

کاربرد پردازش تصویر در اندازه‌گیری جابه‌جایی، کرنش و عرض ترک اعضای بتنی در آزمایشگاه سازه



محمدرضا توکلی‌زاده
استادیار گروه مهندسی عمران
دانشگاه فردوسی مشهد



بهزاد عطاری
دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران
دانشگاه فردوسی مشهد

چکیده

تجهیزات مکانیکی متداول اندازه‌گیری جابه‌جایی و کرنش، مانند کرنش‌سنج‌ها و جابه‌جایی‌سنج‌های خطی (LVDT) که معمولاً به صورت تماسی به نمونه متصل می‌شوند، علیرغم داشتن دقت قابل قبول، دارای محدودیت‌هایی از قبیل، هزینه‌های بالای تجهیزات، پیچیدگی و زمان‌بر بودن نصب و همچنین عدم امکان دستیابی به کل میدان جابه‌جایی و کرنش در نمونه‌ها می‌باشند. این محدودیت‌ها باعث شده تا توجه پژوهشگران به روش‌های غیر تماسی، مانند روش‌های برپایه پردازش تصویر جلب شود. سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV) یکی از روش‌های مبنی بر پردازش تصویر است که نسبت به سایر روش‌های مبنی بر پردازش تصویر از دقت بالاتری برخوردار است. در پژوهش پیش رو، ضمن معرفی روش PIV و کاربردهای آن در زمینه آزمایش‌های مهندسی سازه، به ارزیابی دقت این روش در زمینه محاسبه میدان جابه‌جایی ورق FRP چسبانده شده به سطح بتنی پرداخته شده است. به این منظور، تعدادی نمونه ساخته شد و تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفت و منحنی بار-جابه‌جایی نمونه‌ها با استفاده از LVDT و تحلیل PIV به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد. بر اساس نتایج این پژوهش، روش PIV می‌تواند یک روش دقیق و کم هزینه برای اندازه‌گیری جابه‌جایی و کرنش در آزمایش‌های مهندسی سازه باشد.

کلمات کلیدی: پردازش تصویر، سرعت‌سنجی تصویری ذرات (PIV)، کرنش و جابه‌جایی، انتشار ترک، FRP

مقدمه

امروزه علیرغم استفاده گسترده از تجهیزات متداول اندازه‌گیری جابه‌جایی و کرنش، مانند جابه‌جایی‌سنج‌های

خطی^۱ (LVDT) و کرنش‌سنج‌های مکانیکی و الکتریکی، وجود محدودیت‌هایی از قبیل هزینه بالا، عدم امکان استفاده در تمام شرایط محیطی، نصب تجهیزات به صورت

^۱ Linear Variable Differential Transformer

تماسی، زمان بر بودن نصب تجهیزات و همچنین عدم امکان دستیابی به کل میدان جابه‌جایی و کرنش عضو مورد نظر، از جمله مشکلات پیش روی پژوهشگران می‌باشند [۱]. مشکلات فوق الذکر و لزوم اندازه‌گیری تغییر شکل‌ها و کرنش‌ها در اکثر آزمایش‌های مهندسی عمران، موجب شد تا پژوهشگران به دنبال روش‌های نوین اندازه‌گیری تغییر شکل باشند. در میان روش‌های نوین اندازه‌گیری تغییر شکل غیر متصل همچون اشعه ایکس و اسکن حرارتی و لیزر اسکن ویبرومتری، روش‌های نوین بر پایه پردازش تصویر همچون روش فوتوگرامتری^۲، همبستگی تصاویر دیجیتال (DIC^۳) و سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV^۴) در پژوهش‌های آزمایشگاهی به‌طور گسترده‌ای مورد استفاده قرار گرفته است.

فوتوگرامتری دانش و فناوری استخراج اطلاعات مربوط به تغییرات مختصات هندسی اجسام، با استفاده از تصاویر گرفته‌شده و پردازش و تحلیل آن‌ها است [۲]. از جمله کاربردهای فوتوگرامتری در مهندسی عمران، اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی و نظارت بر روند رشد ترک در اعضای بتنی مسلح در طول فرآیند آزمایش می‌باشد. آدرین و الماهیدی در یک پژوهش، با استفاده از کنترل روند رشد ترک تیر بتنی تقویت شده با CFRP توسط فوتوگرامتری، رفتار برشی و خمشی آن را مورد بررسی قرار دادند [۳]. با وجود مزایای فوتوگرامتری، می‌توان به برخی از معایب این تکنیک از قبیل زمان بر بودن آماده‌سازی نمونه‌ها و نیاز به استفاده از چند دوربین و توقف بارگزاری در چند مرحله برای محاسبه کل میدان جابه‌جایی نمونه اشاره کرد [۳].

DIC، یکی دیگر از روش‌های اندازه‌گیری جابه‌جایی بر پایه پردازش تصویر است که تاکنون پژوهشگران بسیاری از این روش در زمینه‌های مختلف پژوهشی همچون تعیین مدول

الاستیسیته بتن، مکانیک شکست، محاسبه کرنش در بتن و همچنین در زمینه بررسی مقاومت پیوستگی FRP به بتن، استفاده شده است [۴]. اگرچه در حال حاضر تکنیک DIC برای اندازه‌گیری میدان جابه‌جایی و میدان کرنش استفاده می‌شود، اما بدست آوردن میدان کرنش دقیق در بعضی موارد می‌تواند چالش برانگیز باشد [۴].

PIV در اصل یک روش اندازه‌گیری سرعت مبتنی بر پردازش تصویر است که در ابتدا در زمینه مکانیک سیالات و برای اندازه‌گیری سرعت جریان ۲ و ۳ بعدی سیالات به کار برده شد [۵]. وایت و همکاران با انجام یک سری اصلاحات در این روش، گامی برای کاربرد PIV در زمینه آزمایش‌های ژئوتکنیک برداشتند [۶]. بر اساس نتایج پژوهش‌های وایت و همکاران، روش PIV اصلاح شده در مقایسه با روش‌های گذشته اندازه‌گیری جابه‌جایی مبتنی بر پردازش تصویر، از دقت بالاتری برخوردار بوده و توانایی پردازش محدوده وسیع‌تری را دارا می‌باشد [۶]. هدف از پژوهش پیش رو، معرفی روش PIV به‌عنوان یک روش نوین غیر تماسی اندازه‌گیری جابه‌جایی و کرنش در آزمایش‌های مهندسی عمران و بررسی عملکرد و دقت آن در آزمایش‌های مهندسی سازه می‌باشد.

پردازش تصویر با استفاده از سرعت سنجی تصویری ذرات (PIV)

در فرآیند PIV، ابتدا از سطح جسم در حال تغییر شکل تصاویر دیجیتال پیاپی گرفته شده و به‌عنوان ورودی به نرم‌افزار داده می‌شود. سپس مطابق شکل ۱ ناحیه‌ی مورد بررسی در نخستین تصویر به تعدادی بخش‌های کوچکتر به صورت یک شبکه تقسیم بندی می‌شود (به هر بخش کوچک وصله^۵ آزمون گفته شده و اندازه آن بر مبنای پیکسل تعیین می‌شود). سپس در تصویر دوم یک وصله با ابعاد بزرگ‌تر به‌عنوان دامنه‌ای که نرم‌افزار در آن جابه‌جایی

^۲ Photogrammetry

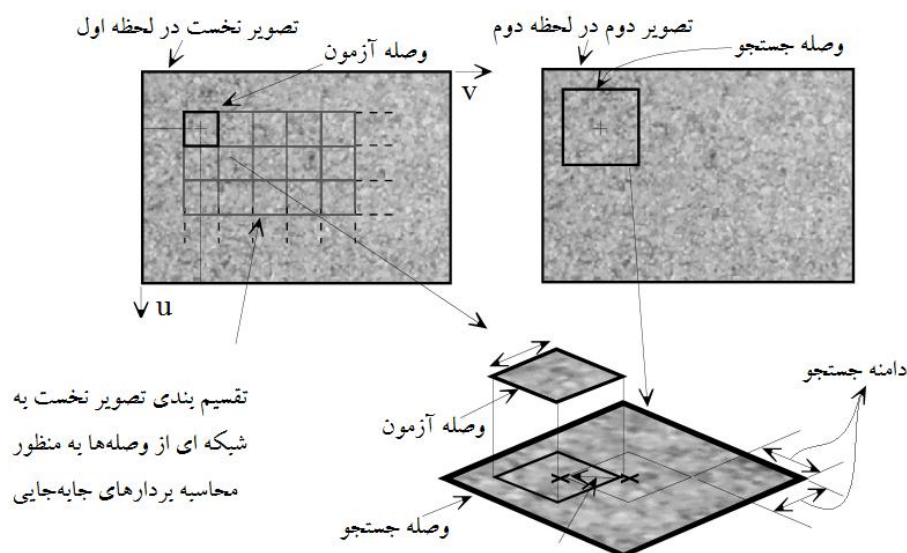
^۳ Digital Image Correlation

^۴ Particle Image Velocimetry

^۵ Patch

ترتیب، فاصله افقی و عمودی بین وصله‌ی آزمون در هر دو تصویر به‌عنوان خروجی برنامه و به شکل یک ماتریس تعیین می‌گردد. با در دست داشتن ماتریس جابه‌جایی، میدان کرنش ناحیه مورد نظر نیز به‌دست می‌آید.

وصله آزمون را ردیابی می‌کند (وصله جستجو)، انتخاب می‌شود. نرم افزار با کمک تابع برازش، محل وصله آزمون را در دو تصویر پیایی ردیابی کرده و وصله‌ای را که دارای بیشترین مقدار تابع برازش است، به‌عنوان مکان جدید وصله‌ی آزمون در تصویر دوم در نظر می‌گیرد. به این



شکل ۱- شبکه بندی تصویر نخست و انتخاب ابعاد وصله‌ها

برخی از زمینه‌های کاربرد PIV در زمینه مهندسی سازه، بررسی روند شکست در نمونه‌های بتنی و پایش ترک خوردگی در اعضای بتنی [۷]، محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش اعضای بتنی [۸] و همچنین، محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق‌های FRP چسبانده شده به بتن می‌باشد [۹]، که در ادامه مورد بررسی قرار گرفته است.

۱.۳. پایش ترک در اعضای بتنی

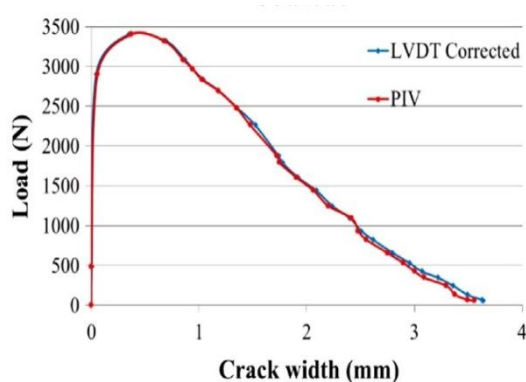
روش‌های تجربی متعددی برای نظارت بر ترک خوردگی در انواع بارگذاری وجود دارد، که معمول ترین آنها استفاده از کرنش سنج‌های الکتریکی و LVDT می‌باشد. استفاده از کرنش سنج‌ها و LVDT در صورتی که با رعایت نکات توصیه شده باشد مؤثر و قابل اطمینان است، اما با این حال می‌توان به محدودیت‌هایی از قبیل: اندازه گیری کرنش و جابه‌جایی تنها در یک نقطه و یک مرتبه، زمان بر بودن نصب سنسورها، پیچیدگی و غیر عملی بودن اتصال

بر اساس پژوهش‌های پیشین، دقت PIV به شدت تابع اندازه وصله‌ها و بافت تصویر می‌باشد [۶]. در کاربرد PIV در آزمایش‌های مکانیک سیالات، برای فراهم کردن بافت قابل تشخیص برای پردازش تصاویر، نیازمند سید بندی شدن سیال با ذرات رنگی (توپ‌های پلی‌استیرین یا پودر رنگی) است، اما در کاربرد PIV در آزمایش‌های ژئوتکنیک ماسه به‌طور طبیعی دارای بافتی با ذرات مختلف رنگ است. در نتیجه، علیرغم سایر روش‌های اندازه‌گیری مبتنی بر پردازش تصویر، در روش PIV در آزمایشات ژئوتکنیکی هیچ نشانگر یا رنگ‌آمیزی تعبیه شده‌ای نیاز نیست.

کاربرد PIV در مهندسی سازه

در سال‌های اخیر، علاوه بر استفاده از PIV در آزمایش‌های مکانیک سیالات و ژئوتکنیک، پژوهشگران از این روش نوین در زمینه آزمایش‌های مهندسی سازه نیز بهره برده‌اند.

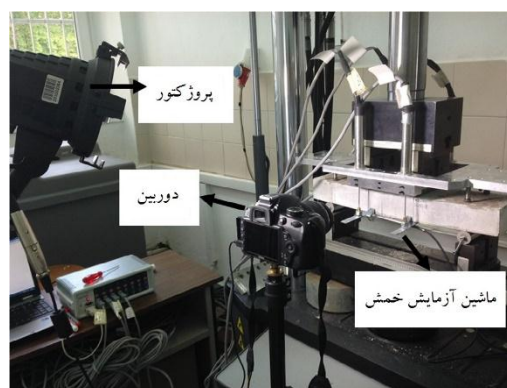
حسینی و همکاران در یک پژوهش تجربی، توانایی و دقت PIV در نظارت بر ترک خوردگی تیر بتنی تحت خمش چهار نقطه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند [۷]. آنها در این پژوهش به منظور ارزیابی دقت روش PIV، عرض ترک‌های خمشی بوجود آمده را با استفاده از LVDT و روش PIV محاسبه کرده، و منحنی بار-عرض ترک به‌دست آمده از دو روش را با یکدیگر مقایسه کردند (شکل ۲).



ب

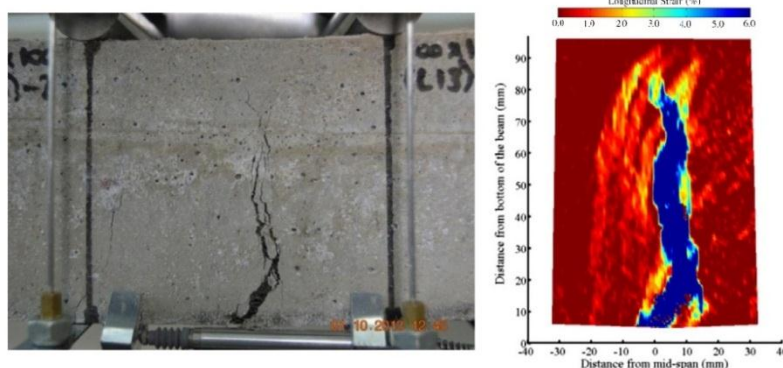
شکل ۲- بررسی ترک خوردگی تیر بتنی در آزمایش خمش، با استفاده از PIV. الف) موقعیت دوربین و پروژکتور. ب) مقایسه نمودار بار-عرض ترک به‌دست آمده از LVDT و تحلیل PIV [۷]

سنسورهای زیاد برای نواحی وسیع، عدم پوشش کل ناحیه مورد نظر به دلیل محدودیت در نصب حسگرها به صورت نزدیک بهم و متراکم، احتمال آسیب دیدگی دستگاه‌های اندازه‌گیری در طول آزمایش، حذف دستگاه‌ها قبل از شکست نمونه برای جلوگیری از آسیب دیدگی تجهیزات و همچنین هزینه‌های بالای دستگاه‌های اندازه‌گیری، اشاره کرد [۷]. وجود این محدودیت‌ها، باعث شد تا محققان به دنبال روش‌های اندازه‌گیری غیر تماسی باشند.



الف

همچنین در این پژوهش با استفاده از تحلیل PIV، فرآیند باز شدن ترک‌ها مورد بررسی قرار گرفت و میدان کرنش ناحیه ترک خورده نمونه‌ها به‌دست آمد (شکل ۳).



شکل ۳- تصویر انتشار ترک در تیر بتنی و میدان کرنش متناظر با آن به‌دست آمده از تحلیل PIV [۷].

پروفیل‌های ترک و توزیع کرنش را بدست آورد. همچنین، با روش PIV می‌توان به میدان کرنش در لحظه حداکثر بار دست یافت و به این ترتیب، اطلاعات مهم تمام نقاط دلخواه منطقه ترک را در اختیار داشت.

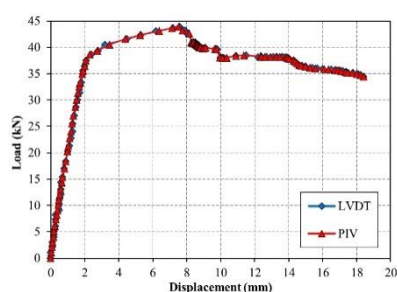
در پایان، بر اساس نتایج این پژوهش نتایج زیر حاصل شد [۷]:
 • PIV یک روش قدرتمند برای اندازه‌گیری شروع و انتشار ترک‌ها است. با استفاده از نتایج تحلیل PIV، می‌تواند اطلاعات دقیقی در مورد رفتار مکانیکی مواد، مانند

• شروع و انتشار ترک‌هایی که با چشم غیر مسلح قابل کنترل نیستند، می‌تواند به راحتی با استفاده از PIV کنترل شود. از این اطلاعات می‌توان به‌طور موثری برای تحلیل‌های مکانیکی که نیازمند دانستن اطلاعات دقیقی همچون مقدار بار در زمان ایجاد اولین ترک و تعداد ترک است، استفاده شود.

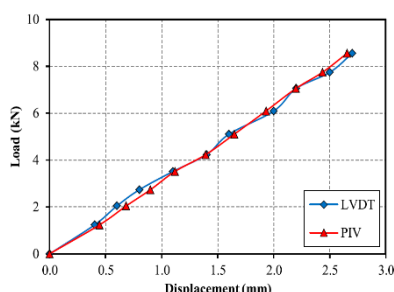
• منحنی بار-عرض ترک و همچنین میدان کرنش در تیر بتنی تحت خمش، می‌تواند با استفاده از روش غیر تماسی PIV به‌دست آید. در نتیجه، این روش می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین برای روش‌های اندازه‌گیری معمول بررسی رفتار ترک، در آزمایش‌های خمشی مورد توجه قرار گیرد.

۲.۳. اندازه‌گیری تغییر شکل و کرنش در تیرهای فولادی و بتنی

یکی دیگر از کاربردهای PIV در زمینه مهندسی سازه، اندازه‌گیری تغییر شکل و کرنش اعضای فولادی و بتنی است، که تا کنون چندین پژوهش در این زمینه انجام گرفته است. مستوفی‌نژاد و همکاران در یک پژوهش تجربی، توانایی و دقت PIV در زمینه اندازه‌گیری خیز وسط تیرهای بتنی و فولادی تحت خمش چهار نقطه‌ای را مورد ارزیابی قرار دادند [۸]. در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی دقت PIV در محاسبه خیز وسط دهانه تیر، مقدار خیز با استفاده از یک LVDT نیز اندازه‌گیری شد و نتایج این دو روش با یکدیگر مقایسه گردید. در شکل ۴، نمودار بار-جاب‌جایی وسط دهانه تیر بتنی و فولادی به‌دست آمده از LVDT و تحلیل PIV قابل مشاهده است. در این پژوهش، میدان کرنش ناحیه وسط دهانه تیر فولادی تحت خمش نیز محاسبه شده است، که در شکل ۵، ارایه شده است.



ج

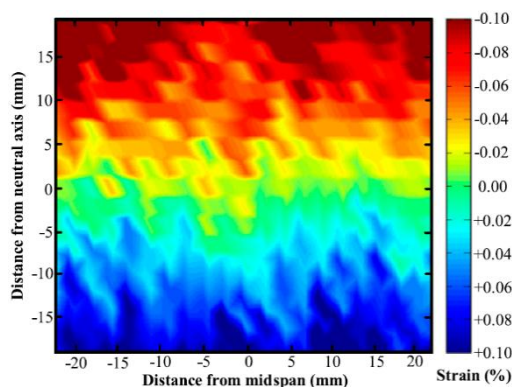


ب

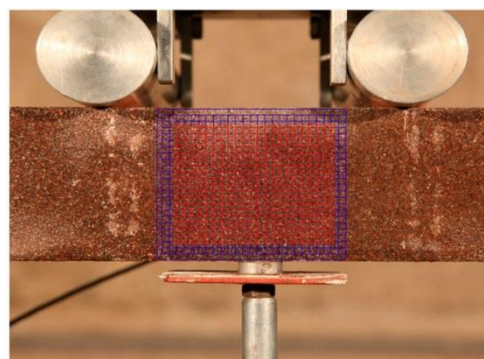


الف

شکل ۴- محاسبه و مقایسه منحنی بار-جاب‌جایی وسط دهانه تیر فولادی و بتنی تحت خمش به‌دست آمده از LVDT و تحلیل PIV. (الف) تصویر آزمایش خمش و موقعیت تجهیزات. (ب) منحنی بار-جاب‌جایی تیر فولادی. (ج) منحنی بار-جاب‌جایی تیر بتنی [۸].



ب



الف

شکل ۵- میدان کرنش وسط دهانه تیر فولادی تحت خمش. (الف) شبکه بندی ناحیه مورد نظر به وصله‌ها. (ب) میدان کرنش ناحیه موردنظر [۸].

نتایج به دست آمده از این پژوهش در رابطه با درستی نتایج تحلیل PIV این پژوهش، نتیجه‌گیری‌های زیر انجام گرفت [۸]:

- مقدار جابه‌جایی به‌دست آمده از روش PIV دقیقاً با نتایج LVDT مطابقت دارد. از این رو، می‌توان به راحتی با استفاده از روش PIV، منحنی بار-جابه‌جایی تیرهای فولادی و بتن مسلح تحت بارگذاری خمشی را ترسیم کرد.

- کل میدان جابه‌جایی برای نمونه‌های فولادی و بتن مسلح می‌تواند با استفاده از روش PIV به‌دست آید. با داشتن میدان جابه‌جایی، تانسور کرنش نیز می‌تواند با یک فرآیند ساده محاسبه شود.

- از آنجایی که بتن یک ماده‌ی بسیار ناهمگن است، با استفاده از ابزارهای مکانیکی معمول نمی‌توان کرنش‌های دقیق را در حالت ناحیه فرآوری شکست (FPZ) پیش‌بینی یا اندازه‌گیری کرد. با این حال، این ویژگی‌ها به راحتی با استفاده از تکنیک PIV به‌دست می‌آیند.

- تکنیک PIV می‌تواند به دلیل هزینه‌های پایین و توانایی و دقت بالا در ارزیابی میدان جابه‌جایی و کرنش، به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان جایگزین روش‌های اندازه‌گیری معمول، به ویژه در آزمایش‌های خمشی، استفاده شود.

۳.۳. محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP

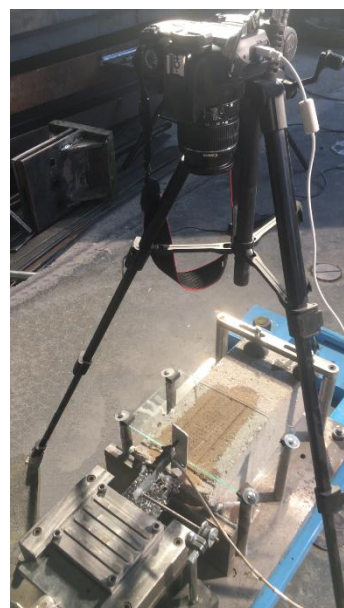
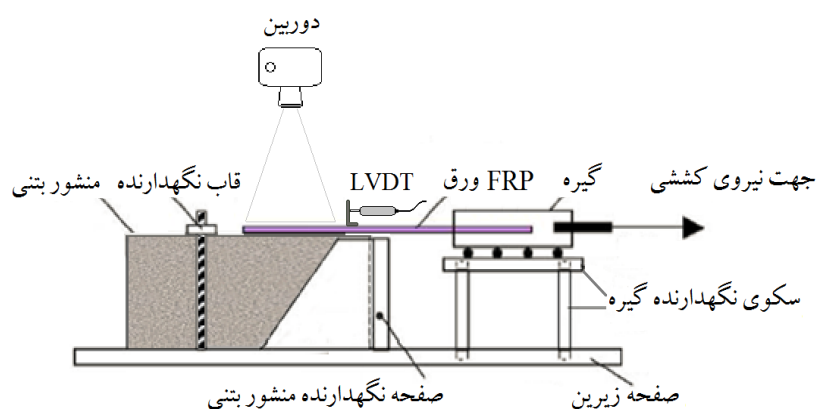
تا کنون پژوهش‌های بسیاری در زمینه محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق‌های FRP چسبانده شده به بتن صورت گرفته است. حسینی و همکاران، به‌منظور ارزیابی طول موثر پیوستگی ورق FRP و بتن در آزمایش برش مستقیم، از روش PIV برای محاسبه میدان کرنش ورق FRP استفاده کردند [۱۰]. همچنین در پژوهشی دیگر عطاری و توکلی‌زاده از روش PIV برای ارزیابی طول موثر ورق FRP و بتن تقویت شده به روش کاشت الیاف، استفاده کردند [۹].

در ادامه نتایج آزمایشگاهی مربوط به این پژوهش در زمینه ارزیابی دقت روش PIV در محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP چسبانده شده به بتن ارایه می‌شود.

۳.۳.۱. مشخصات نمونه‌ها و روش انجام آزمایش

در این پژوهش، به‌منظور ارزیابی دقت روش PIV در محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP متصل شده به بتن به روش نصب خارجی EBR، تعداد شش نمونه منشور بتنی در ابعاد $150\text{ mm} \times 150\text{ mm} \times 350\text{ mm}$ برای آزمایش برش مستقیم ساخته شد. برای ساخت نمونه‌ها، ابتدا سطح بتن نمونه‌ها آماده‌سازی سطحی شد و بعد از تمیز کردن سطح بتن توسط جریان هوا، یک لایه پارچه کربنی تک جهته با عرض 50 mm و طول 150 mm به روش نصب تر و با استفاده از رزین اپوکسی دو جزئی بر روی سطح بتن قرار داده شد. همچنین به‌منظور انجام آزمایش برش مستقیم، دستگاهی مطابق شکل ۶ ساخته شد. همان‌طور که در نیمرخ ترسیم شده دستگاه در شکل ۶-ب مشاهده می‌شود، پس از قرارگیری نمونه‌ها در قاب نگهدارنده دستگاه، یک جک هیدرولیکی با ظرفیت 300 kN به‌وسیله گیره مخصوص نیروی کششی را بصورت یکنواخت و با نرخ بارگذاری ثابت تا لحظه شکست به ورق FRP وارد می‌کند.

مطابق شکل ۶-الف در حین بارگذاری، با استفاده از یک دوربین Canon-EOS-1300D با تفکیک پذیری $18/0$ مگاپیکسل (5184×3456 پیکسل) و مجهز به لنز Canon 55-18، از سطح بالای نمونه‌ها تصویربرداری دیجیتالی انجام شد و به‌منظور حذف بازتاب نورهای نامناسب، از دو منبع نور مشابه با زاویه 45° در دو طرف نمونه استفاده شد. همچنین به منظور ارزیابی دقت روش PIV در اندازه‌گیری جابه‌جایی ورق FRP، از یک LVDT با دامنه جابه‌جایی 5 mm در ابتدای ناحیه چسبانده شده ورق FRP به بتن استفاده شد (شکل ۶-الف).



الف

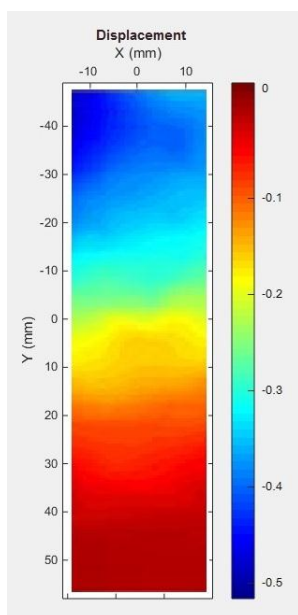
ب

شکل ۶- دستگاه برش مستقیم ساخته شده در آزمایشگاه دینامیک سازه دانشگاه فردوسی مشهد. الف) تصویر دستگاه. ب) نیمرخ دستگاه.

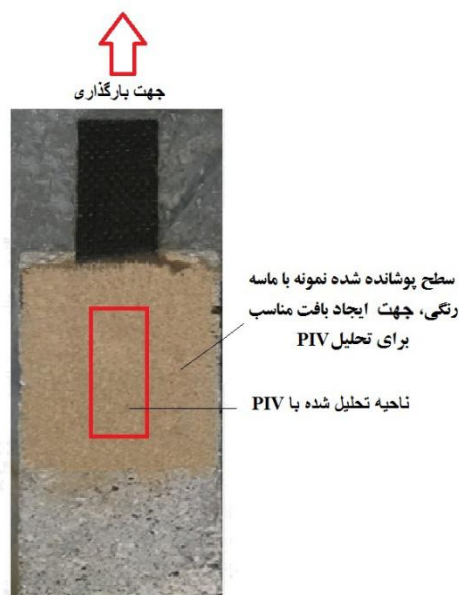
۳.۳.۲. میدان جابه‌جایی

در این پژوهش، از آنجایی که ورق CFRP دارای بافت مناسب قابل تشخیص برای نرم افزار نمی‌باشد، مطابق شکل ۷-الف، برای ایجاد بافت مناسب پس از چسباندن ورق FRP بر روی سطح بتن و قبل از گیرش رزین اپوکسی، روی سطح نمونه‌ها با استفاده از ترکیب چند نوع ماسه با رنگ‌های مختلف به‌طور کامل پوشانده شد. وصله‌های مورد

استفاده نیز در ابعاد 128×128 پیکسل و به فاصله ۳۲ پیکسل از همدیگر (مرکز به مرکز) انتخاب شدند. همچنین پردازش تصاویر با استفاده از برنامه geoPIV_RG توسعه یافته در دانشگاه کمبریج [۶] و در فضای نرم افزار MATLAB صورت گرفت. در شکل ۷-ب، میدان جابه‌جایی ناحیه متصل شده FRP به بتن به‌دست آمده از تحلیل PIV ارائه شده است.



ب



الف

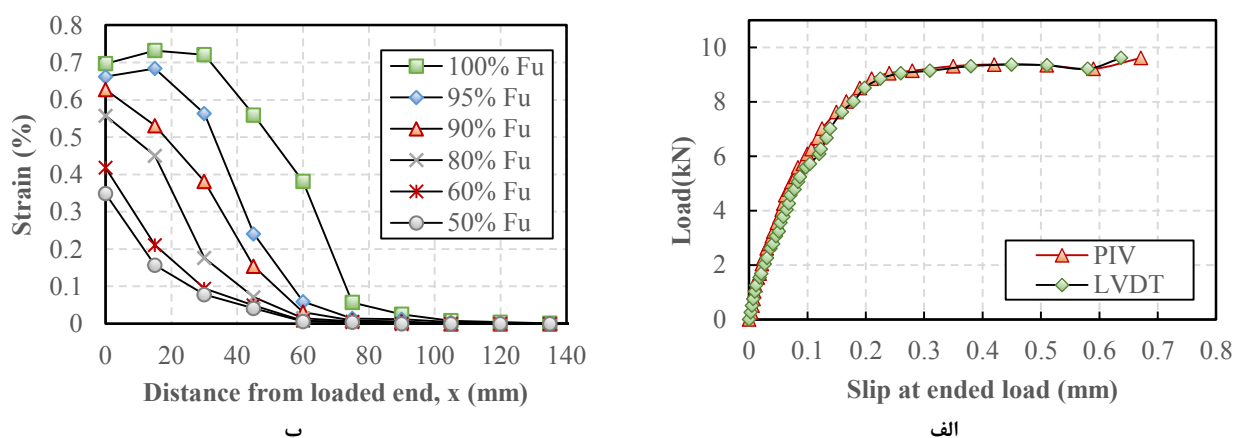
شکل ۷- محاسبه میدان جابه‌جایی با استفاده از تحلیل PIV. الف) تصویر نمونه و ناحیه تحلیل شده با PIV. ب) میدان جابه‌جایی نمونه B-1.

بر اساس نتایج به دست آمده از میدان جابه‌جایی نمونه‌ها، بیشترین اختلاف جابه‌جایی (در محل اتصال LVDT به ورق FRP) بین دو مقدار به دست آمده از LVDT و تحلیل PIV، بسیار ناچیز و در حدود ۵٪ بود. لازم به ذکر است، برای محاسبه جابه‌جایی در روش PIV، میانگین جابه‌جایی پنج نقطه‌ای واقع در عرض ورق FRP و با ۸ mm فاصله تا LVDT (بخاطر فضای گرفته شده توسط پایه LVDT) اندازه‌گیری شد.

۳.۳.۳. منحنی بار-جابه‌جایی و نیمرخ کرنش طولی

در شکل ۸-الف، منحنی بار-جابه‌جایی به دست آمده از نتایج تحلیل PIV و LVDT ارائه شده است. برای ترسیم این نمودار، مقدار جابه‌جایی نقطه‌ای واقع بر روی ورق FRP و در ابتدای ناحیه متصل شده به بتن و در سمت بارگذاری شده اندازه‌گیری شد. با مقایسه منحنی‌های به دست آمده از LVDT و تحلیل PIV، می‌توان هم‌پوشانی خوبی را بین نتایج این دو روش مشاهده کرد. به طوری که متوسط اختلاف بین اندازه‌های به دست آمده از LVDT و تحلیل PIV برابر ۱۱/۰٪ بود.

یکی از توانایی‌های PIV، به دست آوردن میدان کرنش با استفاده از میدان جابه‌جایی است. در شکل ۸-ب، نیمرخ کرنش طولی ورق FRP با استفاده از نتایج تحلیل PIV برای سطوح بار مختلف ترسیم شده است. با بررسی نیمرخ کرنش طولی نمونه‌ها می‌توان مشاهده کرد، نیروی وارده به ورق FRP، در طولی در حدود ۸۵ mm و از ورق FRP به بتن انتقال می‌یابد.



شکل ۸- منحنی بار-جابه‌جایی و نیمرخ کرنش طولی ورق FRP، ترسیم شده با استفاده از نتایج تحلیل PIV و LVDT. الف) منحنی بار-جابه‌جایی. ب) نیمرخ کرنش طولی.

زمینه محاسبه میدان جابه‌جایی و کرنش ورق FRP، تعدادی نمونه ساخته شد و تحت آزمایش برش مستقیم قرار گرفته و مقدار جابه‌جایی حداکثر و منحنی بار-جابه‌جایی نمونه‌ها با استفاده از LVDT و تحلیل PIV به دست آمد و با یکدیگر مقایسه شد. بر اساس نتایج پژوهش‌های صحت سنجی انجام گرفته گذشته و نتایج حاصل از پژوهش حاضر می‌توان نتیجه‌گیری‌های زیر را انجام داد:

نتیجه‌گیری

در پژوهش پیش رو، به منظور معرفی و ارزیابی روش PIV به عنوان یک روش غیر تماسی بر پایه پردازش تصویر در آزمایش‌های مهندسی سازه، برخی از پژوهش‌های صحت سنجی صورت گرفته در زمینه بررسی ترک خوردگی اعضای بتنی و اندازه‌گیری تغییر شکل و کرنش اعضای فولادی و بتنی با استفاده از تحلیل PIV مورد بررسی قرار گرفت و همچنین به منظور ارزیابی دقت روش PIV در

• PIV یک روش قدرتمند برای بررسی شروع و انتشار ترک‌ها می‌باشد، به‌طوری که ترک‌های غیر قابل مشاهده با چشم غیر مسلح، می‌توانند به راحتی با استفاده از PIV کنترل شوند. با استفاده از نتایج تحلیل PIV، می‌توان اطلاعات دقیقی در مورد رفتار مکانیکی مواد، مانند پروفیل‌های ترک، منحنی‌های بار-عرض ترک و میدان کرنش در لحظه حداکثر بار، دست یافت. در نتیجه، این روش می‌تواند به‌عنوان یک جایگزین برای روش‌های اندازه‌گیری معمول در زمینه بررسی ترک‌خوردگی، در آزمایش‌های خمشی مورد توجه قرار گیرد.

• با استفاده از روش PIV، میدان جابه‌جایی و منحنی بار-جابه‌جایی تیرهای فولادی و بتن مسلح تحت بارگذاری خمشی با دقت بسیار بالا به‌دست می‌آید. همچنین با داشتن میدان جابه‌جایی، تانسور کرنش نیز می‌تواند با یک فرآیند ساده و با دقت بسیار بالا محاسبه شود. در نتیجه، روش PIV می‌تواند به‌دلیل هزینه‌های پایین و توانایی و

دقت بالا در ارزیابی میدان جابه‌جایی و کرنش، به‌طور گسترده‌ای به‌عنوان جایگزین روش‌های اندازه‌گیری معمول، در آزمایش‌های خمشی، استفاده شود.

• حداکثر اختلاف، بین مقادیر جابه‌جایی حداکثر ورق FRP به‌دست آمده از LVDT و تحلیل PIV در آزمایش برش مستقیم در حدود ۵٪ بود، همچنین مقدار متوسط اختلاف بین منحنی بار-جابه‌جایی ورق FRP به‌دست آمده از این دو روش، در حدود ۰/۱۱ mm بود. در نتیجه روش PIV یک روش دقیق برای محاسبه میدان جابه‌جایی ورق FRP متصل شده به بتن است. با داشتن میدان جابه‌جایی ورق FRP، می‌توان میدان کرنش و پروفیل‌های کرنش ورق FRP را نیز به‌دست آورد. بنابراین، از روش PIV می‌توان به‌عنوان یک روش کم هزینه و دقیق برای آزمایش‌های ارزیابی پیوستگی ورق FRP به بتن و به‌طور کلی، بررسی رفتار اعضای بتنی مقاوم‌سازی شده با FRP استفاده کرد.

مرجع‌ها

- [1] Wang, B., Teng, J. G., De Lorenzis, L., Zhou L., Ou J., Jin W. (2009). "Strain monitoring of RC members strengthened with smart NSM FRP bars". *Construction and Building Materials*, vol. 23, pp. 1698-1711.
- [2] Slominski, C., Niedostatkiwicz M., and Tejchman J. (2007). "Application of particle image velocimetry (PIV) for deformation measurement during granular silo flow". *Powder Technology*, vol. 173, pp. 1-18.
- [3] Adrian K. Y., and Al-Mahaidi R. (2006). "Experimental investigation on torsional behavior of solid and box-section RC beams strengthened with CFRP using photogrammetry". *Journal of Composites for Construction, ASCE*, vol. 10, no. 4, pp. 321-329.
- [4] Czaderki C., Soudki K., and Motavalli M. (2010). "Front and side view image correlation measurements on FRP to concrete pull-off bond tests". *Journal of Composites for Construction, ASCE*, vol. 14, no. 4, pp. 451-463.
- [5] Czaderski C., Soudki K., and Motavalli M. (2010). "Front and side view image correlation measurements on FRP to concrete pull-off bond tests". *Journal of Composites for Construction*, vol. 14, pp. 451-463.
- [6] White D., Take W., and Bolton M. (2003). "Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry". *Geotechnique*, vol. 53, pp. 619-631.
- [7] Sanal I., Ozyurt N., Hosseini A. (2016). "Characterization of hardened state behavior of self compacting fiber-reinforced cementitious composites (SC-FRCC's) with different beam sizes and fiber types". *Journal of Composites Part B*. 105. 30-45.
- [8] Hosseini A., Mostofinejad D., and Hajialilue-Bonab M. (2004). "Displacement and strain field measurement in steel and RC beams using particle image velocimetry". *Journal of Engineering Mechanics*, vol. 140, p. 04014086.

[۹] عطاری ب. و توکلی‌زاده م. (۱۳۹۷). "ارزیابی طول موثر پیوستگی روش کاشت الیاف در نصب خارجی به روش سرعت‌سنجی تصویری ذرات". نشریه مهندسی عمران امیرکبیر.

- [10] Hosseini A., and Mostofinejad D. (2014). "Effective bond length of FRP-to-concrete adhesively-bonded joints- Experimental evaluation of existing models". *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 48. 150-158.

بررسی رشد مقاومت در بتن های سازه ای از سن ۷ به ۲۸ روزه و عوامل موثر بر آن – مطالعه موردی بتن های سازه ای پروژه توسعه جنوبی خط ۶ مترو تهران



امیر رضا تدین
کارشناسی عمران، کارشناس آزمایشگاه
کارگاهی، مهندسین مشاور سیناب غرب



نوید نیکزاد
کارشناسی ارشد عمران ژئوتکنیک
مدیر فنی آزمایشگاه کارگاهی، مهندسین
مشاور سیناب غرب



محسن تدین
رئیس هیات مدیره انجمن بتن ایران
مهندسین مشاور سیناب غرب



حمید جهانگیری
مدیر کنترل کیفیت شرکت سابیر بین الملل



محمد نوری
کارشناسی عمران، معاونت فنی
شرکت سابیر بین الملل



بهرام ابراهیمی ترکمانی
کارشناسی عمران، مدیر پروژه تونل
مکانیزه، شرکت سابیر بین الملل

چکیده

بتن پرکاربرد ترین مصالح ساختمانی در ساخت و سازه های عمرانی به حساب می رود. رایج ترین پارامتری که در خصوص کنترل کیفیت بتن ساخته شده در اغلب یا همه پروژه ها اندازه گیری می شود، مقاومت فشاری نمونه های اخذ شده از بتن تازه در تواترهای مشخص برای هر پروژه می باشد. در این خصوص در سازه های مختلف رده های مقاومتی مختلف تعریف می شود که معمولاً اصلی ترین پارامتر در تایید آن سازه توسط دستگاه نظارت می باشد. در پروژه ها اغلب یک یا دو نمونه در سن ۳ یا ۷ روز مورد آزمون قرار می گیرد و دو یا سه نمونه در سن مقاومت مشخصه (۲۸، ۴۲ و...). همواره این سوال مطرح می باشد که مقاومت فشاری کسب شده توسط بتن در سنین زود هنگام چند درصد مقاومت کسب شده در سنین مقاومت مشخصه است. در این خصوص مراجعی مانند مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ضریبی را ارائه داده اند که رابطه بین مقاومت فشاری سنین مختلف را تنها براساس نوع سیمان نشان می دهد همچنین در برخی مقالات و مراجع روابط پیش رفته تر با در نظر گیری سایر عوامل موثر بر رشد مقاومت بتن ارائه شده است. در این مقاله سعی شده است در ابتدا مروری بر روابط و ضوابط ارائه شده توسط سایر مراجع و مقالات انجام شود. سپس با استفاده از تعداد زیادی داده اخذ شده در شرایط مختلف دمایی و رده های مختلف مقاومتی که توسط تیم آزمایشگاهی مستقر در یک پروژه در کشور ایران و با استفاده از سیمان نوع ۲ اخذ شده و مورد آزمایش قرار گرفته اند، نشان داده شود که رشد مقاومت از سنین زود هنگام به سنین مقاومت مشخصه به عوامل گوناگونی بستگی داشته و نمی توان آن را یک ضریب ثابت برای کلیه بتن های ساخته شده حتی با یک نوع سیمان (مانند مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ایران) در نظر گرفت. کلمات کلیدی: مقاومت فشاری بتن، رشد مقاومتی، روابط رشد مقاومت بتن در مراجع مختلف، رده بتن

در یک پروژه ساخت تونل و ایستگاه های مترو رده های مختلف مقاومتی بتن های سازه ای بصورت (C25, C30 و C40) مورد استفاده واقع شده است. به جهت کنترل کیفیت بتن های ساخته شده در محل های مختلف براساس تواترهای ابلاغ شده به آزمایشگاه، نمونه گیری ها از بتن تازه انجام شده و اسلامپ و دمای بتن و هوا ثبت شده است. آزمون ها در ۷ و ۲۸ روزه مورد آزمایش مقاومت فشاری قرار گرفته و نتایج ثبت شده اند. آزمون ها ۷ روز به جهت کنترل بتن در سنین پایین تر و اصلاح مشکلات و موانع احتمالی در بتن ها بوده و آزمون های ۲۸ روزه به جهت انطباق با مقاومت مشخصه مورد نظر در هر رده می باشد. در پروژه های بتنی همواره این سوال مطرح است که مقاومت سن های پایین تر بتن چند درصد مقاومت سن مشخصه می باشد و در این خصوص غالباً ایراداتی به آزمایشگاه ها گرفته می شود که چرا نتایج ارائه شده و رشد نمونه ها از سنین کنترلی به سن مقاومت مشخصه مطابق با ضوابط ارائه شده در مراجع معتبر نظیر مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان نمی باشد؟

در این تحقیق به دلیل آنکه داده های بدست آمده در کشور ایران و با استفاده از سیمان مطابق با مشخصات سیمان پرتلند نوع ۲ ارائه شده در مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان بوده، به بررسی میزان دقت ضریب های ارائه شده در مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان پرداخته شده است که آیا همواره می توان از یک ضریب ثابت برای تبدیل مقاومت سنین مختلف به هم استفاده نمود یا خیر؟ لذا درصد رشد مقاومت بتن اخذ شده از سن ۷ به ۲۸ روزه در رده های مختلف و تحت شرایط مختلف (دمای بتن، دمای هوا، مشخصات سیمان مصرفی و نیز نوع روان کننده) مورد ارزیابی و بررسی قرار گرفته است و ضریب همبستگی و خطای نتایج حاصل شده نسبت به نتایج واقعی بدست آمده اند. همچنین سعی شده است تا با استفاده از اطلاعات ثبت شده عوامل موثر بر رشد مقاومت بتن ها مورد بررسی قرار گیرد.

۱.۲. مروری بر روابط ارائه شده در خصوص ارتباط

بین مقاومت بتن در سنین مختلف

در خصوص ارتباط بین مقاومت فشاری در سنین مختلف، مراجعی مانند مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان [۱] ضرایبی را ارائه داده اند که رابطه بین مقاومت فشاری سنین مختلف را تنها براساس نوع سیمان پرتلند نشان می دهد:

جدول ۱- تاثیر نوع سیمان پرتلند و سن بتن بر روی مقاومت فشاری نسبی بتن (از مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان ایران)

نوع سیمان	مقاومت فشاری (بصورت نسبی)			
	۱ روزه	۷ روزه	۲۸ روزه	۹۰ روزه
سیمان نوع I	0.3	0.66	1	1.2
سیمان نوع II	0.23	0.56	0.9	1.2
سیمان نوع III	0.57	0.79	1.1	1.2
سیمان نوع IV	0.17	0.43	0.75	1.2
سیمان نوع V	0.2	0.5	0.85	1.2

کمیته 209 ACI [۲] معادله (۱) را برای پیش بینی مقاومت فشاری استوانه استاندارد (قطر ۱۵ سانتیمتر و ارتفاع ۳۰ سانتیمتر) بتن ساخته شده با سیمان پرتلند معمولی مطابق مشخصات ASTM C150 TYPE 1 [۳] که در شرایط مرطوب نگه داشته شده و در شرایط استاندارد (ASTM C 192 و ASTM C 39) [۴و۵] مورد آزمایش قرار گرفته اند، توصیه می کند. که در آن f_{ct} مقاومت فشاری در سن t روزه و f_{c28} مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه است:

$$f_{ct} = f_{c28} \left(\frac{t}{4 + 0.85t} \right) \quad (1)$$

CEB-FIP MODEL CODE [۶] معادله (۲) را برای پیش بینی مقاومت سنین مختلف با استفاده از مقاومت سن ۲۸ روزه و شرایط نگهداری دمای ۲۰ درجه سانتی گراد پیشنهاد می دهد: که در آن t_1 برابر ۱ روز است.

$$f_{ct} = f_{c28} \exp \left[0.25 \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t/t_1}} \right) \right] \quad (2)$$

با استفاده از معادلات بالا و با قراردادن روزهای مختلف در آن، می توان نسبت های پیشنهادی کمیته ACI 209 و CEB-FIP MODEL CODE را بصورت جدول زیر ارائه نمود:

جدول ۲- مقاومت فشاری در سن مورد نظر نسبت به سن ۲۸ روزه
براساس پیشنهاد کمیته ACI 209 و
CEB-FIP MODEL CODE

سن مورد نظر (روز)	مقاومت فشاری در سن مورد نظر نسبت به سن ۲۸ روزه براساس پیشنهاد کمیته ACI 209	مقاومت فشاری در سن مورد نظر نسبت به سن ۲۸ روزه براساس پیشنهاد CEB-FIP MODEL CODE
1	0.21	0.34
3	0.46	0.60
7	0.70	0.78
28	1.0	1.00
90	1.12	1.12

از جمله پیش بینی های اولیه در خصوص مقاومت ۲۸ روزه بتن با استفاده از مقاومت سنین کمتر می توان به Slater

جدول ۳- پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن با استفاده از مقاومت ۷ روزه آن با استفاده از رابطه Slater 1926

مقاومت ۷ روزه (مگاپاسکال)	مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه براساس پیشنهاد Slater 1926 (مگاپاسکال)	نسبت مقاومت فشاری سن ۷ روزه به سن ۲۸ روزه براساس Slater 1926	درصد رشد مقاومت بتن از سن ۷ روزه به سن ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۲۸ روزه براساس Slater 1926
15	25	0.61	39
20	31	0.64	36
25	37	0.67	33
30	44	0.69	31
35	50	0.70	30
40	56	0.72	28
45	62	0.73	27

جدول ۴- پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن با استفاده از مقاومت ۷ روزه آن با استفاده از رابطه Neville 1996

مقاومت ۷ روزه (مگاپاسکال)	محدوده مقاومت فشاری در سن ۲۸ روزه براساس پیشنهاد Neville 1996 (مگاپاسکال)	محدوده نسبت مقاومت فشاری سن ۷ روزه به سن ۲۸ روزه براساس Neville 1996	درصد رشد مقاومت بتن از سن ۷ روزه به سن ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۲۸ روزه Neville 1996
15	20 → 26	0.77 → 0.59	23 → 41
20	26 → 34		
25	33 → 43		
30	39 → 51		
35	46 → 60		
40	52 → 68		
45	59 → 77		

1926 [۷] با معادله $f_{c28} = f_{c7} + 2.49\sqrt{f_{c7}}$ (مقاومت ها در واحد MPa هستند) و Neville 1996 [۸] با معادله $f_{c28} = 1.3 \text{ to } 1.7 f_{c7}$ اشاره نمود.

با استفاده از معادلات ارائه شده توسط Slater 1926 و Neville 1996 و با قراردادن مقاومت های مختلف در آن ها، می توان مقاومت های ۲۸ روزه ای که براساس مقاومت سن ۷ روزه پیش بینی می شوند را بدست آورد که با جایگذاری چند عدد بصورت نمونه این دو رابطه در جدول های شماره ۳ و ۴ ارائه شده اند. همانطور که در جدول شماره ۳ مشاهده می شود براساس رابطه Slater 1926 با افزایش مقاومت در سن ۷ روزه درصد رشد مقاومت ۷ روزه به ۲۸ روزه نسبت به مقاومت سن ۲۸ روزه کاهش می یابد در رابطه Neville 1996 برای درصد رشد مقاومت و نیز نسبت مقاومت ۷ روزه به ۲۸ روزه محدوده ای بیان شده است که نشان دهنده تاثیر عوامل مختلف بر آنها می باشد.

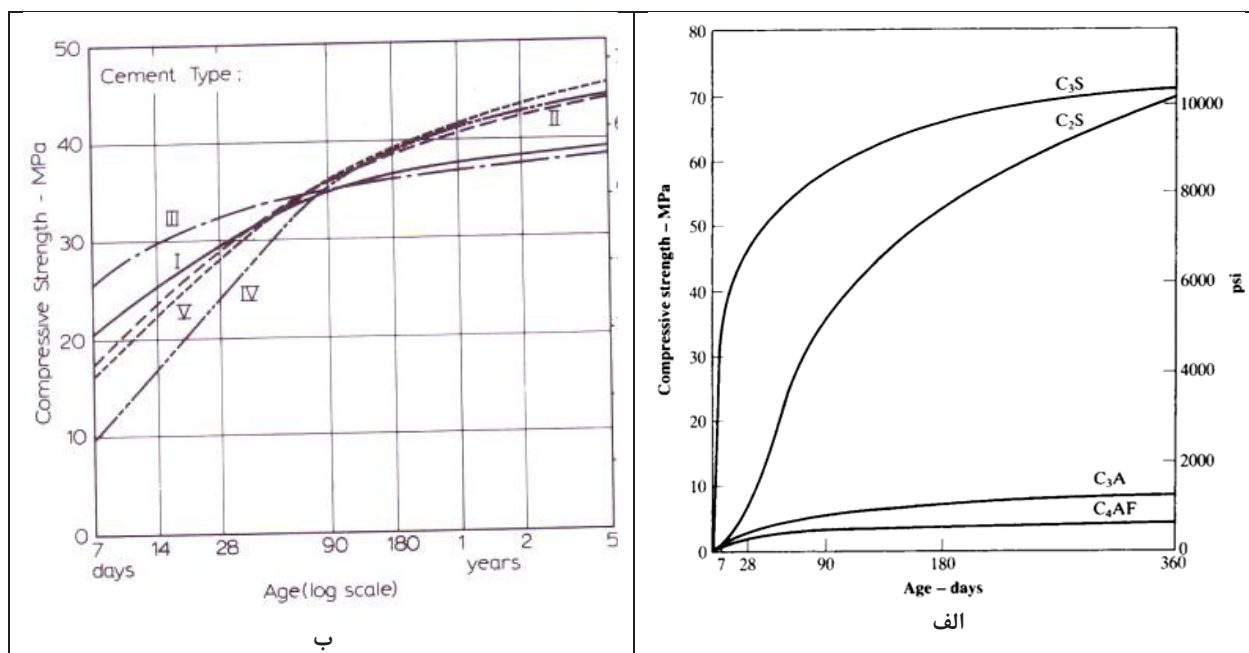
اصلی و نرمی) ۲- طرح اختلاط بتن ساخته شده (مانند نسبت آب به سیمان) ۳- عوامل محیطی که بتن در آن ساخته و عمل آوری (مانند دما و رطوبت) می شود.

یکی از عوامل موثر بر روند کسب مقاومت مخلوط های بتنی ترکیبات اصلی سیمان آنها می باشد. همانطور که در شکل (۱- الف) دیده می شود هرکدام از ترکیبات اصلی سیمان اگر به تنهایی مورد بررسی قرار گیرند مشخص می شود که روندهای کسب مقاومت متفاوتی دارند پس میزان این ترکیبات اصلی در انواع مختلف سیمان قطعاً بر روند کسب مقاومت در سنین مختلف تاثیر گذار می باشد. [۱۴] نتایج نشان داده شده در شکل ۱- الف برای عیار سیمان ثابت ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب بوده پس با تغییر عیار این روند می تواند دستخوش تغییراتی شود.

در این خصوص محققین بسیاری سعی بر پیش بینی f_{c28} براساس اطلاعات اختلاط بتن داشته اند [۹ و ۱۰]. همچنین تعدادی دیگر از محققین تکنیک های کامپیوتری و عددی را در این خصوص بکار بسته و با استفاده از شبکه عصبی، الگوریتم ژنتیک و منطق فازی مقاومتهای ۲۸ روزه را به مقاومت های سنین کمتر و گاه مشخصات اختلاط بتن ربط داده اند. [۱۱-۱۳]

۲.۲. مروری بر عوامل موثر بر رشد مقاومت بتن

در مورد عوامل موثر بر رشد مقاومت و نیز روند آن تحقیقاتی صورت گرفته که در این قسمت به اختصار مرور می گردند. بطور کلی می توان عوامل موثر بر رشد مقاومت بتن را به ۳ گروه کلی تقسیم نمود: ۱- ویژگی های سیمان مصرفی (مانند ترکیبات

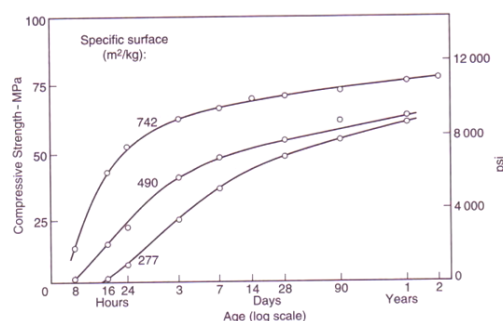


شکل ۱- (الف) روند کسب مقاومت هر یک از ترکیبات اصلی سیمان پرتلند بطور مجزا- (ب) روند کسب مقاومت بتن های ساخته شده با عیار ۳۳۵ کیلوگرم بر متر مکعب از انواع مختلف سیمان [۱۴]

یکی دیگر از ویژگی های سیمان که بر روند کسب مقاومت بتن در سنین مختلف اثر می گذارد نرمی (ریزی) سیمان می باشد. با ثابت در نظر گرفتن سایر مشخصات سیمان مخلوط بتنی، هرچه سیمان نرمتر باشد روند کسب مقاومت زودتر اتفاق می افتد و قاعدتاً نسبت مقاومت ۲۸ روزه به مقاومت سنین زودرس مانند ۷ روزه کاهش می یابد.

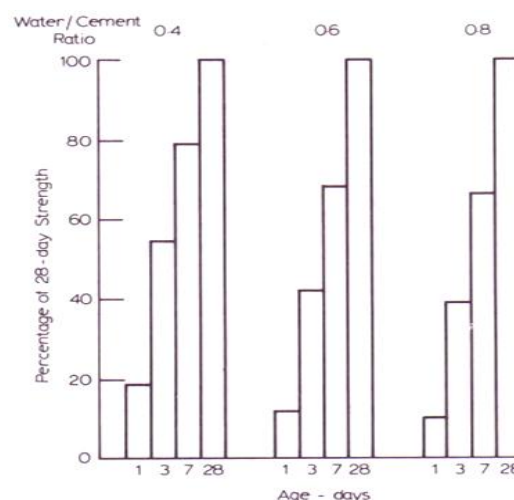
همانطور که در شکل (۱- ب) مشاهده می شود بتن های ساخته شده با یک نسبت آب به سیمان و عیار سیمان ثابت با انواع مختلف سیمان، میزان رشد مقاومتی از سنین زودرس (مثلاً ۷ روزه) به سن ۲۸ روزه مختلفی را از خود نشان داده اند که این موضوع نیز خود بیانگر تاثیر ترکیبات اصلی و نرمی سیمان بر روند کسب مقاومت می باشد. [۱۵]

نمونه‌ای از این روند و اثرات نرمی سیمان در شکل ۲ نشان داده شده است. [۱۵]



شکل ۲- روند کسب مقاومت بتن های ساخته شده با نسبت آب به سیمان ۰/۴۰ با استفاده از سیمان های پرتلند با سطح مخصوص (با استفاده از آزمایش نفوذ هوا) مختلف [۱۵]

علاوه بر ویژگی هایی که ذاتا به مشخصات سیمان مربوط می شود عوامل دیگری نظیر مشخصات طرح مخلوط بتن نیز می توانند در رشد مقاومت از سنین زودرس به سنین بالاتر تاثیر گذار باشند. یکی از عوامل موثر در این خصوص نسبت آب به سیمان می باشد. تحقیقات نشان می دهد کسب مقاومت مخلوط های با نسبت آب به سیمان پایین نسبت به مخلوط های با نسبت آب به سیمان بالاتر، سریع تر می باشد. شکل زیر این موضوع را بیان می کند: [۱۵]

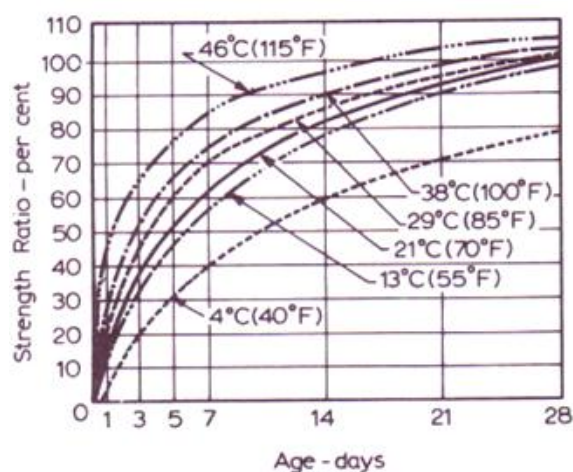


شکل ۳- تاثیر نسبت آب به سیمان بر روند کسب مقاومت بتن های ساخته شده با استفاده از سیمان پرتلند معمولی [۱۵]

دلیل این موضوع آن است که در مخلوط های با نسبت پایین آب به سیمان، ذرات سیمان به یکدیگر نزدیک تر بوده و سیستم پیوسته ژل سریعتر تشکیل می گردد. [۱۵]

همچنین در آب و هوای گرم کسب مقاومت های زودرس بالاتر بوده و نسبت مقاومت ۲۸ روزه به مقاومت ۷ روزه کمتر خواهد بود. [۱۵]

شکل ۴ تاثیر دمای نگهداری بتن در نسبت مقاومت کسب شده در سنین و شرایط مختلف را نسبت به سن ۲۸ روزه و در دمای نگهداری ثابت ۲۱ درجه سانتیگراد را نشان می دهد. همانطو که در آن مشاهده می گردد هرچه دمای نگهداری نمونه ها کمتر شده نسبت مقاومت زودرس کسب شده توسط نمونه ها کاهش یافته است. [۱۵]



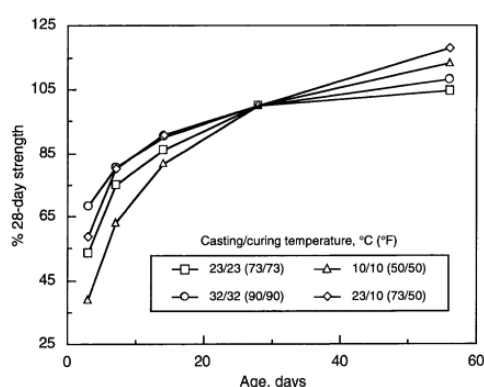
شکل ۴- نسبت مقاومت بتن عمل آوری شده در دماهای مختلف به مقاومت ۲۸ روزه بتن در عمل آوری ۲۱ درجه سانتی گراد (نسبت آب به سیمان برابر ۰/۵۰، نمونه ها ساخته و در دمای مشخص و ثابت نگهداری شده اند) [۱۵]

همچنین در تحقیقی دیگر اثر دما در هنگام بتن ریزی و نیز دمای نگهداری بتن بر میزان رشد مقاومت بتن ساخته شده با استفاده از دو نوع سیمان که یکی (سیمان A) مطابق با نوع I و دیگری (سیمان B) مطابق با نوع II طبق مشخصات استاندارد ASTM C150 می باشد، در سنین مختلف مورد بررسی قرار گرفته است. مشخصات سیمان های مصرفی در جدول ۵ ارائه شده است. نتایج این تحقیق در شکل ۵ ارائه شده است: [۱۶]

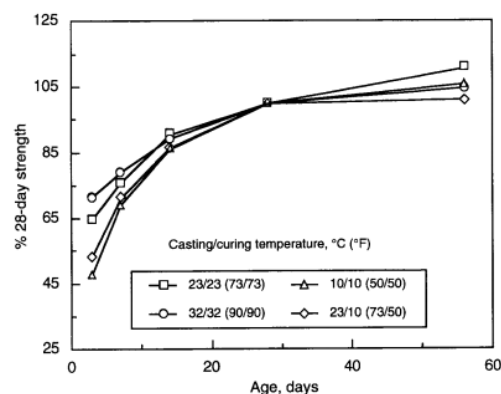
همانطور که از نتایج این تحقیق بر می آید، هرچه دمای بتن ریزی و عمل آوری آن بیشتر باشد درصد رشد مقاومت سنین زود هنگام نسبت به مقاومت ۲۸ روزه افزایش می یابد.

جدول ۵- مشخصات شیمیایی و فیزیکی سیمان A و B [۱۶]

Parameter, %	Cement A	Cement B
SiO ₂	19.43	21.55
Al ₂ O ₃	4.73	3.58
Fe ₂ O ₃	2.97	3.23
CaO	61.32	63.66
MgO	3.74	2.79
SO ₃	4.51	3.02
Na ₂ O	0.40	0.35
K ₂ O	0.78	0.35
TiO ₂	0.23	0.18
P ₂ O ₅	0.11	0.07
Mn ₂ O ₃	0.08	0.05
SrO	0.05	0.07
Loss on ignition	1.22	1.50
Equivalent alkalis as Na ₂ O	0.91	0.58
C ₃ S	51	57
C ₂ S	17	19
C ₃ A	8	5
C ₄ AF	9	10
Fineness, m ² /kg	385	371
ASTM C 109 mortar cube strength, MPa (psi)		
1 day	14.8 (2150)	11.4 (1650)
3 days	26.1 (3780)	27.0 (3920)
7 days	34.6 (4610)	33.3 (4830)
14 days	43.6 (5050)	39.4 (5710)
28 days	45.6 (5700)	41.4 (6010)
56 days	45.4 (6120)	45.3 (6570)
Time of set, Vicat, min		
Initial	93	214
Final	195	260



سیمان B - مطابق با نوع II استاندارد ASTM C150



سیمان A- مطابق با نوع I استاندارد ASTM C150

شکل ۵- الف) رشد مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سیمان A ب) رشد مقاومت فشاری بتن ساخته شده با سیمان B [۱۶]

داده ها با دقت در آزمایشگاه ثبت شده و سپس در قالب تحلیل عددی مورد بررسی قرار گرفته اند. در این تحقیق سعی شده است تا با استفاده از داده های موجود نشان داده شود که با استفاده از یک ضریب نمی توان با دقت مناسبی مقاومت سنین مختلف را به هم ربط داد و باید سایر عوامل نیز در نظر گرفته شوند.

۴- نتایج و تحلیل ها

در این مقاله صرفاً نتایج حاصل شده از کاربرد یک نوع سیمان پرتلند نوع ۲ با مشخصات ارائه شده در جداول زیر استفاده شده است:

۳-روش تحقیق

در تحقیق انجام شده تعداد زیادی نمونه مکعبی ۱۵ سانتیمتری بتن از محل های مختلف پروژه با رده ها، اسلامپ ها، شرایط محیطی و دمایی بتن و کارخانه های تولید کننده سیمان و مواد افزودنی مختلف براساس استاندارد هـــــــــــــــای

(ISIRI 3201-1 و ISIRI 1608-2 و ISIRI 3203-2) اخذ شده و در حوضچه ها در شرایط استاندارد نگهداری شده و تحت آزمون مقاومت فشاری در سنین ۷ و ۲۸ روزه قرار گرفته اند (براساس استاندارد ISIRI 1608-3). نمونه ها توسط یک تیم مستقر در پروژه گرفته شده اند. [۱۷-۲۰]

جدول ۶- نتایج آزمایش های شیمیایی سیمان*

ردیف	عنوان	مقدار	محدوده تعیین شده برای سیمان نوع ۲ در استاندارد ملی ایران و مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان
۱	Insoluble Residue	0.34	-
۲	SiO ₂ %	21.40	حداقل ۲۰/۰۰ درصد
۳	Al ₂ O ₃ %	4.60	حداکثر ۶/۰۰ درصد
۴	Fe ₂ O ₃ %	3.88	حداکثر ۶/۰۰ درصد
۵	CaO %	62.98	-
۶	MgO %	3.12	حداکثر ۵ درصد
۷	SO ₃ %	2.12	حداکثر ۳/۰۰ درصد
۸	Na ₂ O %	0.16	-
۹	K ₂ O %	0.64	-
۱۰	L.O.I %	1.09	حداکثر ۳/۰۰ درصد
۱۲	L.S.F %	91.00	-
ترکیبات سیمان			
۱	C3S %	51.1	-
۲	C2S %	22.7	-
۳	C3A %	5.6	حداکثر ۸/۰۰ درصد
۴	C4AF %	11.8	-
۵	CaO free %	0.67	-

جدول ۷- نتایج آزمایش های فیزیکی سیمان*

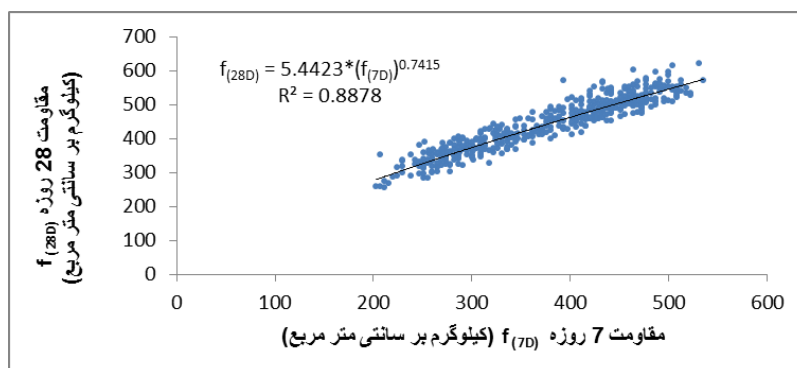
ردیف	عنوان	مقدار	محدوده تعیین شده برای سیمان نوع ۲ در استاندارد ملی ایران و مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان
۱	بلین (سانتی متر مربع بر گرم)	3084	حداقل ۲۸۰۰
۲	گیرش اولیه (دقیقه)	160	حداقل ۴۵
۳	گیرش نهایی (دقیقه)	250	حداکثر ۳۶۰
۴	مقاومت فشاری ملات استاندارد طبق استاندارد ایران kg/cm ² (۳ روزه)	250	حداقل ۱۰۰
۵	مقاومت فشاری ملات استاندارد طبق استاندارد ایران kg/cm ² (۷ روزه)	368	حداقل ۱۷۵
۶	مقاومت فشاری ملات استاندارد طبق استاندارد ایران kg/cm ² (۲۸ روزه)	480	حداقل ۳۱۵

داده‌ها مورد بررسی قرار گرفتند. با استفاده از اطلاعات ۶۲۷ نوبت نمونه برداری آزمایشگاهی، رابطه (۳) ارائه شده در شکل (۵) بین مقاومت ۷ روزه و مقاومت ۲۸ روزه حاصل گردید:

$$f_{(28D)} = 5.4423 * (f_{(7D)})^{0.7415} \quad (3)$$

*نتایج آزمایش های شیمیایی و ویژگی سیمان بطور طبیعی در طول اجرای پروژه دستخوش نوساناتی بوده است و این نتایج، تقریباً میانگین آنهاست.

در بررسی اولیه مشاهده شد که رشد مقاومت بتن از ۷ روزه به ۲۸ روزه برای تمامی رده های بتن یکسان نمیباشد. از این رو با ثابت نگه داشتن سیمان مصرفی،



شکل ۵- رابطه بین مقاومت ۷ روزه و مقاومت ۲۸ روزه

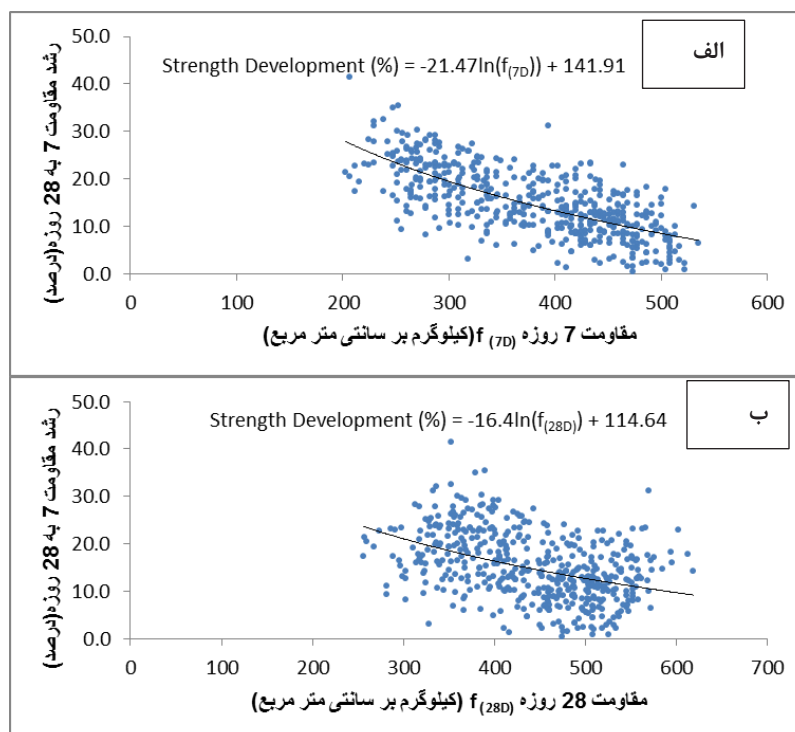
از سن ۷ به ۲۸ روزه و مقاومت ۷ روزه (شکل ۶- الف) و ۲۸ روزه (شکل ۶- ب) ارائه شده اند:

$$\text{Strength Development (\%)} = -21.47 \ln(f_{(7D)}) + 141.91 \quad (۴)$$

$$\text{Strength Development (\%)} = -16.4 \ln(f_{(28D)}) + 114.64 \quad (۵)$$

که در روابط بالا درصد رشد مقاومت یا Strength Development (%) معادل تفاوت مقاومت ۷ روزه و ۲۸ روزه نسبت به مقاومت ۲۸ روزه بصورت درصد در نظر گرفته شده است.

که در رابطه (۳) $f_{(7D)}$ و $f_{(28D)}$ به ترتیب مقاومت فشاری نمونه های مکعبی ۱۵ سانتیمتری ۷ و ۲۸ روزه بر حسب kg/cm^2 می باشند. برداشت داده های آزمایشگاهی از محدوده اوایل سال ۱۳۹۶ تا اوایل سال ۱۳۹۷ بوده اند. بازه دمای بتن از حدود ۱۰ تا ۳۲ درجه سانتیگراد و دمای هوا از حدود ۶ تا ۳۶ درجه سانتیگراد بوده است. همچنین براساس داده های برداشت شده روابط (۴) و (۵) به ترتیب نشان دهنده رابطه میان درصد رشد مقاومت بتن



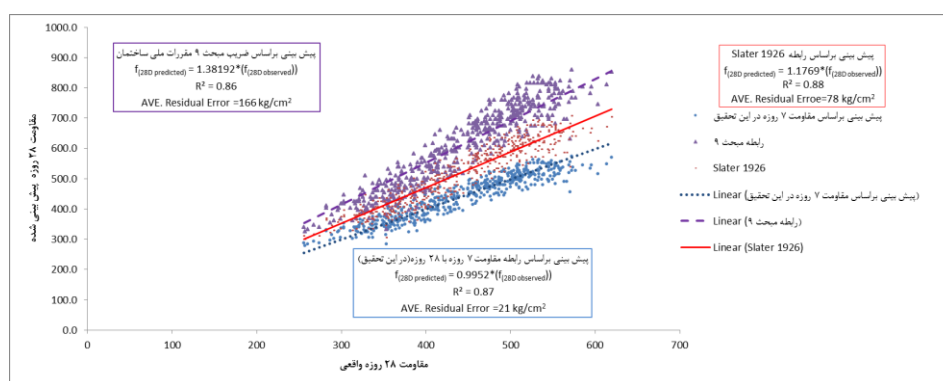
شکل ۶- الف) رابطه تخمینی بین مقاومت ۷ روزه بتن و درصد رشد مقاومت از ۷ به ۲۸ روز، ب) رابطه تخمینی بین مقاومت ۲۸ روزه بتن و درصد رشد مقاومت از ۷ به ۲۸ روز

سیمان از یک کارخانه، مقاومت ۷ روزه بتن و به بیان دیگر رده مقاومتی آن می باشد و این درصد رشد خود تابعی از مقاومت ۷

از شکل های ۶- الف و ۶- ب می توان نتیجه گرفت که یکی از عوامل درصد رشد مقاومت بتن از سن ۷ به ۲۸ در یک نوع

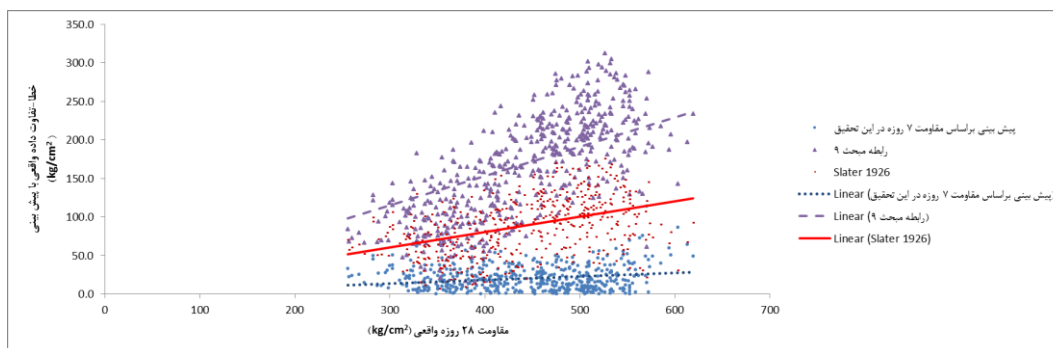
کلی با افزایش مقاومت (کاهش نسبت آب به سیمان) درصد رشد مقاومتی روند کاهشی داشته است. با این حال پراکندگی زیاد داده ها از رابطه ارائه شده نشان می دهد که عوامل دیگر نیز بر رشد مقاومت بتن تاثیر گذار هستند.

بنابراین براساس رابطه بدست آمده میان مقاومت ۷ روزه بتن و مقاومت ۲۸ روزه واقعی، مقاومت ۲۸ روزه پیش بینی شده بدست آمده و با مقادیر ۲۸ روزه که با استفاده از جدول مبحث ۹ و نیز رابطه Slater 1926 ارائه شده مورد مقایسه قرار گرفت. نتایج حاصل از این مقایسه در شکل ۷ ارائه شده است:



شکل ۷- رابطه بین مقاومت ۲۸ روزه واقعی و پیش بینی شده

به منظور بررسی دقیقتر، بزرگی خطای قیمانده (Residual Error) (قدر مطلق اختلاف داده واقعی با داده پیش بینی شده) هر کدام از روش ها در تک تک داده ها در شکل ۸ ارائه شده است:



شکل ۸- خطای مطلق داده پیش بینی شده بر اساس رابطه مبحث ۹ و نیز رابطه رشد مقاومت در تحقیق حاضر

به منظور بررسی بیشتر داده ها اطلاعاتی در مورد خطاها در روش ارائه شده در این مقاله و مبحث ۹ در جدول زیر ارائه شده است:

جدول ۸- بررسی خطای مطلق روش های پیش بینی نتایج ۲۸ روزه

روش پیش بینی	خطای مطلق باقیمانده kg/cm ²			
	متوسط	حداقل	حداکثر	انحراف معیار استاندارد
از رابطه ارائه شده در این مقاله	21	0	114	16
از ضریب ثابت مبحث ۹	166	15	312	65

همانطور که در داده های شکل ۷ و ۸ و نیز جدول ۸ مشخص می باشد، پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه با استفاده از یک ضریب ثابت (جدول مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان) در یک نوع سیمان بدون در نظر گیری شرایط دیگر با خطاهای بالا روبه رو بوده و هرچه رده مقاومتی بتن بالاتر رفته میزان این خطا بیشتر شده و در حقیقت دارای خطای افزایشی بوده است. همانطور که در جدول ۸ مشاهده می شود میانگین خطاها برای روش ارائه شده در این مقاله در محدوده مقاومت های اخذ شده در پروژه، بسیار کمتر از خطای ضریب ارائه شده در مبحث ۹ می باشد. با بررسی

آماري داده ها این نتیجه حاصل شد که حدود ۷۳ درصد داده های پیش بینی شده با رابطه ارائه شده در این مقاله خطای مطلق کمتر از 29 kg/cm^2 دارند این در حالی است که حدود ۷۵ درصد از داده های پیش بینی شده با ضریب مبحث ۹ خطایی بین ۷۸ تا 234 kg/cm^2 داشته اند.

متوسط درصد رشد مقاومت برای رده های مختلف بتن در این تحقیق در جدول ۹ ارائه شده است. در تمامی این داده ها سیمان مصرفی پرتلند نوع ۲ و از یک کارخانه ثابت بوده است:

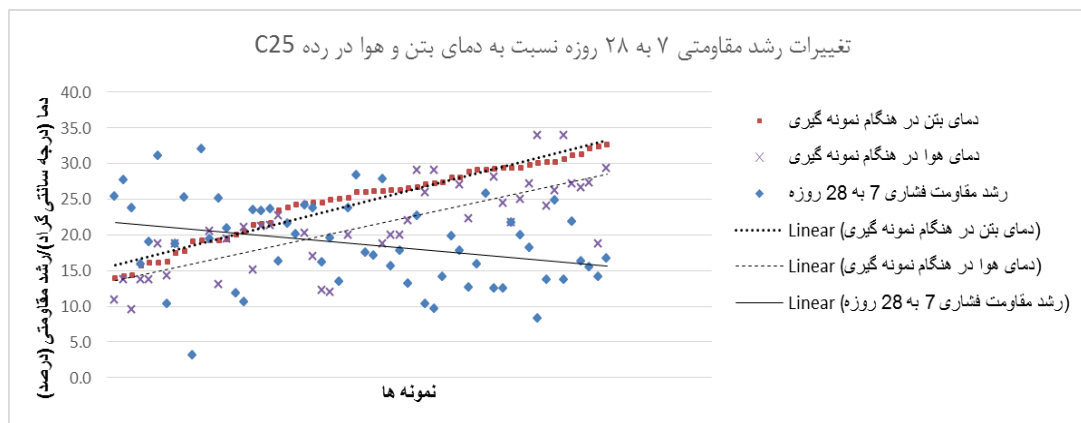
جدول ۹- متوسط درصد رشد مقاومت ۷ به ۲۸ روز برای هر رده براساس داده های برداشت شده در این تحقیق*

رده بتن	(درصد رشد مقاومت از ۷ به ۲۸ روزه)				(مقاومت نمونه مکعبی ۱۵ سانتیمتری برحسب kg/cm^2)			
	مقدار متوسط	انحراف معیار استاندارد	کمینه مقدار	بیشینه مقدار	مقدار متوسط	انحراف معیار استاندارد	کمینه مقدار	بیشینه مقدار
C25	19	6	3	32	328	12	303	349
C30	20	7	6	41	373	15	350	399
C35	16	7	1	29	422	13	400	446
C40	11	6	0	30	475	14	451	498
C45	11	5	1	26	520	14	501	548
C50	15	5	6	31	565	12	551	596

*لازم به ذکر است که رده های طراحی شده C25، C30 و C40 بوده که در حین اجرا بدلیل نوسانهای اجرایی نتایج از C25 تا C50 حاصل گردیده است.

در تمام داده ها تنها کارخانه سیمان یکسان بوده است و این امکان وجود دارد که با تغییر جنس سیمان (ترکیبات اصلی و ریزی سیمان) این روندها و همچنین میزان تغییرات مقاومت بتن در سنین مختلف دستخوش تغییرات شوند. بنابراین می توان دریافت علاوه بر رده بتن عوامل دیگر نیز می توانند در رشد

مقاومتی از سنین کم به سنین بالاتر موثر باشند. از جمله این عوامل می توان به دمای هوا و دمای بتن در هنگام بتن ریزی و نمونه برداری از بتن اشاره نمود. به منظور بررسی اثر دما تغییرات درصد رشد مقاومتی به همراه تغییرات دما در شکل ۹ برای رده C25 رسم شده است:



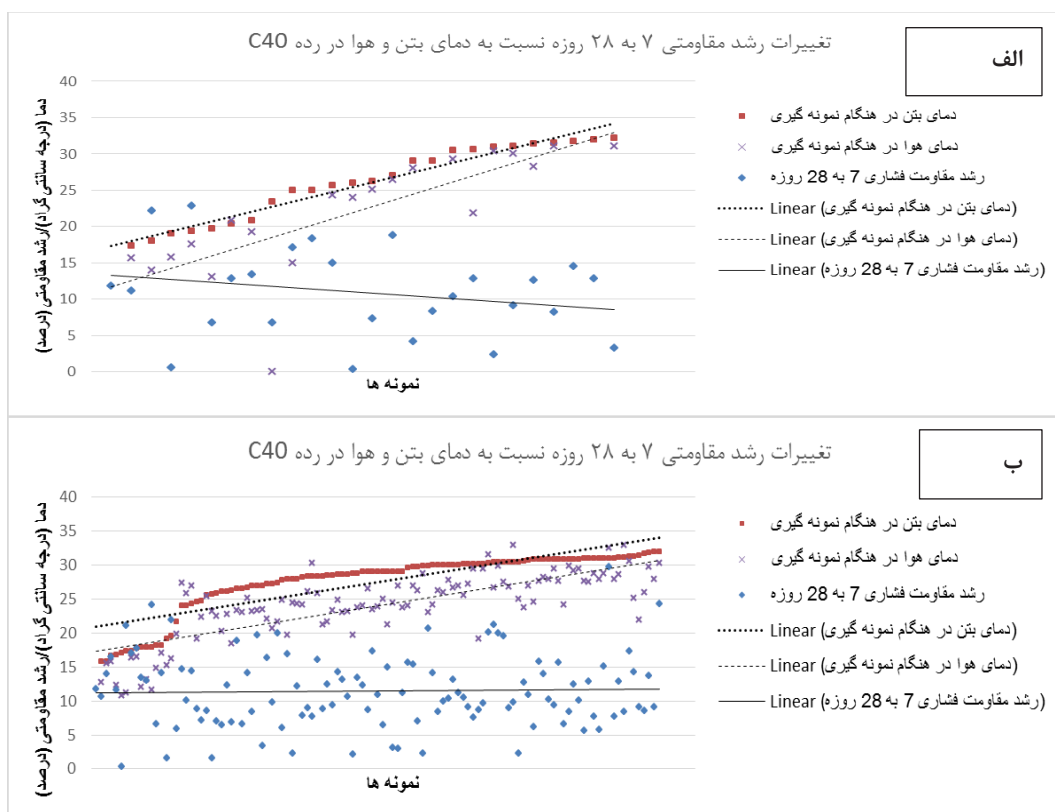
شکل ۹- نحوه تغییر درصد رشد مقاومتی بتن از ۷ به ۲۸ روز با تغییرات دمای

هستند بلکه نوع روان کننده نیز می تواند در این پارامتر موثر باشد.

با توجه به بررسی های انجام شده در این تحقیق به نظر می رسد عوامل مختلفی بر میزان رشد مقاومت از سنین زود هنگام به سن مقاومت مشخصه در بتن اثر گذار هستند. از جمله این عوامل می توان به رده مقاومتی و نسبت آب به سیمان، دمای بتن و هوا، روان کننده مصرفی در بتن اشاره نمود. همچنین به نظر می رسد با وجود اینکه سیمان های پرتلند تولید شده با ترکیبات و ریزی متفاوت حتی اگر در یک نوع از انواع سیمان به لحاظ مشخصات فیزیکی و شیمیایی طبقه بندی شوند، با توجه به مشخصات مربوط به خود روندهای کسب مقاومتی متفاوتی داشته باشند. لذا با توجه به تاثیر عوامل مختلف از جمله موارد مذکور در این مقاله، ارائه یک رابطه برای پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن با توجه به مقاومت ۷ روزه یا پیش بینی مقاومت سنین دیگر فعلا امکان پذیر نباشد.

همانطور که در شکل ۹ مشاهده می شود، دمای بتن به تبع افزایش دمای هوا افزایش داشته و درصد رشد مقاومتی با این افزایش، دچار کاهش شده است. این روند در رده های C30 و C35 نیز به همین شکل مشاهده شده است. در رده های C40 و C45 مورد جالب توجهی مشاهده شد، از این قرار که در مورد روان کننده با نام تجاری مخفف C از نوع پلی کربکسیلات این کاهش رشد با افزایش دمای بتن مشاهده نشده و میزان رشد مقاومت در یک رده و با یک نوع سیمان با افزایش دما بطور متوسط تقریباً ثابت مانده است. این در حالی هست که روند کاهش درصد رشد مقاومتی با افزایش دمای بتن برای روان کننده با نام تجاری مخفف L از نوع پلی کربکسیلات اثر همانند رده های پایین تر مشاهده شده است. روند توضیح داده شده برای رده های C40 و C45 در شکل های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

با توجه به شکل های ۱۰ و ۱۱ می توان نتیجه گرفت که نه تنها رده بتن و دمای آن در رشد مقاومتی اثر گذار



شکل ۱۰- نحوه تغییر درصد رشد مقاومتی بتن از ۷ به ۲۸ روز با تغییرات دمایی برای رده C40 (الف-با استفاده از روان کننده L و ب- با استفاده از روان کننده C)

همین روند در بتن با رده C45 نیز مشاهده شده است. داده های مربوط به این رده در شکل ۱۱ نمایش داده شده اند.



شکل ۱۱- نحوه تغییر درصد رشد مقاومتی بتن از ۷ به ۲۸ روز با تغییرات دمایی برای رده C45 (الف- با استفاده از روان کننده L و ب- با استفاده از روان کننده C)

• دمای بتن که خود می تواند تابعی از دمای هوا باشد بر میزان رشد مقاومتی از سن ۷ به ۲۸ روز موثر بوده و در یک رده مشخص با افزایش دمای بتن درصد رشد مقاومت بتن کاهش پیدا کرده است.

• در مورد روند کاهش درصد رشد با افزایش دمای هوا و بتن استثنا نیز می تواند وجود داشته باشد به عبارتی عامل دیگر می تواند بر این میزان رشد مقاومتی موثر باشد که در این تحقیق استفاده از یک نوع روان کننده (با نام مختصر C) این روند را برهم زده است و نتایج حاصل از آن نشان می دهد با افزایش دما روند رشد مقاومتی تغییر چندانی نداشته است.

• نتایج مورد بررسی در این مقاله همگی با استفاده از یک نوع سیمان از یک کارخانه بوده است لذا ممکن است با تغییر جنس سیمان این روند ها تغییر پیدا کند.

• با توجه به تاثیر جنس سیمان (عمدتا ترکیبات اصلی و ریزی سیمان) و دمای بتن و هوا و رده های مقاومتی،

۵- نتیجه گیری و جمع بندی

در این تحقیق اطلاعات ۶۲۷ داده از نمونه برداری بتن با رده های مختلف مقاومتی و نیز شرایط مختلف دمایی و روان کننده های مختلف که توسط آزمایشگاه مستقر در یک پروژه در ایران برداشت شده است جهت بررسی رشد مقاومتی بتن از سن ۷ به ۲۸ روزه و عوامل موثر بر آن مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج کلی حاصل از این تحقیق از این قرار می باشد:

• رشد مقاومت بتن از سن ۷ به ۲۸ روزه خود تابعی از مقاومت سن ۷ روزه بوده و در حالت کلی با افزایش رده مقاومتی، میزان این رشد کاهش داشته است.

• استفاده از یک ضریب ثابت (مثلا ضرایب مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان) بدون توجه به سایر شرایط ساخت بتن و بتن ریزی خطاهای زیادی دارد که این میزان خطا با افزایش رده مقاومتی افزایش داشته است.

نسبت آب به سیمان و همچنین عیار سیمان، ارائه یک مقاومت ۷ روزه یا پیش بینی مقاومت سنین دیگر فعلا رابطه برای پیش بینی مقاومت ۲۸ روزه بتن با توجه به امکان پذیر نمی باشد.

۶- قدردانی

نویسندگان مقاله از جناب آقای مهندس ابراهیمی مدیر عامل محترم شرکت سایبرین الملل جهت فراهم آوردن بستر آزمایشگاهی مناسب در پروژه و همچنین از تکنسین های آزمایشگاه جهت انجام آزمایش ها قدردانی می نمایند.

۷- مراجع

[۱] مبحث نهم مقررات ملی ساختمان

- [2] ACI Committee 209. (1997). "Prediction of Creep, Shrinkage and Temperature Effects in Concrete Structure". American Concrete Institute.
- [3] ASTM C150
- [4] ASTM C 192-00. (2000). "Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory". American Society for Testing and Materials, USA.
- [5] ASTM C 39-99. (1999). "Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens". American Society for Testing and Materials, USA.
- [6] CEB-FIP Model Code. (1990). Comite Euro-International du Beton (CEB), Bulletin D'Information No. 203/205, Lausanne, 437 p.
- [7] Slater, W.A., (1926). "Relation of 7-day to 28-day compressive strength of mortar and concrete". In Journal Proceedings, 22(2), 437-449.
- [8] Neville A.M., (1996). "Properties of Concrete". John Wiley & sons, New York.
- [9] Zain, M.F.M., Suhad M. Abd, Sopian, K., Jamil, M., Che-Ani, A.I., (2008). "Mathematical regression model for the prediction of concrete strength". In Proceedings of the WSEAS International Conference. Mathematics and Computers in Science and Engineering.
- [10] Rafi, M.M., Nasir, M.M., (2015). "Models for prediction of 28-day concrete compressive strength". Journal of Testing and Evaluation, 44(3).
- [11] Lai, S., Serra, M., (1997). "Concrete strength prediction by means of neural network". Construction and Building Materials, 11(2), 93-98.
- [12] Ni, H.G., Wang, J.Z., (2000). "Prediction of compressive strength of concrete by neural networks". Cement and Concrete Research, 30(8), 1245-1250.
- [13] Hamid-Zadeh, N., Jamali, A., Nariman-Zadeh, N., Akbarzadeh, H., (2007). "Prediction of concrete compressive strength using evolved polynomial neural networks". WSEAS Transaction on systems, 4(4), 802-807.
- [14] Neville, A. M., & Brooks, J. J. (1987). Concrete technology.
- [15] Neville, A. M. (1995). Properties of concrete (Vol. 4). London: Longman.
- [16] Burg, R. G. (1996). The influence of casting and curing temperature on the properties of fresh and hardened concrete (No. R&D Bulletin RD113T.). Portland Cement Association.
- [۱۷] ISIRI 3201-1، استاندارد ملی ایران، بتن تازه، قسمت ۱: نمونه برداری، چاپ اول
- [۱۸] INSO 1608-2، استاندارد ملی ایران، بتن سخت شده، قسمت ۲: ساخت و عمل آوری آزمون ها برای آزمون مقاومت، چاپ اول سال ۱۳۹۳
- [۱۹] ISIRI 3203-2، استاندارد ملی ایران، بتن تازه، قسمت دوم: تعیین روانی به روش اسلامپ -روش آزمون، تجدید نظر دوم
- [۲۰] INSO 1608-3، استاندارد ملی ایران، بتن سخت شده، قسمت ۳: تعیین مقاومت فشاری آزمون ها-روش آزمون، چاپ اول سال ۱۳۹۳