidates in the imaginary layers by PDF

For k=1: n

Determine the binding state (BS^k) and binding energy (BE^k) of the kth layer

Determine the candidate with the lowest energy level in the kth layer (LE^k)

For i=1: p

Generate $\varphi, \alpha, \beta, \gamma$

Determine PR

If $\varphi \geq PR$

If $E_i^k \geq BE^k$

$$X_{i+1}^k = X_i^k + \frac{\alpha_i \times (\beta_i \times LE - \gamma_i \times BS)}{k}$$

Else if $E_i^k < BE^k$

$$X_{i+1}^k = X_i^k + \alpha_i \times (\beta_i \times LE - \gamma_i \times BS^k)$$

end

Else if $\varphi < PR$

$$X_{i+1}^k = X_i^k + r_i$$

End

End

End

Update binding state(BS) and binding energy (BE) OF ATOM

Update candidate with the lowest energy level in the atom (LE)

End while

Rank the population X , and update the current best.

Initialize a population of Grey wolf $X_i (i=1, 2, \dots)$

Initialize a, A and C

Calculate the fitness value (X_i) of each search agent

Select first, second and third best wolfs (X_a, X_b, X_c)

while ($t < MaxGeneration_GWO$)

for each search agent

Update the position of the current search agent by above equations End for Update a, A and C Calculate the X_a, X_b , and X_c Rank the Greywolves and find the current best.

end while

Output the best solution.

End procedure

شکل ۲- شبه کد الگوریتم ترکیبی مورد نظر

پواسون تیر به ترتیب $۲۲,۴ \text{ GPa}$ ، $۲,۸ \text{ gm/cc}$ و $۰,۳۳$ است. سه مکان مختلف (یعنی ۲۰۰ میلی-متر، ۴۰۰ میلی-متر و ۶۰۰ میلی-متر از انتهای گیره‌دار)، با عمق‌های متفاوت از ۱ میلی-متر تا $۲,۴$ میلی-متر، در نظر گرفته شده‌اند. فرکانس‌های طبیعی متناظر تیر ترک خورده در جدول ۱ خلاصه شده است.

برای بررسی توانایی الگوریتم برای بهینه‌سازی تیر ترک خورده، از تغییرات فرکانس‌های معمولی بر اساس مدل پیشنهادی از طریق ترک‌های مختلف در تیر استفاده می‌شود. تیر در نظر گرفته شده در این بخش به طول ۸۰۰ میلی-متر با سطح مقطع ۶ میلی-متر در ۵۰ میلی-متر می‌باشد. مدول الاستیسیته، چگالی و نسبت

جدول ۱- فرکانس‌های محاسبه شده با استفاده از تحلیل نظری

شماره	$\alpha = \frac{L_c}{L}$	$\beta = \frac{a}{T}$	ترک (میلی‌متر)		فرکانس طبیعی (هرتز)		
			موقعیت	عمق	F_1	F_2	F_3
۱	----	----	بدون ترک	بدون ترک	۷	۴۵	۱۴۰
۲	۰/۲۵	۰/۲	۲۰۰	۱/۲	۷/۶۹۹	۴۸/۲۶۰	۱۳۵/۱۰۸
۳	۰/۲۵	۰/۳	۲۰۰	۱/۸	۷/۶۹۳	۴۸/۲۵۸	۱۳۵/۱۰۸
۴	۰/۲۵	۰/۴	۲۰۰	۲/۴	۷/۶۷۸	۴۸/۲۵۴	۱۳۴/۸۲۶
۵	۰/۲۵	۰/۵	۴۰۰	۱/۲	۷/۷۰۰	۴۸/۲۴۸	۱۳۵/۱۳۱
۶	۰/۵	۰/۲	۴۰۰	۱/۸	۷/۶۹۸	۴۸/۲۰۲	۱۳۵/۱۳۱
۷	۰/۵	۰/۳	۴۰۰	۲/۴	۷/۶۹۴	۴۸/۰۹۶	۱۳۵/۱۳۱
۸	۰/۵	۰/۴	۶۰۰	۱/۲	۷/۷۰۰	۴۸/۲۵۶	۱۳۵/۰۹۵
۹	۰/۵	۰/۵	۶۰۰	۱/۸	۷/۷۰۰	۴۸/۲۴۱	۱۳۴/۹۶۴
۱۰	۰/۷۵	۰/۲	۶۰۰	۲/۴	۷/۷۰۰	۴۸/۲۰۴	۱۳۴/۶۵۷

موردنظر، تعداد جمعیت و حداکثر تعداد تکرار به ترتیب ۵۰ و ۳۰۰ انتخاب شد. برای مقایسه نتایج به دست آمده از مطالعه حاضر با نتایج مرجع [۷]، ویژگی‌های تیر کنسول بر اساس داده‌های آنها در نظر گرفته شده است. این مقایسه‌ها در جدول ۲ نشان داده شده است. همچنین برای نشان دادن اثربخشی الگوریتم ترکیبی دوگانه پیشنهادی، یک شاخص عملکرد تعریف شده است. این شاخص واریانس بین مقادیر ارزیابی شده و واقعی پارامترها را گزارش می‌کند.

در این مقاله روش اعمال شده در مرجع [۷] برای تعیین فرکانس‌های طبیعی تیر اویلر-برنولی ترک خورده استفاده می‌شود. در این بخش، تکنیک تشخیص ترک در تیر کنسول توسط الگوریتم پیشنهادی ارائه شده است. هدف آن تشخیص مکان و عمق ترک با بهینه‌سازی تابع هدف بر اساس فرکانس‌های طبیعی تیر است. بنابراین، نتایج حاصل از تشخیص ترک در تیر ترک خورده توسط الگوریتم ارائه شده بیان شده است. برای بررسی عملکرد الگوریتم

جدول ۲- نتایج محاسبه خرابی محل و عمق ترک به دست آمده از AOS-GWO و مقایسه با مطالعه دیگر

PSO-GWO-FA[7]		مطالعه حاضر						مقدار دقیق (میلی‌متر)	
		GWO		AOS		AOS-GWO			
موقعیت (درصد خطا)	عمق (درصد خطا)	موقعیت (درصد خطا)	عمق (درصد خطا)	موقعیت (درصد خطا)	عمق (درصد خطا)	موقعیت (درصد خطا)	عمق (درصد خطا)	عمق	موقعیت
۲۰۰ (۰)	۱/۲ (۰)	۲۰۰/۵۹۳ (۰/۲۹)	۱/۱۹ (۰/۸۴)	۲۰۰/۱ (۰/۰۵)	۱/۱۹ (۰/۸۴)	۲۰۰ (۰)	۱/۱۹ (۰/۸۴)	۱/۲	۲۰۰
۲۰۰ (۰)	۱/۷۹ (۰/۵۵۵)	۲۰۰/۲۹۹ (۰/۱۴)	۱/۷۹ (۰/۵۵۵)	۱۹۹/۸۲ (۰/۰۹)	۱/۸ (۰)	۱۹۹/۶۲ (۱/۶۹)	۱/۷۹ (۰/۵۵۵)	۱/۸	
۱۹۹/۹۸۹ (۰/۰۰۵)	۲/۴ (۰)	۲۰۰/۶۰۹ (۰/۳)	۲/۳۹ (۰)	۲۰۰/۱ (۰/۰۵)	۲/۴ (۰)	۱۹۹/۹۷ (۰/۰۱۵)	۲/۴ (۰)	۲/۴	
۳۹۹/۹۹۹ (۰/۰۰۰۲)	۱/۲ (۰)	۳۹۹/۱۸۰ (۰/۲)	۱/۲ (۰)	۴۰۰ (۰)	۱/۱۹ (۰/۸۴)	۳۹۹/۹۸ (۰/۰۰۵)	۱/۱۹ (۰/۸۴)	۱/۲	۴۰۰
۳۹۹/۹۹ (۰/۰۰۰۲)	۱/۸ (۰)	۳۹۵/۴۸۸ (۱/۱۲)	۱/۸ (۰)	۴۰۰/۱۸ (۰/۰۴۵)	۱/۷۹ (۰/۵۵۵)	۴۰۰ (۰)	۱/۷۹ (۰/۵۵۵)	۱/۸	
۴۰۰ (۰)	۲/۳۹ (۰/۴۱۶)	۳۹۷/۷۳۷ (۰/۵۶)	۲/۴ (۰)	۳۹۹/۰۶ (۰/۲۳)	۲/۴ (۰)	۳۹۹/۲۳ (۰/۱۹)	۲/۴ (۰)	۲/۴	
۶۰۰/۵۰۵ (۰/۰۸۴۱)	۱/۲ (۰)	۶۰۰/۰۰۱ (۰/۰۰۰۱)	۱/۱۹ (۰/۸۴)	۵۹۹/۹۷ (۰/۰۰۵)	۱/۱۹ (۰/۸۴)	۶۰۰ (۰)	۱/۲ (۰)	۱/۲	۶۰۰
۶۰۰/۰۴۷ (۰/۰۰۷۸)	۱/۸ (۰)	۶۰۰/۹۶۰ (۰/۱۶)	۱/۸ (۰)	۶۰۰/۴ (۰/۰۶)	۱/۸ (۰)	۵۹۹/۱۶ (۰/۶۴)	۱/۷۸ (۱/۱۱)	۱/۸	
۵۹۹/۶۰۵ (۰/۰۶۵)	۲/۳۹ (۰/۴۱۶)	۶۰۰/۶۱۳ (۰/۱۰۲)	۲/۴ (۰)	۵۹۹/۵۸ (۰/۰۷)	۲/۳۹ (۰)	۶۰۱/۰۴ (۰/۱۷)	۲/۴ (۰)	۲/۴	

۵. نتیجه گیری

این مقاله یک الگوریتم ترکیبی به نام AOS-GWO را برای شناسایی ترک در تیر یکسرگردار پیشنهاد می‌کند. این الگوریتم جستجوی مداری اتمی و الگوریتم گرگ خاکستری را با الهام از اصول مکانیک کوانتومی ترکیب می‌کند. روش‌هایی با استفاده از الگوریتم‌های AOS-GWO با اصلاح و بهبود الگوریتم‌های AOS، GWO، برای افزایش دقت و سرعت هم‌گرایی ایجاد شد. این مقاله تغییرات بین فرکانس‌های ارزیابی شده توسط الگوریتم پیشنهادی و فرکانس‌های اندازه گیری شده برای یک تیر ترک خورده را بررسی می‌کند. نتایج این الگوریتم ترکیبی پیشنهادی با نتایج AOS، GWO، مقایسه شدند. نتایج نشان داد که AOS-GWO نسبت به الگوریتم‌های AOS و GWO در بیشتر موارد عملکرد بهتری دارد.

۶. فهرست مراجع

1. Houssein, E.H., et al., *A survey of metaheuristic algorithms for solving optimization problems, in Metaheuristics in machine learning: theory and applications*. 2021, Springer. p. 515-543.
2. Dimarogonas, A. and C. Papadopoulos, *Vibration of cracked shafts in bending*. *Journal of sound and vibration*, 1983. 91(4): p. 583-593.
3. Qian, G.-L., S.-N. Gu, and J.-S. Jiang, *The dynamic behaviour and crack detection of a beam with a crack*. *Journal of sound and vibration*, 1990. 138(2): p. 233-243.
4. Nahvi, H. and M. Jabbari, *Crack detection in beams using experimental modal data and finite element model*. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2005. 47(10): p. 1477-1497.
5. Chondros, T., A. Dimarogonas, and J. Yao, *A continuous cracked beam vibration theory*. *Journal of sound and vibration*, 1998. 215(1): p. 17-34.
6. Kim, J.-T. and N. Stubbs, *Crack detection in beam-type structures using frequency data*. *Journal of sound and vibration*, 2003. 259(1): p. 145-160.
7. Ghannadiazl, A. and S. Ghaemifard, *Crack detection of the cantilever beam using new triple hybrid algorithms based on Particle Swarm Optimization*. *Frontiers of Structural and Civil Engineering*, 2022. 16(9): p. 1127-1140.
8. Azizi, M., *Atomic orbital search: A novel metaheuristic algorithm*. *Applied Mathematical Modelling*, 2021. 93: p. 657-683.
9. Mirjalili, S., S.M. Mirjalili, and A. Lewis, *Grey Wolf Optimizer*. *Advances in Engineering Software*, 2014. 69: p. 46-61.
10. Eiben, A.E. and C.A. Schippers, *On evolutionary exploration and exploitation*. *Fundamenta Informaticae*, 1998. 35(1-4): p. 35-50.

بهبود رفتار لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن آرمه با اعمال محدودیت نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون در اتصالات



محمدصادق معرفت

استاد دانشکده مهندسی عمران
دانشکده فنی، دانشگاه تهران



سیدمحمدحسین کامل

دانشجوی دکتری مهندسی عمران-سازه
دانشکده فنی، دانشگاه تهران

چکیده

در طراحی لرزه‌ای قاب‌های خمشی بتن آرمه، ساز و کار تسلیم مطلوب شامل تشکیل مفاصل خمشی در انتهای تیرها و پای ستون‌های پایین‌ترین طبقه می‌باشد. اگر چه سازه و اجزای آن باید از مقاومت و شکل‌پذیری مناسب برخوردار باشند، اما لازمه‌ی نیل به ساز و کار مورد اشاره، حفظ مسیر انتقال نیرو مابین قاب‌ها و طبقات می‌باشد. در رخدادهای لرزه‌ای دیده شده است که تسلیم برشی یک یا چند اتصال مسیر ایمن انتقال نیروها را مختل کرده و خسارات شدیدی به بار آورده است. هرچند در آیین‌نامه‌ها با الزام برخی ضوابط سعی شده است که از تسلیم برشی اتصال جلوگیری شود، اما تخریب اتصالات همچنان از دغدغه‌های مهندسیین می‌باشد. به نظر می‌رسد که تمهیدات اضافی برای ایمن‌سازی اتصالات همچنان مورد نیاز می‌باشد. این موضوع توسط محققان مورد مطالعات متعدد آزمایشگاهی و عددی قرار گرفته است. این تحقیقات نشان داده است که با کاهش نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون، رفتار تُرد بتن هسته‌ی اتصال کاهش می‌یابد تا جایی که می‌توان جلوی تسلیم برشی اتصال را به طور کامل گرفت. بنابراین پیشنهاد می‌شود که نسبت ارتفاع تیر به ستون در اتصالات قاب‌های خمشی برای اتصالات داخلی و خارجی به ترتیب کمتر از $0/9$ و 1 باشد. این محدودیت برای پایین‌ترین طبقه با توجه به افزایش تقاضای برش، جابجایی و شکل‌پذیری جانبی، باید سختگیرانه‌تر از دیگر طبقات اعمال گردد.

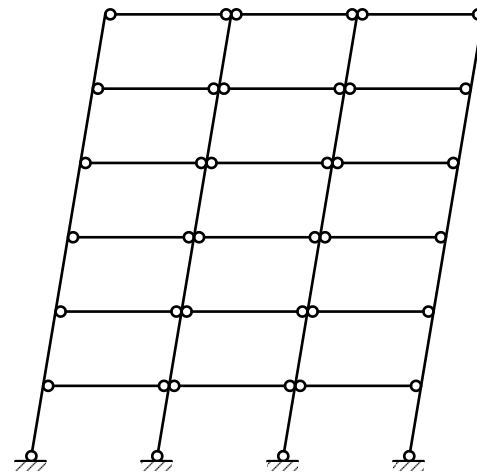
کلمات کلیدی: قاب‌های خمشی بتن آرمه، تسلیم برشی اتصال تیر به ستون، مسیر انتقال نیرو، نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون

۱-مقدمه

از گذشته تا به امروز قاب‌های خمشی بتن آرمه به دلیل اشغال فضای کم و مزیت اقتصادی به ویژه در کشورمان مورد توجه و استفاده‌ی فراوان بوده است. از طرفی خسارات مالی و جانی بسیاری متوجه این سازه‌ها بعد از زلزله بوده است. بنابراین نگرانی پیرامون ایمنی آن‌ها در برابر زلزله طبیعی است. از

طرف دیگر دلخواه مهندسیین در طراحی لرزه‌ای دستیابی به ساز و کاری برای قاب‌های خمشی بتن آرمه است که مفاصل خمشی در تمامی تیرها و فقط پای ستون‌های طبقه‌ی تراز پایه تشکیل گردد. تا از بیشینه ظرفیت خمشی تیرها استفاده شود. شکل ۱ این ساز و کار را در قاب‌های خمشی نشان می‌دهد که در برگزیده‌ی فلسفه‌ی تیر ضعیف-

ستون قوی نیز می‌باشد و به آن ساز و کار تسلیم ایده‌آل می‌گویند [۱، ۲].

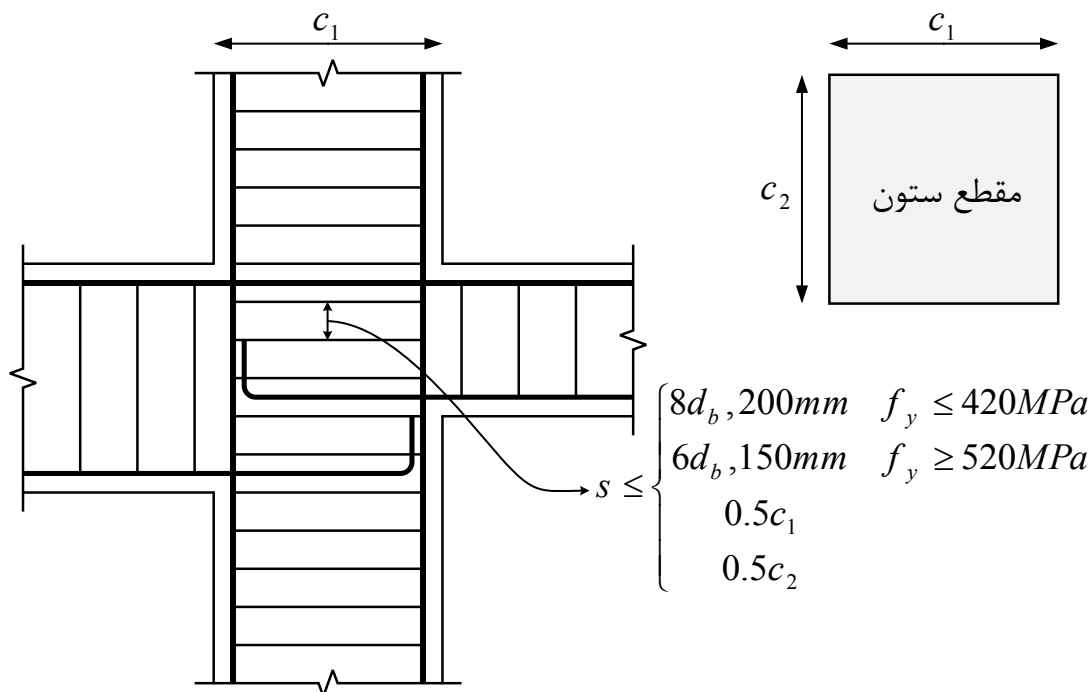


شکل ۱- ساز و کار تسلیم ایده‌آل در قاب‌های خمشی بتن‌آرمه

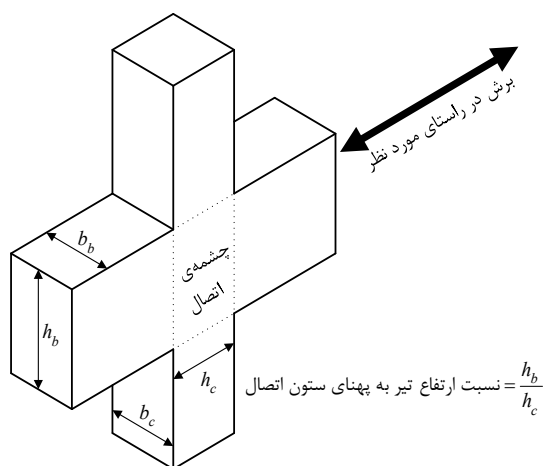
برای دستیابی به ساز و کار تسلیم ایده‌آل در قاب‌های خمشی بتن‌آرمه، برآورد صحیح نیروهای وارد بر سازه و اجزای آن اهمیت بالایی دارد. اما اگر تمام اجزای سازه دارای مقاومت و شکل‌پذیری کافی باشند ولی نیروهای ثقلی و جانبی نتوانند از طریق کف‌ها به تیرها، سپس به ستون‌ها و در نهایت به شالوده و خاک منتقل شوند، آنگاه تقاضای لرزه‌ای تجمیع شده در اجزا و اعضای سازه منجر به تسلیم آن‌ها و در نهایت فروریزش ناگهانی یا نامطلوب جزئی یا کلی سازه خواهد شد. در واقع برای دستیابی به رفتار لرزه‌ای مطلوب باید مسیر انتقال نیرو تا تسلیم ایده‌آل قاب خمشی بتن‌آرمه حفظ شود تا امکان بازتوزیع نیروها در بقیه‌ی اعضا وجود داشته باشد. به بیان دیگر برای دستیابی به ساز و کار تسلیم ایده‌آل، حفظ مسیر انتقال نیرو شرط لازم و بهره‌مندی تمام اجزای سازه از مقاومت و

شکل‌پذیری مناسب، شرط کافی در طراحی لرزه‌ای می‌باشد.

حفظ مسیر انتقال نیرو جدا از مفاهیم مقاومت و شکل‌پذیری در اجزای سازه نیست و بدون آن‌ها امکان ندارد، اما ممکن است با وجود مقاومت و شکل‌پذیری کافی در تیر و ستون قاب‌های خمشی بتن‌آرمه، از دست برود. متأسفانه با بررسی وضعیت قاب‌های خمشی بتن‌آرمه پس از زلزله بخصوص در زمین‌لرزه‌های اخیر کشور می‌توان دریافت که اکثر قاب‌های خمشی بتن‌آرمه علی‌رغم داشتن تیر و ستون تقریباً سالم، تنها با گسیختگی برشی یک یا چند اتصال تیر به ستون دچار آسیب جزئی یا کلی شده‌اند. در واقع بیش از تیر و ستون باید نگران اتصال تیر به ستون قاب‌های خمشی بتن‌آرمه بود تا مسیر انتقال نیرو از بین نرود. به همین دلیل آیین‌نامه‌ها با وضع قوانین سختگیرانه سعی دارند که جلوی تخریب اتصال تیر به ستون قاب‌های خمشی بتن‌آرمه را بگیرند یا لاقط تا تشکیل مفصل خمیری در تیرها آن را به تأخیر بیندازند. ضوابطی مانند محدودیت فاصله و الزام به استفاده از تنگ‌های بسته با قالب لرزه‌ای برای آرماتورهای عرضی در ناحیه‌ی اتصال به همین دلیل در آیین‌نامه‌ها وضع شده‌اند. برای مثال محدودیت فاصله‌ی آرماتورهای عرضی ناحیه‌ی اتصال در قاب‌های خمشی بتن‌آرمه با شکل‌پذیری متوسط مطابق ویرایش ۵ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و ACI 318-19 در شکل ۲ نشان داده شده است [۳، ۴].



شکل ۲- محدودیت فاصله ی آرماتورهای عرضی ناحیه ی اتصال در قاب های خمشی بتن آرمه با شکل پذیری متوسط مطابق ویرایش ۵ مبحث نهم مقررات ملی ساختمان و ACI 318-19؛ c_1 و c_2 ابعاد مقطع ستون، d_b قطر کوچکترین آرماتور طولی ستون، f_y تنش تسلیم آرماتور عرضی [۴،۳]



شکل ۳- نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون اتصال قاب خمشی بتن آرمه؛ h_b ارتفاع تیر؛ b_b عرض تیر؛ h_c پهنای ستون؛ b_c عرض ستون

به منظور بیان بهتر اثر نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون بر روی رفتار لرزه ای اتصال تیر به ستون در قاب های خمشی بتن آرمه، مجموعه ای از آزمایش های انجام شده توسط دیگر محققین گردآوری شد. این مجموعه با توجه به موقعیت (داخلی یا خارجی) و جزئیات آرماتورگذاری اتصال به چهار گروه اتصالات لرزه ای داخلی، اتصالات لرزه ای

۲- ضابطه ی پیشنهادی برای جلوگیری از تسلیم برشی اتصال تیر به ستون

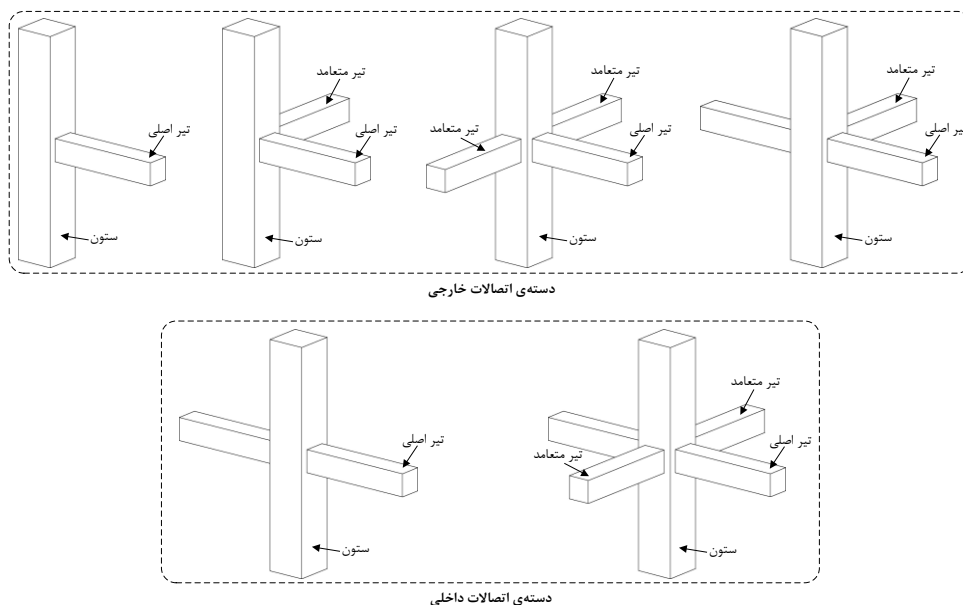
تحقیقات انجام شده پیرامون رفتار اتصال تیر به ستون قاب های خمشی بتن آرمه نشان می دهد که با افزایش نسبت عمق مؤثر تیر به ستون در راستای برش مورد نظر، تسلیم و تخریب برشی چشمه ی اتصال سریع تر و شدیدتر روی می دهد. از آنجا که اکثر اوقات، مقدار پوشش بتن تیر و ستون برابرند، بجای نسبت عمق مؤثر تیر به ستون در جهت سادگی از نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون مطابق شکل ۳ استفاده می شود.

گروه‌های غیرلرزه‌ای و بقیه در گروه‌های لرزه‌ای قرار داده شدند.

دسته‌بندی اتصالات با توجه به موقعیت آنها مطابق شکل ۴ انجام شد.

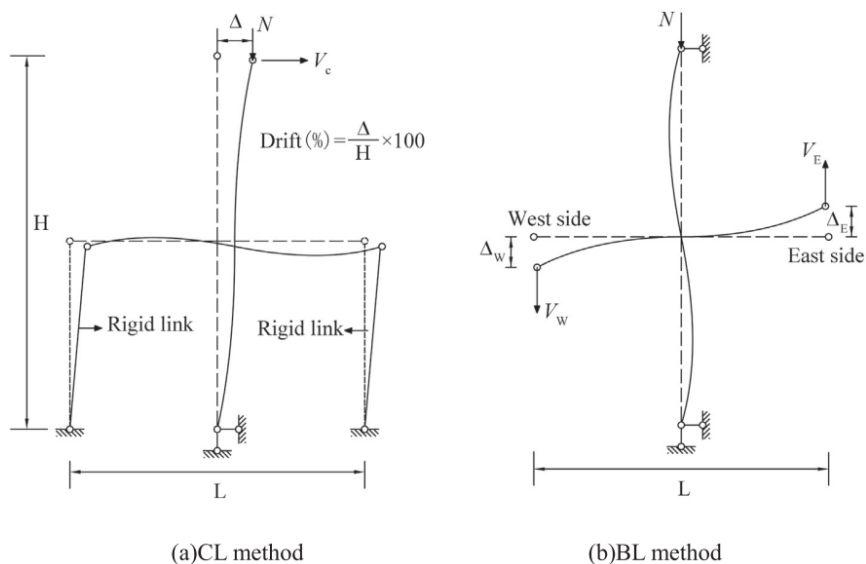
خارجی، اتصالات غیرلرزه‌ای داخلی و اتصالات غیرلرزه‌ای خارجی تقسیم شد. همچنین در تهیه این مجموعه به نکات زیر توجه شده است.

اتصالاتی که آرماتورهای عرضی آنها شامل تنگ‌های بسته‌ی آچار با قلاب لرزه‌ای و خم ۱۳۵ درجه نبودند در



شکل ۱- دسته‌بندی اتصالات در مجموعه‌ی گردآوری شده؛ دال برای نمایش واضح‌تر اتصال ترسیم نشده است.

به شیوه‌ی آزمایش نمونه‌ها توجه شده است. در آزمایش اتصالات قاب‌های خمشی بتن‌آرمه مطابق شکل ۵ و نتایج مرجع [۵]، اعمال بارگذاری رفت و برگشتی جانبی به ستون (CL) بر تیر (BL) ارجحیت دارد و نتایج به واقعیت نزدیک‌تر می‌باشد.



شکل ۲- روش بارگذاری رفت و برگشتی و آزمایش اتصال [۵]

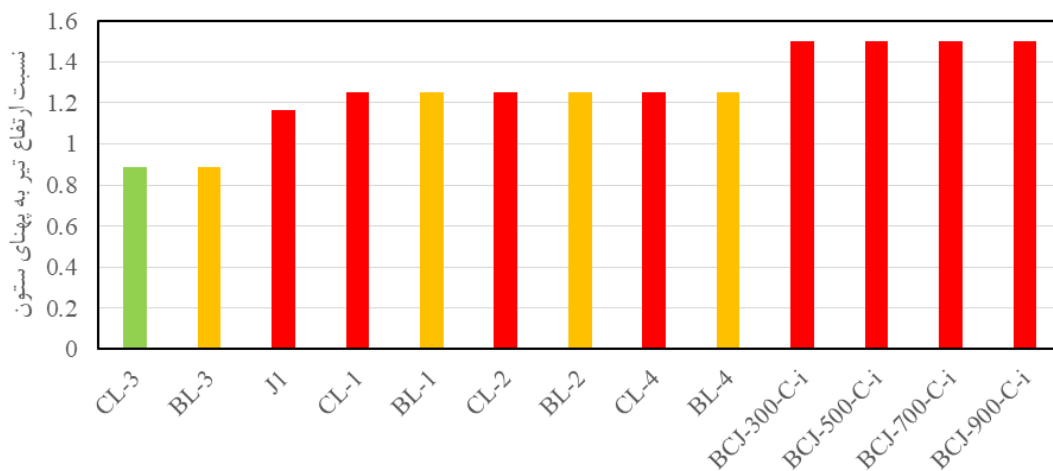
نمونه‌ی اتصالات به سمت تسلیم برشی می‌رود. به نظر می‌رسد که تعداد نمونه اتصالات لرزه‌ای داخلی آزمایش شده با نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون کوچکتر از ۰/۸۹ کافی نباشد. شکل ۶ نیز ارتباط بین نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون با نوع تسلیم آن‌ها را در این گروه از اتصالات نشان داده است. بر این اساس پیشنهاد می‌شود که به منظور حفظ مسیر انتقال نیرو و جلوگیری از تسلیم برشی اتصالات لرزه‌ای داخلی قاب‌های خمشی بتن آرمه، نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون آن‌ها به مقداری کمتر از ۰/۸۹ محدود شود.

گروه اتصالات لرزه‌ای داخلی مجموعه‌ی گردآوری شده در جدول ۱ نشان داده شده است. محور طولی تیر کلیه‌ی نمونه اتصالات این گروه نسبت به مرکز ستون خروج از مرکزیت نداشته‌اند. علائم استفاده شده در این جدول و جداول بعدی شامل P_u بار محوری ستون، A_g مساحت کل مقطع ستون و f'_c مقاومت مشخصه‌ی فشاری بتن می‌باشند. همچنین تسلیم خمشی تیر با B، تسلیم برشی اتصال با J و تسلیم خمشی تیر و برشی نمونه اتصال با B+J نشان داده شده است. همان‌طور که انتظار می‌رفت با افزایش نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون نوع تسلیم

جدول ۱- گروه اتصالات لرزه‌ای داخلی

پژوهشگر	نام نمونه	مقیاس نمونه	روش آزمایش	نسبت بار به ظرفیت محوری ستون $(\frac{P_u}{A_g f'_c})$	نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون $(\frac{h_b}{h_c})$	نوع تسلیم
Yang et al. [5]	CL-3	1	CL	0.25	0.89	B
	BL-3	1	BL	0.25	0.89	B+J
Shen et al. [6]	J1	2/3	CL	0.2	1.17	J
Yang et al. [5]	CL-1	1	CL	0.25	1.25	J
	BL-1	1	BL	0.25	1.25	B+J
	CL-2	1	CL	0.3	1.25	J
	BL-2	1	BL	0.3	1.25	B+J
	CL-4	1	CL	0.25	1.25	J
	BL-4	1	BL	0.25	1.25	B+J
	Jin et al. [7]	BCJ-300-C-i	1	BL	0.3	1.50
BCJ-500-C-i		1	BL	0.3	1.50	J
BCJ-700-C-i		1	BL	0.3	1.50	J
BCJ-900-C-i		1	BL	0.3	1.50	J

■ تسلیم خمشی تیر ■ تسلیم خمشی تیر و برشی اتصال ■ تسلیم برشی اتصال



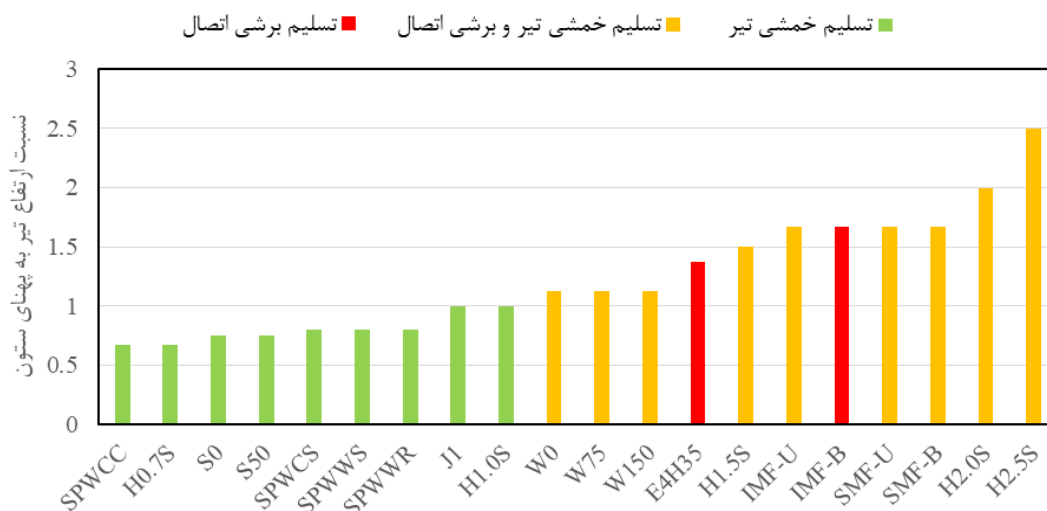
شکل ۳- نمایش نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون با نوع تسلیم در گروه اتصالات لرزه‌ای داخلی

در این گروه از اتصالات نشان داده است. بر این اساس پیشنهاد می‌شود که به منظور حفظ مسیر انتقال نیرو و جلوگیری از تسلیم برشی اتصالات لرزه‌ای خارجی قاب‌های خمشی بتن‌آرمه، نسبت ارتفاع تیر به پهناي ستون آن‌ها به مقداری کمتر از یک محدود شود.

گروه اتصالات لرزه‌ای خارجی مجموعه‌ی گردآوری شده در جدول ۲ نشان داده شده است. باز هم مطابق انتظار با افزایش نسبت ارتفاع تیر به پهناي ستون، تسلیم نمونه‌ی اتصال به سمت تسلیم برشی می‌رود. شکل ۷ نیز ارتباط بین نسبت ارتفاع تیر به پهناي ستون با نوع تسلیم آن‌ها را

جدول ۲- گروه اتصالات لرزه‌ای خارجی

نوع تسلیم	نسبت ارتفاع تیر به پهناي ستون (h_b/h_c)	خروج از مرکزیت (mm)	نسبت بار به ظرفیت محوری ستون ($P_u/A_g f'_c$)	روش آزمایش	مقیاس نمونه	نام نمونه	پژوهشگر
B	0.67	0	0.15	CL	3/5	SPWCC	Pakzad et al. [8]
B	0.67	0	0	BL	1	H0.7S	Chun et al. [9]
B	0.75	0	0.1	BL	1	S0	Lee et al. [10]
B	0.75	50	0.1	BL	1	S50	
B	0.80	0	0.15	CL	3/5	SPWCS	Pakzad et al. [8]
B	0.80	0	0.15	CL	3/5	SPWWS	
B	0.80	0	0.15	CL	3/5	SPWWR	
B	1.00	0	0.16	BL	1/2	J1	Shafaei et al. [11]
B	1.00	0	0	BL	1	H1.0S	Chun et al. [9]
B+J	1.13	0	0.1	BL	1	W0	Lee et al. [10]
B+J	1.13	75	0.1	BL	1	W75	
B+J	1.13	150	0.1	BL	1	W150	
J	1.37	0	0	CL	1	E4H35	Kim et al. [12]
B+J	1.50	0	0	BL	1	H1.5S	Chun et al. [9]
B+J	1.67	0	0.2	BL	1	IMF-U	Han et al. [13]
J	1.67	0	0.2	BL	1	IMF-B	
B+J	1.67	0	0.2	BL	1	SMF-U	
B+J	1.67	0	0.2	BL	1	SMF-B	
B+J	2.00	0	0	BL	1	H2.0S	Chun et al. [9]
B+J	2.50	0	0	BL	1	H2.5S	



شکل ۷- نمایش نسبت ارتفاع تیر به پهناي ستون با نوع تسلیم در گروه اتصالات لرزه‌ای خارجی

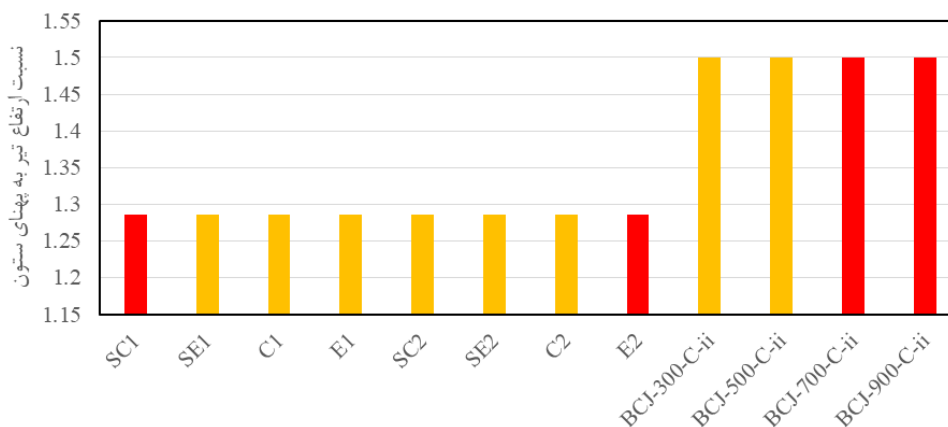
مسیر انتقال نیرو و جلوگیری از تسلیم برشی اتصالات غیرلرزه‌ای داخلی قاب‌های خمشی بتن‌آرمه، نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون آن‌ها محدود شود. اظهار نظر در مورد مقدار دقیق آن نیازمند تحقیقات بیشتری بخصوص به صورت آزمایشگاهی می‌باشد. البته منطقی است که محدودیت نسبت مذکور در اتصالات غیرلرزه‌ای از لرزه‌ای سختگیرانه‌تر باشد. در واقع می‌توان پیش‌بینی کرد که اتصالات غیرلرزه‌ای داخلی نیز باید نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون کمتر از $0/89$ و حتی کوچکتر از آن داشته باشند تا جلوی تسلیم برشی در آن‌ها گرفته و مسیر انتقال نیرو حفظ شود.

گروه اتصالات غیرلرزه‌ای داخلی مجموعه‌ی گردآوری شده در جدول ۳ نشان داده شده است. کلیه‌ی نمونه اتصالات این گروه با مقیاس واقعی ساخته و آزمایش شده‌اند. همان‌طور که انتظار می‌رفت باز هم با افزایش نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون نوع تسلیم نمونه‌ی اتصال به سمت تسلیم برشی می‌رود. به نظر می‌رسد که تعداد نمونه اتصالات غیرلرزه‌ای داخلی آزمایش شده کافی نباشد و نیازمند تحقیقات آزمایشگاهی جامعی پیرامون آن‌ها باشد. شکل ۸ نیز ارتباط بین نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون با نوع تسلیم آن‌ها را در این گروه از اتصالات نشان داده است. بر این اساس پیشنهاد می‌شود که به منظور حفظ

جدول ۳- گروه اتصالات غیرلرزه‌ای داخلی

نوع تسلیم	نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون (h_b/h_c)	خروج از مرکزیت (mm)	نسبت بار به ظرفیت محوری ستون $(P_u/A_g f'_c)$	روش آزمایش	نام نمونه	پژوهشگر
B+J	1.29	0	0.1	CL	SC1	Choi et al. [14]
B+J	1.29	75	0.1	CL	SE1	
B+J	1.29	0	0.1	CL	C1	
B+J	1.29	75	0.1	CL	E1	
B+J	1.29	0	0.1	CL	SC2	
J	1.29	75	0.1	CL	SE2	
B+J	1.29	0	0.1	CL	C2	
B+J	1.29	75	0.1	CL	E2	
J	1.50	0	0.3	BL	BCJ-300-C-ii	Jin et al. [7]
J	1.50	0	0.3	BL	BCJ-500-C-ii	
J	1.50	0	0.3	BL	BCJ-700-C-ii	
J	1.50	0	0.3	BL	BCJ-900-C-ii	

■ تسلیم خمشی تیر ■ تسلیم خمشی تیر و برشی اتصال ■ تسلیم برشی اتصال



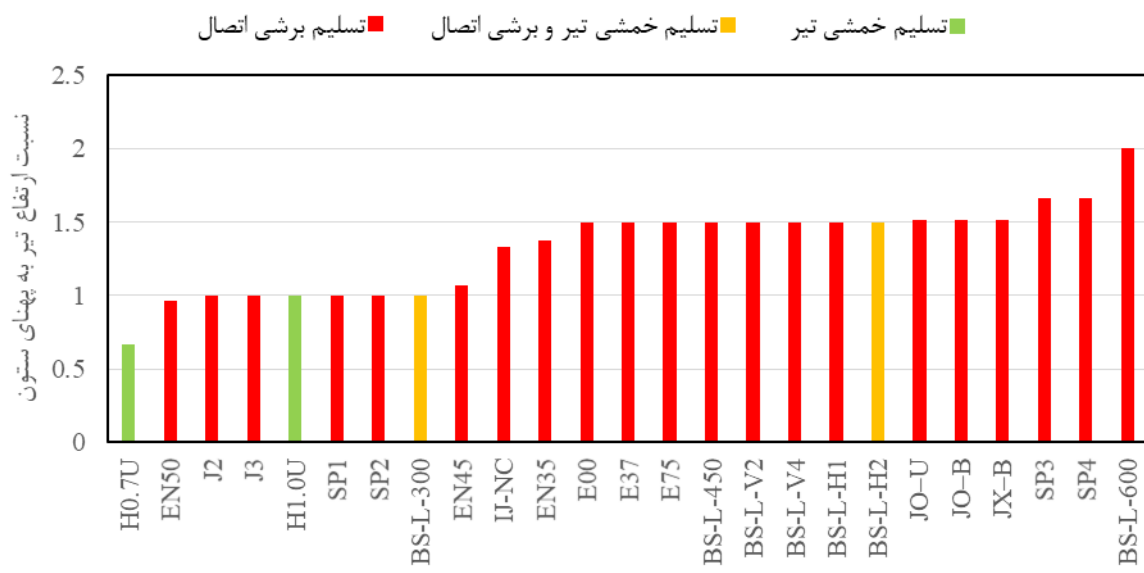
شکل ۴- نمایش نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون با نوع تسلیم در گروه اتصالات غیرلرزه‌ای داخلی

گروه اتصالات غیرلرزه‌ای خارجی مجموعه‌ی گردآوری شده در جدول ۴ نشان داده شده است. همانند دیگر اتصالات، افزایش نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون در آن‌ها هم باعث تسلیم نمونه‌ی اتصال در برش می‌شود. شکل ۹ نیز ارتباط بین نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون با نوع تسلیم آن‌ها را در این گروه از اتصالات نشان داده است. بر این اساس پیشنهاد می‌شود که به منظور حفظ مسیر انتقال نیرو و

جلوگیری از تسلیم برشی اتصالات غیرلرزه‌ای داخلی قاب‌های خمشی بتن‌آرمه، نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون آن‌ها به مقداری کمتر از ۰/۶۷ محدود شود. هرچند مشاهده‌ی رفتار قابل قبول از تنها یک نمونه اتصال با نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون ۰/۶۷ اطمینان بخش نیست و تعیین مقداری مناسب برای این نسبت هم نیازمند تحقیقات بیشتری می‌باشد.

جدول ۴- گروه اتصالات غیرلرزه‌ای خارجی

نوع تسلیم	نسبت ارتفاع تیر به پهنای ستون (h_b/h_c)	خروج از مرکزیت (mm)	نسبت بار به ظرفیت محوری ستون ($P_u/A_g f'_c$)	روش آزمایش	مقیاس نمونه	نام نمونه	پژوهشگر
B	0.67	0	0	BL	1	H0.7U	Chun et al. [9]
J	0.96	0	0	CL	1	EN50	Kim et al. [12]
J	1.00	0	0.16	BL	1/2	J2	Shafaei et al. [11]
J	1.00	0	0.16	BL	1/2	J3	
B	1.00	0	0	BL	1	H1.0U	Chun et al. [9]
J	1.00	0	0.1	BL	1	SP1	Park et al. [15]
J	1.00	0	0.1	BL	1	SP2	
B+J	1.00	0	0.15	BL	1	BS-L-300	Wong et al. [16]
J	1.07	0	0	CL	1	EN45	Kim et al. [12]
J	1.33	0	0.25	CL	2/3	IJ-NC	Lam et al. [17]
J	1.37	0	0	CL	1	EN35	Kim et al. [12]
J	1.50	0	0.1	BL	2/3	E00	Wong et al. [18]
J	1.50	37	0.1	BL	2/3	E37	
J	1.50	75	0.1	BL	2/3	E75	
J	1.50	0	0.15	BL	1	BS-L-450	Wong et al. [16]
J	1.50	0	0.15	BL	1	BS-L-V2	
J	1.50	0	0.15	BL	1	BS-L-V4	
J	1.50	0	0.15	BL	1	BS-L-H1	
B+J	1.50	0	0.15	BL	1	BS-L-H2	
J	1.52	0	0.2	BL	1	JO-U	Han et al. [19]
J	1.52	0	0.2	BL	1	JO-B	
J	1.52	0	0.2	BL	1	JX-B	
J	1.67	0	0.1	BL	1	SP3	Park et al. [15]
J	1.67	0	0.1	BL	1	SP4	
J	2.00	0	0.15	BL	1	BS-L-600	Wong et al. [16]



شکل ۵- نمایش نسبت ارتفاع تیر به پهناي ستون با نوع تسلیم در گروه اتصالات غیرلرزه‌ای خارجی

مطالعات متعدد در این زمینه، پیشنهاد می‌شود که نسبت ارتفاع تیر به پهناي ستون هر اتصال در قاب‌های خمشی بتن‌آرمه محدود شود. مقدار محدودیت پیشنهادی برای اتصالات لرزه‌ای داخلی، اتصالات لرزه‌ای خارجی، اتصالات غیرلرزه‌ای داخلی و اتصالات غیرلرزه‌ای خارجی به ترتیب ۰/۸۹، ۱، کمتر از ۰/۸۹ و ۰/۶۷ می‌باشد. همچنین این محدودیت برای پایین‌ترین طبقه با توجه به افزایش تقاضای برش لرزه‌ای، جابجایی و شکل‌پذیری جانبی در طبقات قاب‌های خمشی بتن‌آرمه از بالا به پایین باید سختگیرانه‌تر از دیگر طبقات اعمال گردد.

در پایان متذکر می‌شود که برای تعیین مقادیر دقیق نسبت ارتفاع تیر به پهناي ستون، انجام تحقیقات جامع آزمایشگاهی و عددی جامع لازم است.

۳- نتیجه‌گیری

شرط لازم در دستیابی به رفتار لرزه‌ای مطلوب قاب‌های خمشی بتن‌آرمه حفظ مسیر انتقال نیروست تا بازتوزیع نیروها مابین طبقات و قاب‌ها ادامه پیدا کند. در زلزله‌های اخیر مشاهده شده است که علی‌رغم بهره‌مندی تیرها و ستون‌های قاب‌های خمشی بتن‌آرمه از مقاومت و شکل‌پذیری مناسب برای پاسخ به نیروها، با تسلیم برشی برخی از اتصالات، تخریب جزئی یا کلی در سازه اتفاق افتاده است. هرچند با وضع برخی الزامات در آیین‌نامه‌ها سعی شده است که جلوی تسلیم یا خرابی برشی چشمه‌ی اتصال گرفته شود، اما به اعتقاد نویسندگان این مقاله ضابطه‌ی مکملی برای جلوگیری از رفتار ترد بتن در رابطه با عدم تخریب برشی چشمه‌ی اتصال و حفظ مسیر انتقال نیرو مورد نیاز است. بنابر

- [1] Paulay, T., Priestley, M. J. N. (1992). "Seismic design of reinforced concrete and masonry buildings". John Wiley & Sons, New York, USA.
- [2] Priestley, M. J. N., Calvi, G. M., Kowalsky, M. J. (2007). "Displacement-based seismic design of structures". 1st ed, IUSS Press, Pavia, Italy.
- [3] ویرایش ۵ مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان، (۱۳۹۹). "طرح و اجرای ساختمان‌های بتن‌آرمه". دفتر امور مقررات ملی ساختمان، وزارت راه، مسکن و شهرسازی، تهران، ایران.
- [4] ACI 318, (2019). "Building code requirements for structural concrete and commentary". American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, USA.
- [5] Yang, H., Zhao, W., Zhu, Z., Fu, J. (2018). "Seismic behavior comparison of reinforced concrete interior beam-column joints based on different loading methods". *Engineering Structures*, Vol. 166, pp 31-45.
- [6] Shen, X., Li, B., Chen, Y. T., Tizani, W. (2021). "Seismic performance of reinforced concrete interior beam-column joints with novel reinforcement detail". *Engineering Structures*, Vol. 227.
- [7] Jin, L., Miao, L., Han, J., Du, X., Wei, N., Li, D. (2018). "Size effect tests on shear failure of interior RC beam-to-column joints under monotonic and cyclic loadings". *Engineering Structures*, Vol. 175, pp 591-604.
- [8] Pakzad, A., Khanmohammadi, M. (2020). "Experimental cyclic behavior of code-conforming exterior wide beam-column connections". *Engineering Structures*, Vol. 214.
- [9] Chun, S. C., Shin, Y. S. (2014). "Cyclic testing of exterior beam-column joints with varying joint aspect ratio". *ACI Structural Journal*, Vol. 111 (3), pp 693-704.
- [10] Hung-Jen, L., Jen-Wen, K. (2007). "Eccentric reinforced concrete beam-column connections subjected to cyclic loading in principal directions". *ACI Structural Journal*, Vol. 104 (4), pp 459-67.
- [11] Shafaei, J., Zareian, M. S., Hosseini, A., Marefat, M. S. (2014). "Effects of joint flexibility on lateral response of reinforced concrete frames". *Engineering Structures*, Vol. 81, pp 412-31.
- [12] Kim, C. G., Park, H. G., Eom, T. S. (2020). "Shear strength of exterior beam-column joints with limited ductility details". *Journal of Structural Engineering (United States)*, Vol. 146 (2).
- [13] Han, S. W., Kang, M. K., Kang, H. (2023). "Seismic behavior of RC-SMF and IMF corner beam-column connections subjected to unidirectional and bidirectional lateral loads". *Engineering Structures*, Vol. 292, pp 116563.
- [14] Choi, M.-H., Lee, C.-H. (2023). "Assessing the impact of eccentricity, slabs, and transverse beams on the behavior of reinforced concrete beam-column joints". *Structures*, Vol. 49, pp 212-22.
- [15] Park, S., Mosalam, K. M. (2013). "Experimental investigation of nonductile RC corner beam-column joints with floor slabs". *Journal of Structural Engineering (United States)*, Vol. 139 (1), pp 1-14.
- [16] Wong, H. F., Kuang, J. S. (2008). "Effects of beam-column depth ratio on joint seismic behaviour". *Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Structures and Buildings*, Vol. 161 (2), pp 91-101.
- [17] Lam, E. S.-s., Li, B., Xue, Z.-h., Leung, K.-t., Lam, J. Y.-k. (2019). "Experimental studies on reinforced concrete interior beam-column joints strengthened by unsymmetrical chamfers". *Engineering Structures*, Vol. 191, pp 575-82.
- [18] Wong, H. F. S., Liu, Y., Lee, P., Kwong, W. (2021). "Seismic behavior of non seismically designed eccentric reinforced concrete beam column joints". *Earthquakes and Structures*, Vol. 21 (6), pp 613.
- [19] Han, S. W., Lee, C. S. (2020). "Cyclic behavior of RC OMF beam-corner column joints under unidirectional and bidirectional loadings". *Engineering Structures*, Vol. 224.

بررسی موردی شناسائی عوامل موثر بر ایجاد کارائی خمیر سیمان در بتن



علی اکبر کفاش بازاری
مدیر کنترل کیفی و رئیس مرکز تحقیق و توسعه مجتمع
صنعتی سیمان تهران

چکیده

پر واضح است که روش رایج تولید بتن در کشور (یعنی افزودن آب در بتن جهت دستیابی به اسلامپ مدنظر) موجب تغییرات w/c می شود که بیشترین تاثیر در مقاومت فشاری بتن سخت شده را دارد. از این رو شناسائی و کنترل عوامل مرتبط با آب مورد نیاز جهت ایجاد کارائی در بتن، گامی مهم جهت ارتقای مقاومت فشاری بتن سخت شده می باشد. در این مطالعه سعی شد تا عوامل مذکور به همراه یک عملیات آزمایشگاهی شناسائی گردند. بنابراین تعداد ۱۳ نمونه سیمان پرتلند نوع ۲ تهیه گردید و بر روی آنها آزمایش های شیمیائی و فیزیکی انجام گرفت. یک نمونه افزودنی فوق روان کننده نیز تهیه شد. سپس دو آزمایش میز جریان (Flow table) و مینی اسلامپ بر روی این نمونه ها طی دو مرحله انجام گرفت؛ به صورتی که یک مرحله خمیر سیمان فاقد افزودنی و یک مرحله خمیر سیمان دارای افزودنی بود. بطور کلی عوامل موثر در مقدار آب بتن را در سه گروه طرح اختلاط بتن و شرایط محیطی، سنگدانه ها و سیمان تشریح شدند. مقایسه نتایج نشان دادند که میزان سولفات در سیمان، نرمی (بلین) و فاز آلومینات بیشترین تاثیر در ایجاد کارائی خمیر سیمان را دارند. کلمات کلیدی: سیمان، رئولوژی، بتن، مینی اسلامپ، میز جریان.

۱. مقدمه

ایچین و همکار (۲۰۱۴) طی مطالعه گسترده پیشنهاد دادند که تولیدکنندگان سیمان، ۲ نوع

سیمان تولید نمایند، که یک نوع برای بتن های معمولی با نسبت w/c بیش از ۰/۵ و نوع دیگر برای بتن های با کارائی زیاد و نسبت w/c حدود ۰/۴-۰/۳ و دارای افزودنی باشد؛ از این رو با توجه به روش رایج

تولید بتن در کشور (یعنی افزایش آب به بتن برای دستیابی به کارایی یا همان اسلامپ مدنظر) به نظر می‌رسد که مصرف سیمان نوع اول، کاربرد زیادی دارد. بدیهی است که نسبت آب به سیمان (w/c) بیشترین تاثیر در خصوصیات بتن را دارد و کاهش آن منجر به افزایش مقاومت بتن می‌گردد [۱]. بنابراین شناسایی عوامل موثر در تغییرات آب جهت ایجاد کارایی در بتن تازه، گامی مهم جهت ارتقای مقاومت بتن تولیدی خواهد بود.

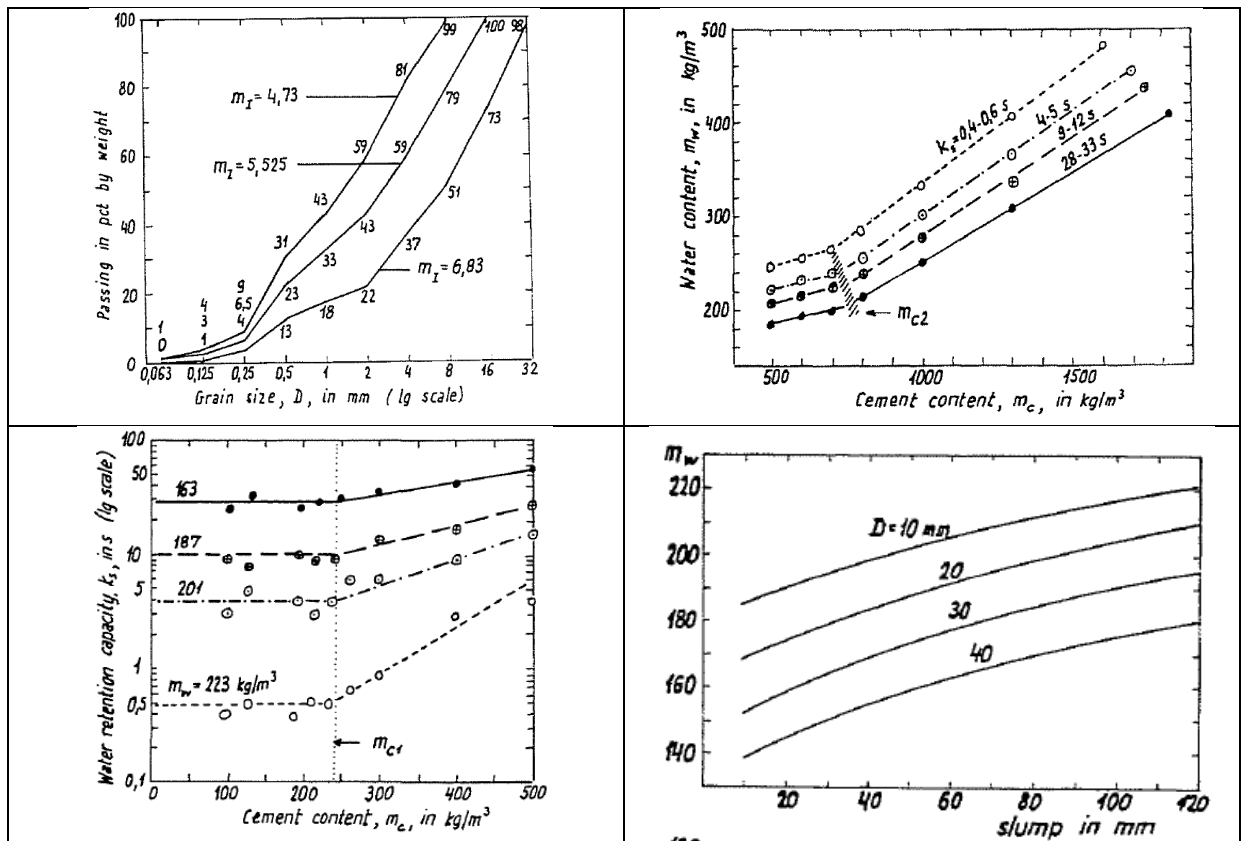
از منظر تئوری، مقدار آب لازم جهت هیدراته شدن سیمان ۲۵٪ (وزنی) است که با این مقدار نمی‌توان به هیدراته کامل سیمان دست یافت و حدود ۱۵-۱۰٪ آب دیگر لازم است؛ یعنی جهت هیدراته شدن کامل و کسب مقداری روانی یا کارپذیری حدود ۳۵-۴۰٪ آب لازم می‌باشد. بنابراین ممکن است علاوه بر این مقدار و متناسب با شرایط مخلوط بتن، مقدار آب مصرفی بیشتر باشد [۲]. کارایی از خواص مهم بتن تازه است که در واقع کار یا انرژی لازم جهت غلبه بر اصطکاک ذرات بتن جهت جای‌دهی، حمل و تراکم آن می‌باشد. مهمترین عامل تغییر کارایی بتن، آب است [۳]. البته نیاز به آب در بتن همواره در طراحی مخلوط [۴-۶]، رئولوژی بتن تازه، خواص مکانیکی بتن سخت شده و دوام آن موثر است. جهت تشریح این موضوع لازم است که عناوین "آب کل"، "آب آزاد" و "آب اختلاط" در بتن بطور

خلاصه معرفی شوند. آب کل، کل آب مخلوط بتن شامل: آب جذب شده توسط سنگدانه برای رسیدن به شرایط اشباع با سطح خشک و آب آزاد برای انجام هیدراته شدن سیمان و تامین کارایی می‌باشد. آب اختلاط در بتن مقدار آبی است که در واکنش شیمیایی سیمان مشارکت ندارد و برای مرطوب کردن مصالح سنگی و کارایی مورد نیاز به طرح اختلاط اضافه می‌شود.

با توجه به توضیحات ارائه شده، در ادامه به عوامل موثر در آب‌خواهی بتن پرداخته می‌شود.

۲. عوامل موثر در مقدار آب بتن

به زعم المر (۱۹۹۷) آب مورد نیاز در بتن را می‌توان به سه دسته تقسیم کرد: (الف) مخلوط‌های بتنی کم سیمان (حدود ۱۵۰-۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، (ب) مخلوط‌های بتن معمولی با عیار سیمان متوسط (۶۰۰-۲۵۰ کیلوگرم بر متر مکعب)، (ج) مخلوط‌های بتنی پر سیمان (حدود ۶۰۰-۷۰۰ کیلوگرم بر متر مکعب). وی به تشریح روش محاسبه مقدار آب لازم بسته به عیار و نرمی سیمان، نوع و دانه‌بندی سنگدانه‌ها و کارایی لازم پرداخت و روابط مختلفی ارائه نمود (شکل ۱). وی مهمترین عوامل آب‌خواهی در بتن را شامل نرمی و عیار سیمان، مدول نرمی سنگدانه، حداکثر اندازه سنگدانه و دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها، اسلامپ یا جریان اسلامپ مخلوط بتن و فاکتور تراکم معرفی کرد [۷].



شکل ۱- نمودارهای ارتباط برخی پارامترهای موثر در آب‌خواهی بتن (المر ۱۹۹۷) [۷]

- مقدار مواد سیمان کمکی مانند میکروسیلیس، زئولیت، سرباره و غیره (محتمل)؛
- مقدار و نوع الیاف (محتمل)؛
- مقدار هوای (عمدی و غیرعمدی) بتن که اگر بیش از حدود معمول (۲-۳٪) باشد، نیاز به آب بیشتر می‌باشد؛
- دمای زیاد محیط و اجزای بتن: آزمایش‌های اخیر در امریکا نشان داده‌اند که با افزایش ۱۷ درجه سانتی‌گراد دمای هوا، تقاضای آب ۶-۲٪ افزایش می‌یابد [۹]؛
- وزش باد؛
- شرایط نامناسب نگهداری و مصرف سیمان در دستگاه مخلوط‌کن مانند هیدراته ناقص سیمان طی فرآیندهای آب پاشی و خنک‌سازی، تعریق سیمان داغ یا سوراخ بودن محفظه سیلواها، بونکرها و موارد مشابه؛
- شرایط نامناسب تولید و حمل بتن.

۲-۲ - سنگدانه‌ها:

بر اساس منابع مختلف، بطور کلی می‌توان عوامل موثر در آب‌خواهی بتن را به سه دسته تقسیم نمود: ۱- طرح مخلوط بتن و شرایط محیطی؛ ۲- سنگدانه‌ها؛ ۳- سیمان که در ادامه به تشریح هر یک از آنها پرداخته می‌شود.

۱-۲ - طرح مخلوط بتن و شرایط محیطی:

افزایش در هر یک از پارامترهای مختلف مخلوط بتن می‌تواند موجب افزایش عوامل آب مورد تقاضا^۱ (آب‌خواهی) بتن گردد که مهمترین آنها شامل موارد زیر است:

- میزان کارائی و اسلامپ بتن تازه [۸]؛
- نسبت آب به سیمان (w/c)؛
- عیار سیمان مصرفی (یا حجم خمیر در طرح مخلوط)؛
- مقدار و خصیصه‌های مواد افزودنی (محتمل)؛

^۱ Water demand

شرایط سنگدانه‌ها نیز می‌تواند در آب‌خواهی بتن تاثیرگذار باشد. مهمترین عوامل بصورت زیر است:

• دانه‌بندی مخلوط سنگدانه‌ها (پیوسته یا گسسته و بافت ریز یا درشت): دانه‌بندی گسسته و ریزبافتی سنگدانه‌ها آب‌خواهی بتن را افزایش می‌دهد؛

• شکل سنگدانه‌ها (طویل یا متورق/سوزنی یا پولکی): افزایش سهم دانه‌های طویل یا متورق یا طویل و متورق موجب افزایش مصرف آب در بتن جهت ایجاد روانی می‌گردد [۱۰]؛

• حداکثر اندازه سنگدانه (MSA^1): کاهش حداکثر اندازه سنگدانه‌ها موجب افزایش آب‌خواهی بتن می‌شود؛

• تمیزی سنگدانه (عبوری از الک شماره ۲۰۰)، افزایش میزان مانده روی الک ۲۰۰ (ذرات رسی)، باعث آب‌خواهی بتن می‌گردد؛

• میزان تخلخل سنگدانه که خلل و فرج بیش از حد موجب کاهش کارایی بتن تازه می‌شود؛

• جنس و درصد شکستگی سنگدانه‌ها که افزایش آن در افزایش آب‌خواهی بتن موثر است. برای محاسبه آب‌خواهی سنگدانه‌های طبیعی (NCA^2) که از دانه‌بندی، نوع و قوام مخلوط بتن تبعیت دارند، از روابط استرنز بلومیز^۳ استفاده می‌شود، در صورتیکه برای آب‌خواهی سنگدانه‌های بازیافتی (RCA^4) چنین روابطی وجود ندارد. بدین منظور کوبیسا و همکاران (۲۰۱۵) با توجه به خواص مکانیکی RCA، روابطی برای طراحی مخلوط بتن ارائه دادند [۱۱]؛

• آلودگی سنگدانه‌ها که با آزمایش‌های تعیین ناخالصی‌های آلی، تعیین مواد سبک وزن، تعیین مواد مضر، سنگدانه‌های حاوی نمک‌های کلرور و سولفات [۱۲-۱۳].

۲-۳- سیمان

تولیدکنندگان بتن، معمولاً سیمان با آب‌خواهی کم را به دلایل اقتصادی ترجیح می‌دهند، زیرا برای دستیابی به اسلامپ و مقاومت بتن مدنظر به سیمان کمتری نیاز دارند. در ادامه مهمترین عوامل موثر در آب‌خواهی بتن معرفی می‌شود:

• نوع سیمان: آب‌خواهی در انواع سیمان‌ها (پرتلند، سربراره‌ای، آهکی، پوزولانی، مرکب و غیره) متفاوت است؛

• نرمی سیمان: افزایش بی‌رویه نرمی (بلین) در سیمان باعث افزایش آب‌خواهی در بتن می‌شود. این افزایش به نوبه خود معمولاً باعث افزایش نسبت w/c شده [۱۴-۱۶] که منتهی به کاهش مقاومت‌های کوتاه، میان و درازمدت و حتی دوام بتن می‌گردد [۱۷]؛

• دانه‌بندی سیمان: ذرات ۰-۳ میکرون با آب‌خواهی سیمان رابطه مستقیم و واضحی دارند [۱۸]. همچنین سیمان با منحنی دانه‌بندی باریک‌تر (تنوع اندازه ذرات کمتر) بیشترین آب‌خواهی را نشان داده است. البته آب‌خواهی بیشتر در سیمان منجر به زمان گیرش طولانی‌تر می‌شود [۱۹]؛

• مواد افزونه در سیمان شامل پوزولان، سربراره، آهک و غیره که رابطه مستقیم با آب‌خواهی در بتن دارند. کنترل شاخص LOI به این موضوع کمک می‌کند [۲۰].

• مقدار فاز C_3A (رابطه مستقیم)؛

• مقدار فاز C_3S (رابطه مستقیم)؛

¹ Maximum Size of Aggregate (MSA)

² Natural Concrete Aggregates (NCA)

³ Sterne's Bolomey's

⁴ Recycled Concrete Aggregates (RCA)

• مقدار سولفات (رابطه مستقیم)؛

• قلیائی‌ها: با افزایش قلیائی‌ها افزایش آب‌خواهی در بتن مشاهده شده است که علت آن کاهش سیالیت خمیر سیمان با افزایش چگالی سطحی (منطبق با افزایش Ph. و نیز افزایش قلیائی‌های تک ظرفیتی سدیم و پتاسیم) می‌باشد [۲۱]؛

• آهک آزاد (رابطه مستقیم)؛

• مصرف مواد کمک ساینده در آسیای سیمان که گاهی حاوی افزودنی روان‌کننده (کاهنده آب) بتن می‌باشد؛

• ۲-۳-۱۱- شرایط پخت و خنک‌سازی کلینکر که شامل موارد متعددی است و نکته اصلی رعایت پروفایل حرارتی-زمانی متناسب با مقدار و شرایط مواد خام می‌باشد؛

• نوع کانی سنگ گچ مورد استفاده در تولید سیمان نیز در آب‌خواهی آن تاثیرگذار است، بطوریکه کانی‌های بدون آب یا نیمه‌آبدار (انیدریت یا همی هیدرات) نسبت به کانی گچ آبدار (ژپس)، جهت ساخت بتن مصرف آب بیشتری دارد. در آسیاهای سیمان (به ویژه نوع گلوله‌ای) حرارت موجب از دست رفتن آب و تبدیل کانی ژپس به همی هیدرات یا انیدریت می‌شود که برای ایجاد خمیر مناسب سیمان در بتن مطلوب نیست؛

• قوام استاندارد [۲۲] که این پارامتر برآیند عوامل دیگر (مقادیر آلایت، گچ، آلومینات، قلیائی‌ها، بلین و غیره) می‌باشد؛

• استعداد زتا: توزیع بار الکتریکی در اطراف ذرات باعث تأثیر بر روی یون‌های مجاور شده که نتیجه آن افزایش غلظت تعداد یون‌ها (با بار الکتریکی مخالف) است. پتانسیل زتا برابر اختلاف در پتانسیل میان سیستم پراکنده شده کل، لایه‌ای

که حد فاصل ذرات پراکنده شده و پراکنده‌ساز است [۲۳]؛ توزیع نامناسب بار الکتریکی در محصولات آسیاهای سیمان (به ویژه نوع گلوله‌ای) موجب ایجاد پتانسیل زتا می‌شود که در آب‌خواهی بتن موثر می‌باشد؛

• مصرف زیاد کلینکر مانده و انباشتی در تولید سیمان موجب افزایش آب‌خواهی بتن می‌گردد؛

• استفاده از سنگ آهک با خلوص زیاد (مقدار مدول آهک LSF زیاد) و در نتیجه مصرف خاک رس زیاد جهت تامین اکسیدها در تنظیم مواد کارخانه سیمان احتمالاً موجب افزایش آب‌خواهی بتن می‌گردد؛

• سهم کانی‌های متفرقه (پلاژیوکلاز، هماتیت، گوتیت، روتیل، آلایت و غیره) نباید در آنالیز XRD مواد خام تولید سیمان زیاد باشد (به علت اخلاص در فرآیند پخت کلینکر). همچنین وفور کانی‌های کربنات کلسیم-منیزیم (دولومیت و آنکریت) به جای کانی کلسیت مطلوب نیست؛

• در مطالعات میکروسکوپی خوراک کوره نیز مقدار سیلیس آزاد و کانی‌های مزاحم پخت (AK) مناسب نمی‌باشند؛

• نتایج مطالعات میکروسکوپی اکتیویته کلینکر (مقدار آهک آزاد، آلایت و آلومینات) در آب‌خواهی بتن موثر است [۲۴]؛

شرایط تولید در آسیای سیمان مانند نحوه و نرخ ترزریق آب، دم‌ای ورودی و خروجی، عملکرد بگ‌هوس (نوعی از سیستم‌های غبارگیر با راندمان بالا) و غیره نیز در آب‌خواهی سیمان تاثیرگذار هستند؛

از دیگر عوامل تاثیرگذار می‌توان به ذرات سوزنی و پولکی شکل و دانه‌بندی سیمان اشاره نمود. تغییرات

سوزنی و پولکی بصورت تخمینی و بر روی نمونه‌های تصادفی به روش میکروسکوپی در تولیدی‌های سیمان صورت می‌پذیرد. در بتن مصرف ذرات کروی شکل سیمان نسبت به ذرات سوزنی و پولکی بعلت تامین کارایی بهتر ارجحیت دارند، همچنین آب‌خواهی کمتری را به دنبال دارند [۲۵].

۳. سوابق تحقیقات:

آزمایش‌های مینی اسلامپ (ASTM WK27311) [۲۶]، میز جریان ۱ [۲۷] (خمیر سیمان و ملات استاندارد) به همراه خصوصیات فیزیکی-شیمیایی سیمان، امکان مقایسه خوبی را ارائه می‌دهند. نیومن (۲۰۰۳) رابطه بین نتایج آزمایش‌های اسلامپ (برای بتن‌هایی با نسبت w/c ثابت) و میز جریان برای ملات آن سیمان‌ها را بررسی نمود و نشان داد که نتایج این دو آزمایش رابطه خطی با هم ندارند [۲۸]. راسل و همکاران (۲۰۰۵) نیز با استفاده از آزمایش قیف آبرام (مشابه مینی اسلامپ) کارپذیری خمیر سیمان را تعیین نمودند. آنها روابطی برای شاخص‌های آزمایش مینی اسلامپ و تنش تسلیم ارائه نمودند [۲۹]. کورتس و سانتامارینا (۲۰۰۷) میزان جریان‌پذیری ملات‌های مختلف ساخته شده با ماسه اتاوا و ماسه حاصل از سنگ گرانیت خردشده را مقایسه و نشان دادند که اگر ماسه مورد استفاده در ملات استاندارد آزمایش میزجریان کاملاً شکسته باشد، دستیابی به حدود

۵۰-۳۰٪ مقدار جریان استاندارد امکان‌پذیر می‌باشد؛ در حالی که ملات ساخته شده با ماسه طبیعی اتاوا ۱۰۰٪ میزان جریان استاندارد را نشان می‌دهد [۳۰]. بووت و همکاران (۲۰۱۰) یک مطالعه کلی در مورد جریان خمیر سیمان ارائه نمودند که در آن دو آزمایش مینی اسلامپ و مخروط مارش برای ارزیابی کارایی مخلوط خمیر تازه حاصل از بتن‌های خودمترکم استفاده شد [۳۱]. مطابق تحقیقات تاکر و آرورا (۲۰۱۵) با افزایش مقدار w/c به بیش از ۰/۵۲، تغییرات چندانی در نتیجه آزمایش میز جریان دیده نمی‌شود. آنها اثبات نمودند که آزمایش قیف مارش برای خمیرهای سیمان با w/c حداکثر ۰/۷۲ معتبر می‌باشد [۳۲]. چوی و همکاران (۲۰۱۶) خواص رئولوژیکی بتن‌های فوق توانمند (UHPC) را با استفاده از آزمون مینی اسلامپ برآورد نمودند. آنها تجزیه و تحلیل دینامیک سیالات محاسباتی (CFD^۳) آزمایش مینی اسلامپ در محدوده ویسکوزیته و تنش تسلیم UHPC انجام دادند و یک معادله ساده ارائه نمودند که همبستگی بین تغییر قطر پخش در طول زمان به دست آمده از آنالیز و خواص رئولوژیکی را بیان می‌کند [۳۳]. تن و همکاران (۲۰۱۷) با مطالعه خمیر سیمان‌های متعددی دریافتند که روش مینی اسلامپ دیدگاه قابل اعتمادی برای سنجش کارپذیری خمیر سیمان ارائه می‌دهد [۳۴]. آقابگلو و همکاران (۲۰۲۱) جهت ارزیابی و پیش‌بینی رفتار جریان خمیر سیمان

^۲ ultra-high performance concrete (UHPC)

^۳ Computational fluid dynamic (CFD)

^۱ Flow table

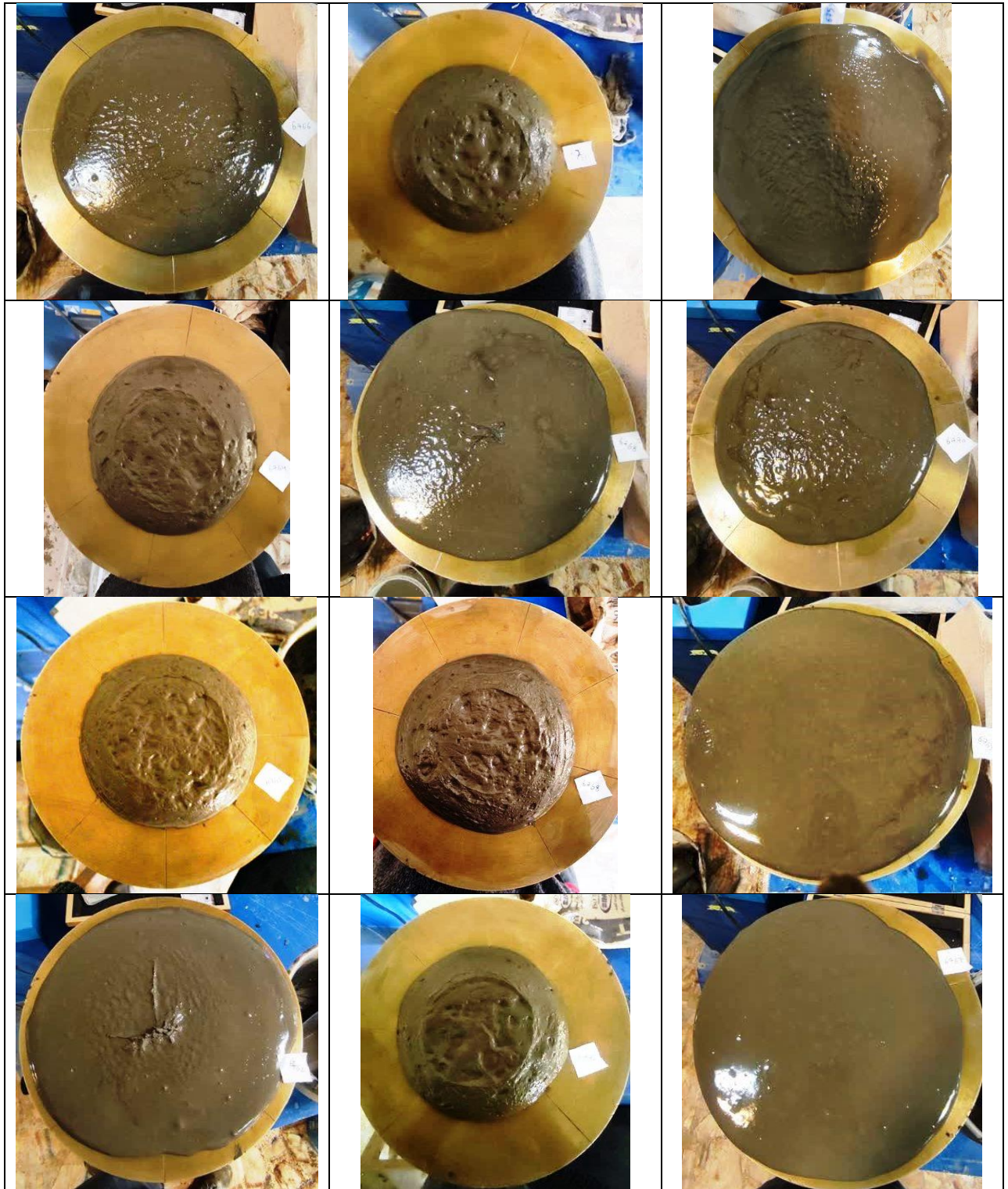
از آزمایش‌های زمان جریان قیف مارش و مقادیر مینی اسلامپ بهره گرفتند و با استفاده از روش‌های هوش مصنوعی و رگرسیون، مدل‌سازی کردند. آنها نتیجه گرفتند که مقدار افزودنی، نرمی سیمان، مقدار مواد جامد مواد افزودنی و مقدار C3A سیمان مهمترین پارامترهای مؤثر بر جریان‌پذیری خمیر هستند. همچنین مشاهده نمودند که محتوای C2S، قلیایی معادل، C4AF و C3S سیمان تأثیر قابل‌توجهی بر جریان‌پذیری خمیر سیمان در قیف مارش ندارد [۳۵]. لی و همکاران (۲۰۲۲) خواص و مکانیسم مواد سیمانی اصلاح شده با لاتکس را بر تقاضای آب، مقاومت مکانیکی و ریزساختار خمیر سیمان را مطالعه نمودند [۳۶]. فامیلی و همکاران (۱۳۸۷) استفاده از آزمایش مینی اسلامپ (یا همان قیف أبرام) را برای طراحی بهینه بتن توانمند (به علت نقش خمیر در آن) ضروری دانستند [۳۷]. محبی و عزیز محمدی (۱۳۸۸) برای بررسی تأثیر افزودنی‌های معدنی بر مشخصات رفتاری خمیر سیمان بتن خودتراکم از آزمایش‌های مینی اسلامپ و میزجریان بهره گرفتند [۳۸]. رستمی (۱۳۹۶) با استفاده از نتایج آزمایش مینی اسلامپ و با افزایش نسبت ابرروان کننده به اجزای فعال بتن در محدوده ۱/۵-۱٪، مقادیر اسلامپ بالا و حفظ آن تا مدت

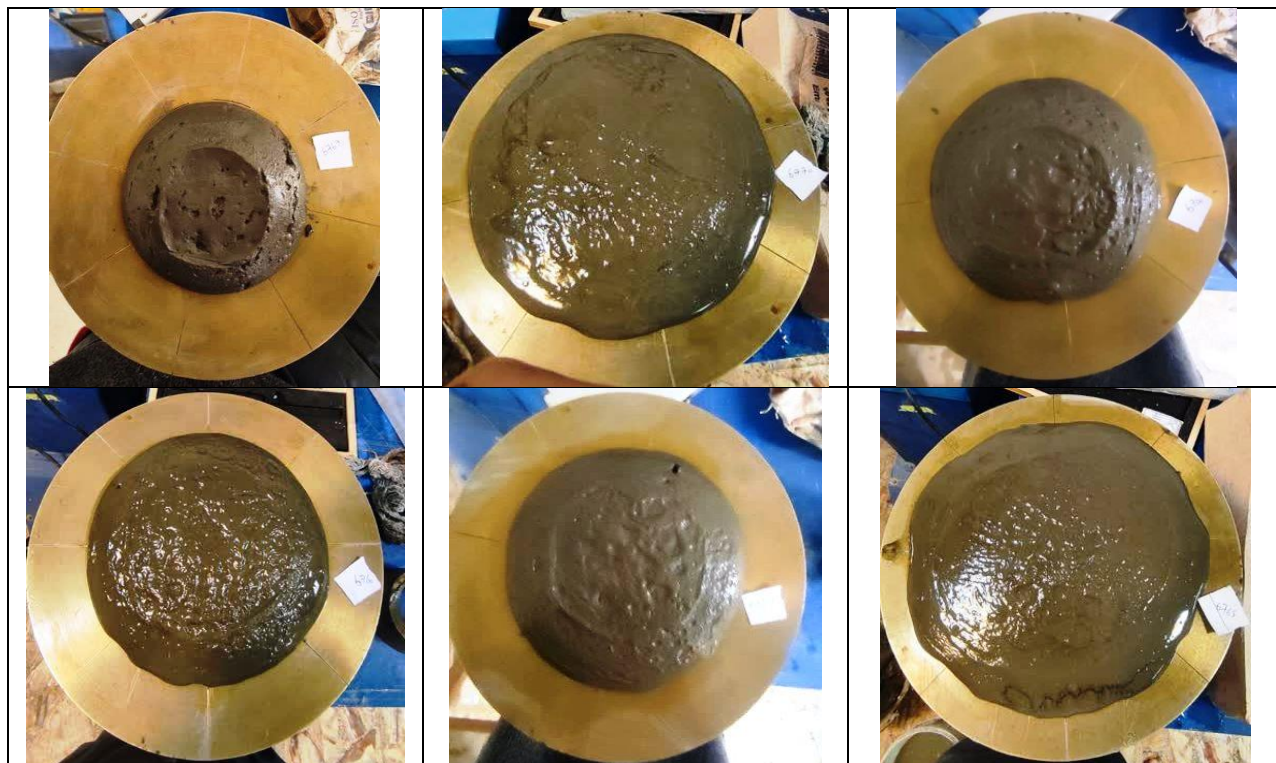
۱۵۰-۱۰۰ دقیقه را مشاهده نمود [۳۹]. کفاش و همکاران (۱۳۹۷) تأثیر میزان آب مورد نیاز برای ایجاد کارایی در خمیر سیمان، ملات و بتن را بررسی نمودند. این محققان به آزمایش میز جریان و مینی اسلامپ بر نمونه‌های متعدد نشان دادند که شاخص FSI در آزمایش مینی اسلامپ با مقاومت کوتاه مدت ارتباط مستقیم، با مقاومت میان مدت رابطه معکوس و با نرمی (بلین) سیمان رابطه مستقیمی دارد [۴۰]. کلیس و همکارانش (۲۰۰۱) [۴۱] و ژای و همکاران (۲۰۲۳) [۴۲] نیز نتایج مشابهی را ارائه نمودند.

۳. عملیات آزمایشگاهی:

برنامه آزمایشگاهی این مطالعه به صورت مراحل زیر بود (شکل ۳):

- ۱) تهیه ۱۳ نمونه سیمان تازه پرتلند نوع ۲ از کارخانه سیمان تهران؛
- ۲) تعیین مشخصات شیمیائی (XRF)، فیزیکی و مکانیکی سیمان‌ها شامل تعیین مانده روی الک‌ها [۴۳]، تعیین نرمی با شاخص بلین [۴۴]، زمان گیرش [۴۵]، غلظت نرمال [۴۶-۴۷] و مقاومت فشاری ملات استاندارد [۴۸] (جدول ۳)؛
- ۳) تهیه ملات استاندارد با نمونه‌های سیمان و انجام آزمایش میز جریان (شکل ۲)؛





شکل ۲-انجام آزمایش میز جریان بر روی نمونه‌های مختلف

۴) تهیه ملات استاندارد با افزودنی فوق روان کننده بر پایه پلی کربوکسیلات اتر به مقدار وزنی ۰/۵٪ وزنی سیمان برای همه نمونه‌های سیمان و انجام آزمایش میز جریان؛

۵) تهیه خمیر استاندارد سیمان با همه نمونه‌ها و انجام آزمایش مینی اسلامپ نمونه‌ها (شکل ۳)؛



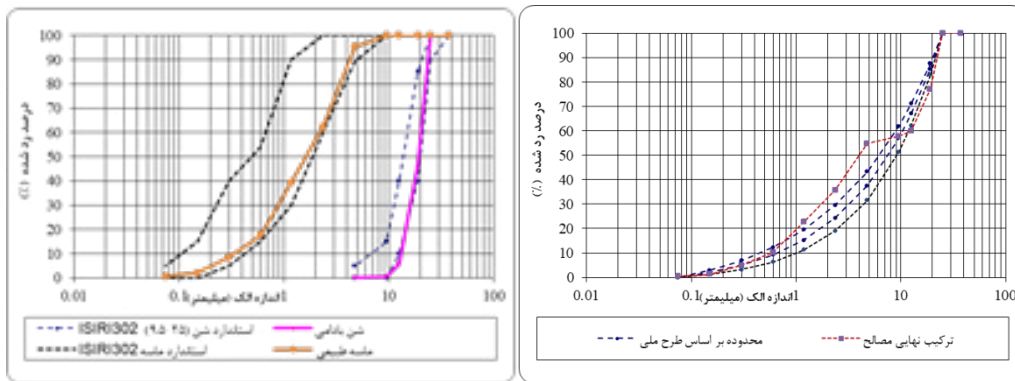
شکل ۳-انجام آزمایش مینی اسلامپ بر روی نمونه‌های مختلف

۶) تهیه تعداد ۱۳ طرح مخلوط بتن آزمایشگاهی با روانی (اسلامپ) برابر (۰/۵±۸ سانتی‌متر) و عیار سیمان ۳۵۰ کیلوگرم در مترمکعب بدون افزودنی؛

شکل ۴ و جدول ۳ مشخصات سنگدانه‌های مصرفی در این مطالعه را نشان می‌دهد. طراحی مخلوطها به روش ملی انجام شد. برای تهیه این مخلوط ۵۷٪ ماسه با ۴۳٪ شن درشت استفاده شد (نمودار شکل ۴).

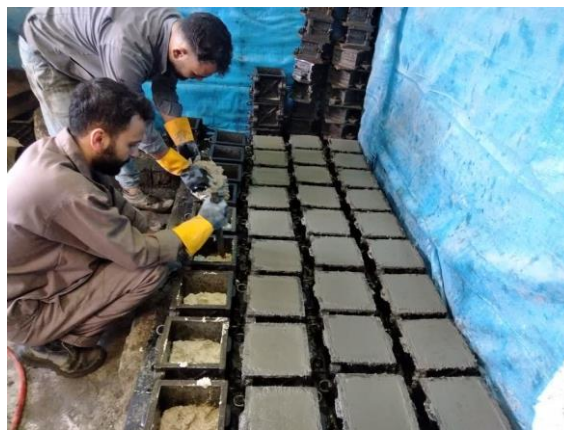
جدول ۱- مشخصات فنی مصالح مورد استفاده در طرح های مخلوط بتنی

نوع مصالح	مدول نرمی	جذب آب (%)	وزن مخصوص (SSD)	شکستگی (%)	عبوری از الک ۲۰۰ (%)
شن متوسط نیمه شکسته (بادامی)	۷/۱	۲/۲۰	۲/۵۶	۴۵	۰/۲
ماسه نیمه شکسته	۳/۸	۳/۶	۲/۵۱	*	۴/۳



شکل ۴- نمودار دانه‌بندی مصالح سنگی و مخلوط آن

(۷) انجام آزمایش‌های اسلامپ، افت اسلامپ پس از ۳۰ دقیقه و مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه (شکل ۵)؛



شکل ۵- تهیه مخلوط‌های بتنی و آزمایش‌های مربوطه

۴. نتایج و تحلیل

در مرحله اول نتایج آزمایش‌های تعیین مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی سیمان‌ها در جدول ۲ دیده می‌شوند.

جدول ۲- نتایج آزمایش‌های تعیین مشخصات شیمیایی، فیزیکی و مکانیکی نمونه‌های سیمان

شماره	مقاومت فشاری ملات استاندارد (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)			مانده روی الک (%)		بلین (سانتی‌متر مربع بر گرم)		زمان گیرش (دقیقه)	قوام استاندارد (%)
	۲روزه	۷روزه	۲۸روزه	۹۰ میکرون	۴۵ میکرون	اولیه	نهایی		
۱	۲۰۷	۳۴۹	۴۸۲	۲/۰	۶/۰	۳۳۲۷	۲۰۰	۲۹۰	۲۵
۲	۲۰۰	۳۲۴	۴۸۶	۱/۱	۸/۰	۲۸۹۲	۲۲۰	۲۹۰	۲۴
۳	۲۰۷	۳۶۵	۵۱۳	۲/۰	۶/۱	۲۹۳۲	۲۶۰	۳۶۰	۲۵
۴	۲۱۳	۳۶۲	۵۱۹	۰/۷	۶/۰	۳۱۲۴	۲۱۰	۲۹۰	۲۴/۵
۵	۲۰۶	۳۵۶	۵۱۰	۰/۸	۵/۸	۳۰۸۶	۲۱۵	۳۰۰	۲۴/۵
۶	۲۱۳	۳۳۳	۵۳۴	۰/۴	۷/۹	۲۹۷۲	۲۱۵	۳۰۰	۲۴/۵
۷	۱۷۹	۳۸۸	۴۹۰	۰/۸	۶/۴	۲۸۲۲	۲۱۰	۲۹۵	۲۴/۵
۸	۲۳۰	۳۳۸	۵۵۸	۲/۸	۹/۳	۳۰۱۰	۲۱۵	۳۰۵	۲۴/۵
۹	۱۶۱	۳۳۸	۵۲۸	۰/۴	۵/۳	۳۰۲۵	۱۹۰	۳۲۰	۲۴/۵
۱۰	۱۹۴	۳۷۱	۵۱۶	۰/۶	۷/۴	۳۱۲۴	۲۳۵	۳۱۵	۲۴/۵
۱۱	۱۸۵	۳۶۳	۵۱۶	۰/۷	۵/۶	۳۱۲۴	۲۱۰	۲۹۵	۲۴/۵
۱۲	۱۸۴	۳۲۲	۴۹۲	۱/۲	۶/۶	۳۳۰۴	۱۸۵	۲۷۵	۲۵
۱۳	۱۹۲	۳۴۳	۴۹۹	۰/۷	۶/۴	۳۱۹۷	۲۰۰	۳۰۵	۲۴/۵

این نتایج نشان می‌دهند که سیمان‌های مورد استفاده در این تحقیق، خصوصیات فیزیکی نسبتاً مشابهی دارند. نتایج آزمایش‌های تعیین مشخصات شیمیایی، مینی اسلامپ و میز جریان در جدول ۳ مشاهده می‌شوند.

جدول ۳- خلاصه نتایج آزمایش‌های تعیین مشخصات شیمیایی، مینی اسلامپ و میز جریان نمونه‌های سیمان

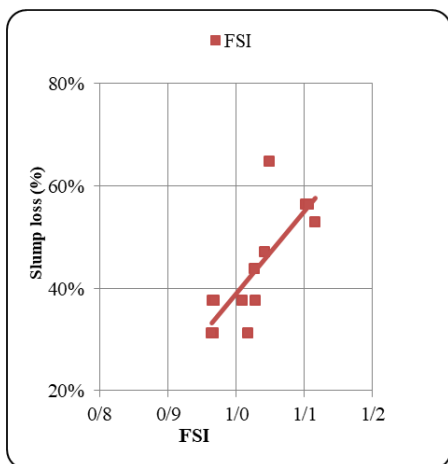
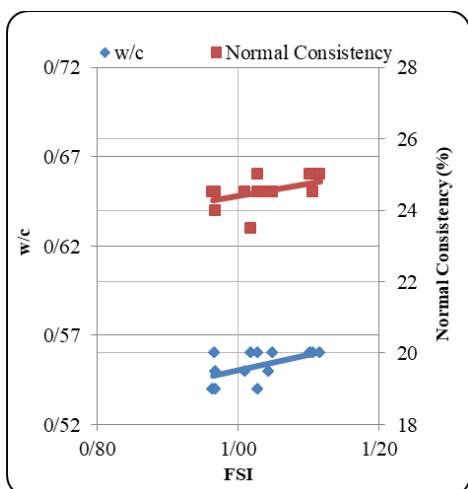
شماره	نتایج آزمایش میز جریان- ملات بدون افزودنی (سانتی‌متر)	نتایج آزمایش میز جریان- ملات با افزودنی (سانتی‌متر)	شاخص‌های آزمایش مینی اسلامپ		مقادیر اکسیدها و فازهای اصلی سیمان در آنالیز شیمی (%)					
			FSI	SI	K ₂ O	SO ₃	C ₃ A	C ₃ S	C ₂ S	C ₄ AF
۱	۱۴	۱۷	۱/۱۱۶	۰/۷۹۷	۰/۶۸	۲/۶۶	۵/۰	۵۰/۹	۲۳/۰	۱۲/۲
۲	۱۳	۲۱	۰/۹۶۷	۰/۸۷۳	۰/۶۷	۲/۶۷	۴/۹	۵۲/۳	۲۳/۸	۱۲/۳
۳	۱۵	۱۷	۱/۰۲۸	۰/۸۴۶	۰/۶۸	۲/۵۵	۵/۱	۵۳/۴	۱۹/۶	۱۲/۲
۴	۱۴	۲۲	۱/۰۴۳	۰/۸۱۴	۰/۶۷	۲/۶۰	۵/۰	۵۲/۵	۲۰/۶	۱۱/۷
۵	۱۵	۲۳	۱/۰۱۰	۰/۸۶۴	۰/۶۴	۲/۶۹	۵/۳	۵۱/۸	۲۱/۸	۱۱/۶
۶	۱۵	۲۴	۰/۹۶۶	۰/۸۶۵	۰/۶۸	۲/۷۳	۵/۱	۵۲/۹	۱۹/۷	۱۲/۰
۷	۱۵	۲۴	۰/۹۶۴	۰/۹۲۴	۰/۶۷	۲/۵۸	۵/۳	۵۳/۳	۱۹/۷	۱۱/۶
۸	۱۵	۲۰	۰/۹۶۸	۰/۸۵۹	۰/۶۵	۲/۵۶	۵/۱	۵۴/۲	۱۸/۶	۱۱/۷
۹	۱۵	۱۹	۱/۰۱۸	۰/۹۱۹	۰/۶۶	۲/۶۲	۵/۰	۵۳/۷	۱۹/۷	۱۲/۰
۱۰	۱۵	۲۳	۱/۰۲۸	۰/۸۳۴	۰/۶۷	۲/۶۳	۵/۲	۵۲/۱	۲۲/۰	۱۱/۷
۱۱	۱۵	۲۲	۱/۰۴۹	۰/۶۶۶	۰/۶۸	۲/۴۸	۵/۱	۵۴/۷	۱۸/۹	۱۱/۸
۱۲	۱۳	۱۵	۱/۱۰۳	۰/۷۳۴	۰/۶۹	۲/۶۶	۵/۶	۵۴/۰	۱۸/۹	۱۱/۷
۱۳	۱۳	۱۹	۱/۱۰۶	۰/۷۷۶	۰/۶۵	۲/۶۳	۵/۷	۴۹/۹	۲۳/۲	۱۱/۲

بودن مقدار افزودنی مصرفی) و در نتیجه مقدار جریان‌یافتگی ملات استاندارد متنوع بود (بازه نتایج ۲۴-۱۵ سانتی‌متر). جدول ۴ نتایج آزمایش‌های مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی را نشان می‌دهد.

نتایج آزمایش میز جریان حاکی از نزدیک بودن نسبی نتایج سیمان‌های مختلف (بازه نتایج ۱۵-۱۳ سانتی‌متر) بود، اما در نمونه‌های حاوی افزودنی، رئولوژی و عملکرد افزودنی بر سیمان (علیرغم ثابت

جدول ۴- خلاصه نتایج آزمایش‌های مخلوط‌های بتن آزمایشگاهی

شماره	مشخصات بتن تازه		مقاومت فشاری بتن (کیلوگرم بر سانتی‌متر مربع)	
	اسلامپ (سانتی‌متر)	اسلامپ ۳۰ دقیقه (سانتی‌متر)	۲۸ روزه	۷ روزه
۱	۸/۵	۴/۰	۳۲۲	۲۴۲
۲	۸/۰	۵/۵	۳۰۱	۲۰۴
۳	۸/۰	۵/۰	۳۲۱	۲۴۸
۴	۸/۵	۴/۵	۳۴۱	۲۱۳
۵	۸/۰	۵/۰	۳۲۷	۲۲۹
۶	۸/۰	۵/۰	۳۲۲	۲۲۴
۷	۸/۰	۵/۵	۳۲۴	۲۲۴
۸	۸/۰	۵/۰	۳۱۴	۲۰۵
۹	۸/۰	۵/۵	۳۱۱	۱۹۰
۱۰	۸/۰	۴/۵	۳۱۲	۲۱۶
۱۱	۸/۵	۳/۰	۳۲۳	۱۹۱
۱۲	۸/۰	۳/۵	۲۸۵	۱۹۰
۱۳	۸/۰	۳/۵	۲۹۳	۱۹۰



شکل ۶- بررسی نتایج آزمایش‌های مینی اسلامپ (FSI) افت اسلامپ، قوام استاندارد و w/c در سیمان‌های مختلف

شاخص FSI با بلین (نرمی) و مقدار C_3A سیمان رابطه مستقیمی داشت، یعنی با افزایش مقدار نرمی (بلین) یا فاز C_3A سیمان، مقدار شاخص گیرش کاذب افزایش نشان داد که نامطلوب می‌باشد (نمودار شکل ۷). البته افزایش مقدار بلین سیمان موجب کاهش مقدار نتیجه آزمایش میز جریان شد که مبین کاهش روانی و یا افزایش آبخواهی در سیمان است.

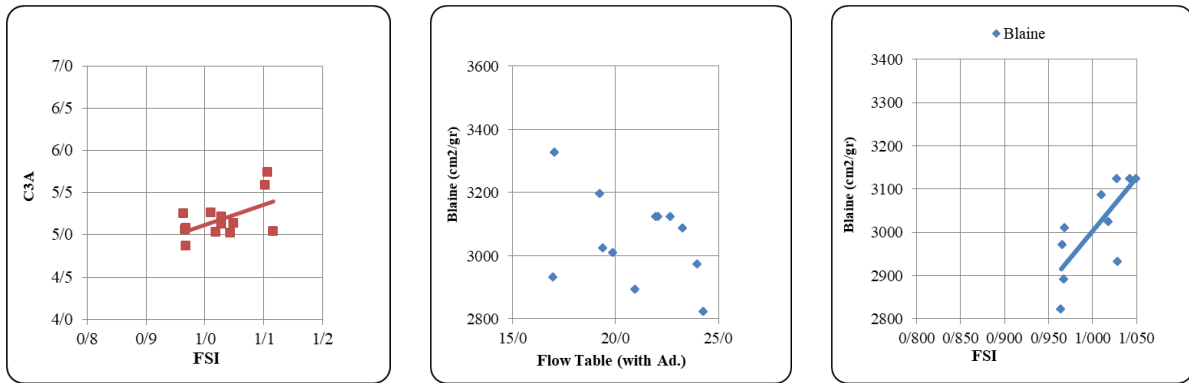
می‌دانیم که شاخص گیرش کاذب در آزمایش مینی اسلامپ از طریق رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$FSI =$ مساحت پات در ۵ دقیقه تقسیم بر مساحت پات در ۲ دقیقه. طبق تعریف هرگاه مقدار FSI از $1/3$ بیشتر شود، یعنی گیرش کاذب وجود دارد (منظور از مساحت پات، سطحی که خمیر سیمان آن را می‌پوشاند). مخلوط کردن سیمان بدون افزودن آب موجب می‌شود که حالت خمیری گیرش کاذب سیمان رفع گردد و معمولاً بدون افت در مقاومت فشاری آن، گیرش ادامه می‌یابد؛ اما معمولاً مشکلاتی در اجرا و بتن‌ریزی ایجاد می‌نماید.

شاخص سختی (SI) نیز در آزمایش مینی اسلامپ از رابطه زیر محاسبه می‌گردد:

$SI =$ مساحت پات در ۳۰ دقیقه تقسیم بر مساحت پات در ۵ دقیقه. هرگاه مقدار SI از $0/85$ کمتر شود، یعنی خمیر سیمان با سرعت غیرقابل قبولی سخت می‌شود. به نظر می‌رسد شاخص سختی ارتباط معقولی با روند افت اسلامپ بتن داشته باشد. افت اسلامپ بتن یکی از مشکلات رایج در تولید بتن است. معمولاً با توجه به فاصله زیاد محل تولید بتن و مصرف آن، اسلامپ تن کاهش می‌یابد و مشکلاتی به بار می‌آورد که مهمترین آن اضافه نمودن آب به بتن است.

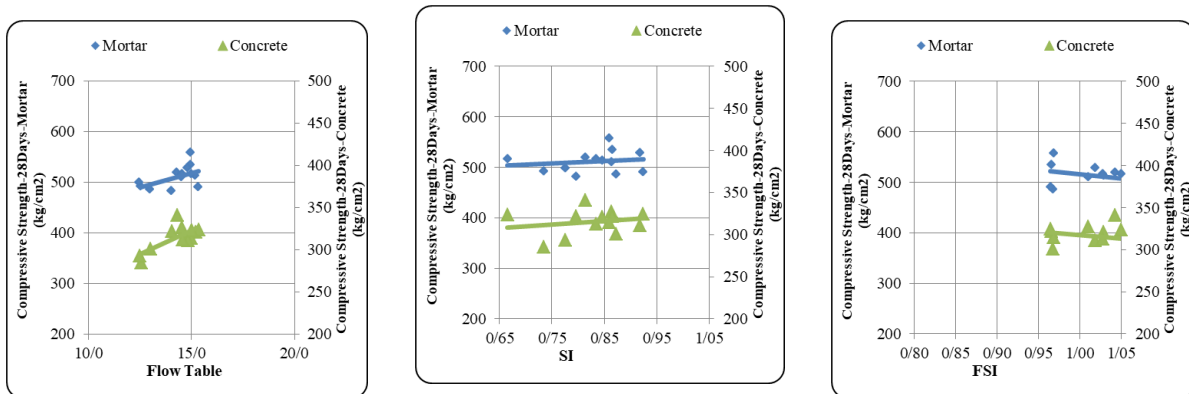
جهت بررسی نتایج حاصله، نمودارهای شکل ۶ ترسیم گردید که به وضوح ارتباط معکوس شاخص FSI در آزمایش مینی اسلامپ و آزمایش افت اسلامپ (درصد اختلاف نتایج اسلامپ پس از ۰ و ۳۰ دقیقه) دیده می‌شود.



شکل ۷- بررسی نتایج آزمایش‌های مینی اسلامپ (FSI) افت اسلامپ، قوام استاندارد و W/C در سیمان‌های مختلف

بررسی نتایج آزمایش‌های میز جریان، مینی اسلامپ، بلین و مقدار C₃A در سیمان‌های مختلف بررسی نتایج این آزمایش‌ها نشان دادند که مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد و بتن با نتایج آزمایش میز جریان رابطه مستقیم و واضحی دارد که بیانگر اهمیت بررسی این شاخص می‌باشد (شکل ۸).

شاخص FSI با بلین (نرمی) و مقدار C₃A سیمان رابطه مستقیمی داشت، یعنی با افزایش مقدار نرمی (بلین) یا فاز C₃A سیمان، مقدار شاخص گیرش کاذب افزایش نشان داد که نامطلوب می‌باشد (نمودار شکل ۷). البته افزایش مقدار بلین سیمان موجب کاهش مقدار نتیجه آزمایش میز جریان شد که مبین کاهش روانی و یا افزایش آبخواهی در سیمان است.



شکل ۸- بررسی نتایج آزمایش‌های میز جریان، مینی اسلامپ، بلین و مقدار C₃A در سیمان‌های مختلف

۵. نتیجه‌گیری

۱) مهمترین عوامل آبخواهی در بتن تشریح شدند که شامل کارائی و اسلامپ، نسبت W/C، عیار سیمان، مقدار و خصیصه‌های مواد افزودنی، مواد سیمانی کمکی، دمای محیط و مواد، دانه‌بندی، شکل، حداکثر اندازه، تمیزی، تخلخل، جنس و درصد شکستگی سنگدانه‌های بتن، نوع سیمان، غلظت نرمال، مقادیر فازهای C₃S و C₃A، مقادیر سولفات، قلیائی‌ها، آهک آزاد، مواد افزودنی، مصرف مواد کمک ساینده در آسیای سیمان، شرایط پخت کلینکر و میکروساختار آن، نرمی و دانه‌بندی سیمان می‌باشند؛

- ۲) نتایج نشان می‌دهند که افزایش مقدار نرمی و فاز C_3A سیمان موجب افزایش مقدار شاخص گیرش کاذب (FSI) می‌شود که نامطلوب است؛
- ۳) ارتباط معکوس شاخص FSI و آزمایش افت اسلامپ دیده می‌شود؛
- ۴) نتایج آزمایش میز جریان نسبت به مقاومت ۲۸ روزه ملات استاندارد و بتن رابطه مستقیمی نشان داد؛
- ۵) بررسی رئولوژی خمیر سیمان و ملات استاندارد به کمک آزمایش‌های مینی اسلامپ و میز جریان شناخت مناسبی جهت عملکرد آن در بتن ارائه می‌دهد.

۶. قدردانی

بر خود لازم می‌دانم تشکر و قدردانی ویژه‌ای از مدیران، کارشناسان و تکنسین‌های محترم آزمایشگاه‌های مجتمع صنعتی سیمان تهران و سایر پرسنل زحمتکش آن مجتمع داشته باشم.

۷. منابع

- [1] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete Properties". Prentice Hall.
- [۲] عزیزیان (۱۳۷۰)، "شیمی و فیزیک سیمان" انتشارات آشنا.
- [3] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete technology". Prentice Hall.
- [4] ACI 211.1 (2011). "Standard Practice for Selecting Proportions for Normal, Heavyweight, and Mass Concrete".
- [۵] "طرح ملی مخلوط بتن"، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی (۱۳۸۸).
- [6] BRE (Building Research Establishment) (Secend edition-1988), "Design of normal concrete mixes". P13.
- [7] la,nos Elemer UJHELYI (1997) "WATER DEMAND OF CONCRETE MIXTURES". PERIODICA POLYTECHNICA SER. CIVIL ENG. VOL. 41, NO. 2, PP. 199-225 (1997).
- [8] Mehta, K.& Menterio, (2006). "Concrete Microstructure, Properties, and Materials
- [9] Rajib (2020). "What is Water Demand of Ready Mix Concrete". From: www.civil-engg-world.com
- [۱۰] معماریان، ح. "زمین شناسی مهندسی و ژئوتکنیک" انتشارات دانشگاه تهران.
- [11] -Jacek Kubissaa, Marcin Kopera, Włodzimierz Kopera, Wojciech Kubissaa, Artur Kopera (2015). "Water Demand of Concrete Recycled Aggregates". Procedia Engineering 108 (2015) 63-71.
- [12] BS812 p 118 "Methods for determination of sulphate content"
- [13] BS812 p 117 "Method for determination of water-soluble chloride salts"
- [14] Redy mixed British.
- [15] Neville AM, Brooks JJ (2002). "Concrete Properties". Prentice Hall.
- [۱۶] کفاش، ع. سعیدی، م. "بررسی توانان تغییرات نرمی سیمان در ملات و بتن" کنفرانس بین‌المللی سالانه تحقیقات در مهندسی عمران، معماری و شهرسازی و محیط زیست پایدار، تهران، ۲۴ آذر ۹۴، ص ۱۲.
- [۱۷] کفاش بازاری، ع. (۱۳۹۷) "بررسی موردی ارتباط مقاومت میان مدت و درازمدت بتن جهت کمک به استحکام ساختمان‌ها". دهمین کنفرانس ملی بتن، مرکز تحقیقات راه، مسکن و شهرسازی، تهران.

[18] Hodrbanck. "cement seminar-material technology".

[19] GCP Applied Technologies (2021) "Cement PSD and Water Demand". www.gcpat.vn.com

[۲۰] ویژگیهای سیمان پرتلند - ISIRI 389 ، موسسه استاندارد و تحقیقات صنعتی ایران

[21] Bo Jonsson, A. nonat, C. Labbez, B. Cabane, H. Wennerstrom (July 2005). "Controlling the Cohesion of cement paste" Theoretical Chemistry, Chemical center, Sweden.

[22] Duda, W. (1977) "cement data book".

[23] Noel P. Mailvaganam, M.R. Rixom, Daniel P. Manson, Carol Gonzales. (1999). "Chemical Admixtures for Concrete"

[24] Campbell, D. (1999). "Microscopical Examination and Interpretation of Portland Cement and Clinker". PCA SP030. ISBN-0-89312-084-7

[۲۵] کفاش بازاری، ع. ربیعی، م. (۱۳۹۴) بررسی ارتباط مقاومت سیمان تهران در ملات و بتن". هفتمین کنفرانس سالیانه بتن ایران-تهران- ۱۵مهرماه ۱۳۹۴.

[26] Todd Hanson. (November 2000). "Evaluation of the Mini Slump Cone Test". Iowa Department of Transportation Ames, Iowa 50010. MLR-97-1.

[27] ASTM C 230 (2008). "Standard Specification for Flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement".

[28] Newman, J. Choo, B(2003) "Advance concrete Technology set". ELSILVER, p1/9.

[29] N. Roussel*, C. Stefani, R. Leroy. "From mini-cone test to Abrams cone test: measurement of cement-based materials yield stress using slump tests". Elsevier, Cement and Concrete Research 35 (2005) 817– 822.

[30] D.D. Cortes a, H.-K. Kim b, A.M. Palomino c, J.C. Santamarina. "Rheological and mechanical properties of mortars prepared with natural and manufactured sands". Elsevier, Cement and Concrete Research 38 (2008) 1142–1147.

[31] Adrien Bouvet & Elhem Ghorbel & Rachid Bennacer (2010) "The mini-conical slump flow test: Analysis and numerical study" Cement and Concrete Research, Volume 40, Issue 10, October 2010, Pages 1517-1523

[32] Parth Thaker & N K Arora. (December, 2015) "SELECTION OF TEST METHOD TO QUANTIFY WORKABILITY OF CEMENT PASTE AND MORTAR FOR VERY LOW WORKABLE TO HIGH WORKABLE". International Journal of Engineering Sciences & Research Technology (854). ISSN: 2277-9655.(I2OR).

[33] Myoung Sung Choi & Jung Soo Lee & Keum Seong Ryu & Kyung Taek Koh & Seung Hee Kwon (2016). "Estimation of rheological properties of UHPC using mini slump test". Construction and Building Materials, Volume 106, 1 March 2016, Pages 632-639.

[34] Zhijun Tan . Susan A. Bernal . John L. Provis. "Reproducible mini-slump test procedure for measuring the yield stress of cementitious pastes". Materials and Structures (2017) 50: pages 235.

[35] Ali Mardani-Aghabaglou & Hasan Tahsin Öztürk & Murat Kankal & Kambiz Ramyar (2021). "Assessment and prediction of cement paste flow behavior; Marsh-funnel flow time and mini-slump values". Construction and Building Materials, Volume 301, 27 September 2021, 124072.

[36] Xiuhao Li & Rentai Liu & Shuca Li & Chunyu Zhang & Jinglong Li & Bingchuan Cheng & Yankai Liu & Chheyang Ma & Jia Yan (2022). "Effect of SBR and XSBRL on water demand, mechanical strength and microstructure of cement paste". Construction and Building Materials, Volume 332, 16 May 2022, 127309.

- [۳۷] سریزدی، م. فامیلی، ه. پرهیزگار، ط. رئیس قاسمی، ا. (۱۳۸۸). "بررسی تاثیر مواد افزودنی معدنی و شیمیائی درلرژت و روانی خمیر با استفاده از آزمایش کیف جریان استوانه ای (مدل اصلاح شده کیف مارش) و جریان مینی اسلامپ".
- [۳۸] محبی، علیرضا و ماهوتیان، مهرداد و عزیز محمدی، پروین، (۱۳۸۸). "رفتارشناسی خمیر سیمان بتن خودتراکم در برابر تغییر مواد افزودنی معدنی". هشتمین کنگره بین المللی مهندسی عمران، شیراز
- [۳۹] رستمی درونکلا، محمد رضا (۱۳۹۶). "کنترل رئولوژی بتن های خودتراکم با ابرروان کننده های پلی کربوکسیلات اتر". پنجمین کنفرانس ملی بتن خودتراکم ایران و اولین کنفرانس ملی تعمیر و نگهداری سازه های بتنی، تهران.
- [۴۰] کفاش بازاری علی اکبر؛ وطنی محمد (۱۳۹۷). "بررسی تاثیر میزان آب مورد نیاز برای ایجاد کارایی در خمیر سیمان، ملات و بتن". چهارمین کنفرانس ملی صنعت سیمان و افق پیش رو

- [41] Peter Claisse & J P Lorimer & M H Omari (2001). "Workability of cement pastes". November 2001, *ACI Materials Journal* 98(6)
- [42] Zonglin Xie & Yuxuan Li & Yuxuan Li & Jinyuan Hu & Garba Mustapha Jamaa & Qiang Yuan & Xiaohong Zhu (2023). "Corrigendum to Understanding the temperature-dependent workability of cement paste with polycarboxylate superplasticizer". *Journal of Building Engineering*, Volume 78,1 November 2023, 107537.
- [43] INSO 18807-6 (2013). "Methods of testing Cement - Part 6: Determination of fineness" Institute of Standards and Industrial Research.
- [44] INSO 390 (2009). "Cement- Determination of the fineness of hydraulic cement by air-permeability apparatus-Test methods" Institute of Standards and Industrial Research.
- [45] INSO 18807-3 (2013). "Methods of testing cement - Part 3: Determination of setting times and soundness (expansion) by Le Chatelier method" Institute of Standards and Industrial Research.
- [46] INSO 392 (2021). "Cement — Determination the time of setting of hydraulic cement by Vicat needle-Test method" Institute of Standards and Industrial Research.
- [47] INSO 11895 (2009). "Cement- Determination of the normal consistency of hydraulic cement - Test Method" Institute of Standards and Industrial Research.
- [48] INSO 18807-1 (2013). "Methods of testing cement - Part 1: Determination of strength" Institute of Standards and Industrial Research.