

بررسی آزمایشگاهی عملکرد سلول تنش و کرنش سنج در بتن

کاوه آهنگری*^۱، آرش اخوان ماسوله^۲

۱- استادیار و عضو هیئت علمی گروه مهندسی معدن، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد علوم و تحقیقات تهران

۲- کارشناس ارشد سازه‌های هیدرولیکی، شرکت مدیریت منابع آب ایران

(*عهده دار مکاتبات- ahangari@srbiau.ac.ir)

چکیده

روش‌های کنترل به کمک ابزاربندی، همواره با مشکلاتی نظیر نتایج اندازه‌گیری غیرقابل تفسیر و یا خرابی ابزار اندازه‌گیری مواجه بوده است. این موضوع در مورد اندازه‌گیری مستقیم و غیرمستقیم تنش در بتن نیز صادق می‌باشد. یکی از دلایل مهم این امر، مسائل مربوط به فرآیند گیرش در بتن و مشکلات مربوط به تبدیل رفتار تنش-کرنش ابزار به رفتار تنش-کرنش ساختار مرکب ابزار-بتن است. در تحقیق حاضر، یک نمونه آزمایشگاهی بتن تحت شرایط کنترل شده به وسیله سلول تنش، کرنش سنج و دماسنج، ابزاربندی شده و نتایج ابزار در طول فرآیند گیرش و پس از آن کنترل و با یکدیگر مقایسه گردیده است. در این راستا کنترل تئوری‌های موجود در مورد تغییرات تنش-کرنش و دما در بتن در حال گیرش و بررسی مشکلات و عوامل موثر بر نتایج ابزار در بتن، مدنظر بوده است.

واژگان کلیدی: بتن، ابزاربندی، سلول تنش، کرنش سنج.

۱- مقدمه

تلاش‌ها برای اندازه‌گیری تنش در بتن از حدود سال ۱۹۳۰ آغاز گردید. Andre Coyne در فرانسه کرنش سنج تار مرتعش (Vibration-Wire Strain Gauge) و Roy Carlson در آمریکا کرنش سنج مقاومت الکتریکی (Electrical-Resistance Strain Gauge) را ابداع نمودند که کرنش سنج اخیر، اولین بار در سدهای بتنی مورد استفاده قرار گرفت. در همین زمان U.S. Bureau به منظور پایش عملکرد سد و انطباق آن با فرضیات طراحی، ابزاربندی سدها را در دستور کار قرار داد. کوشش‌های اولیه برای استفاده از کرنش سنج‌ها در سدهای بتنی به سرعت وارد مشکلات متعددی گردید. با اندازه‌گیری کرنش‌های ایجادشده در بازه‌های زمانی درازمدت، مشاهده شد اندازه‌گیری‌ها تحت تأثیر عوامل زیادی به غیر از تغییرات تنش می‌باشند که از آن جمله می‌توان به انقباض و انبساط بتن به دلیل تغییرات درجه حرارت و رطوبت، واکنش قلیایی مصالح، خزش و تغییرات زمانی مدول الاستیسیته اشاره نمود. با توجه به این مشکلات، سلول‌های تنش بتن ساخته شدند. پس از مدتی مشخص شد در این ابزار نیز علی‌رغم آن که تنش، مستقل از کرنش اندازه‌گیری می‌شود، مشکلات خاصی وجود دارد که مهم‌ترین آن اثرات حرارتی است. با وجود آن که در طول سالیان گذشته پیشرفت‌های زیادی در تکامل ساخت ابزارهای مذکور و روش‌های اجرای آن‌ها با هدف کاهش مشکلات فوق صورت گرفته اما همچنان برخی مشکلات در به کارگیری این تجهیزات وجود دارد؛ به طوری که امروزه نیز اندازه‌گیری تنش بتن دشوار است (Sellers, 2003).

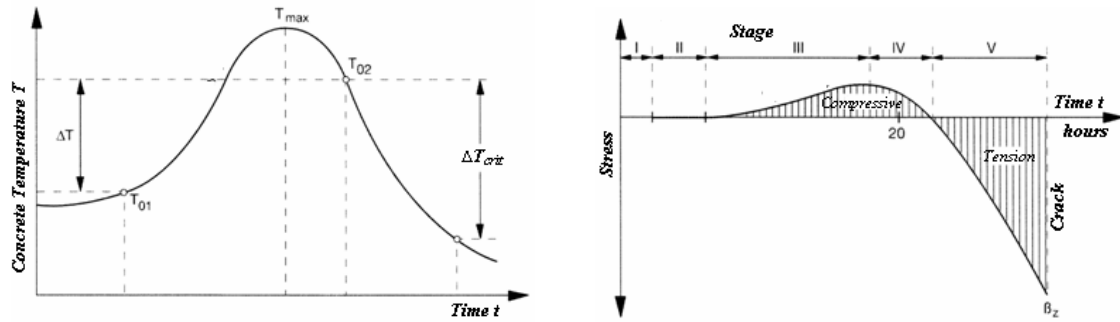
علی‌رغم مشکلات مربوط به تبدیل کرنش به تنش، این روش همچنان مورد استفاده قرار می‌گیرد. اندازه‌گیری مستقیم تنش، نیازمند روش نصب دقیق ابزار برای دستیابی به برقرای تماس کامل بین سلول و بتن است. به‌علاوه اثرات حرارتی بر نتایج سلول تنش به‌اندازه‌ای بزرگ است که می‌تواند تغییرات تنش ناشی از بارگذاری خارجی را تحت تأثیر قرار دهند. در این ارتباط باید فعالیت‌های بیشتری در جهت کمی‌نمودن این اثرات انجام گیرد تا با محاسبه و اعمال آن‌ها به‌صورت ضرایب تصحیح، نتایج اندازه‌گیری اصلاح گردد. Sellers پیشنهاد نمود که نصب کرنش‌سنج در مجاورت سلول تنش در بتن می‌تواند در درک بهتر نتایج مربوط به سلول تنش مفید باشد (Sellers, 2000). با وجود این‌که تطابق مناسب مابین نتایج کرنش‌سنج و سلول تنش ممکن است مشاهده شود ولی این امر معمولاً پس از گذشت یک بازه زمانی از بتن‌ریزی اولیه روی می‌دهد.

در تحقیق حاضر، یک نمونه بتنی تحت شرایط کنترل‌شده در آزمایشگاه، به‌وسیله سلول تنش، کرنش‌سنج و دماسنج ابزاربندی شده و نتایج ابزار اندازه‌گیری در طول فرایند گیرش و پس از آن کنترل و با یکدیگر مقایسه گردیده است. در این راستا کنترل تئوری‌های موجود در مورد تغییرات تنش-کرنش و دما در بتن در حال گیرش و بررسی مشکلات و عوامل موثر بر نتایج ابزار در بتن، مدنظر بوده است. آزمایش‌های مربوطه در آزمایشگاه دانشکده نقشه‌برداری و ژئوتکنیک دانشگاه صنعتی کلاوستهال آلمان انجام گرفته است.

۲- روند تغییرات تنش و دما در زمان گیرش بتن

فرایند هیدراسیون، موجب افزایش حرارت بتن می‌شود. گرم‌شدن بتن، سبب افزایش حجم آن شده و در صورتی که تغییرشکل توده بتن در مرزهای بیرونی به‌وسیله قالب محدود شده باشد، تنش‌های فشاری در آن ایجاد می‌شود. فرایند گیرش بتن را می‌توان در پنج مرحله زیر تقسیم‌بندی کرد (شکل ۱):

- مرحله I: حدود صفر تا دو ساعت
- مرحله ابتدایی و بدون افزایش حرارت (مرحله آرامش)
- مرحله II: حدود دو تا پنج ساعت
- افزایش حرارت از طریق هیدراسیون؛ عدم وجود تنش‌های قابل اندازه‌گیری؛ کرنش حرارتی بتن تازه به‌صورت کرنش فشاری؛ رسیدن دما در انتهای این مرحله به T_{01}
- مرحله III: حدود شش تا نه ساعت
- ادامه روند افزایش دما در بتن؛ افزایش سختی بتن؛ ایجاد تنش فشاری؛ آزادشدن بخشی از تنش فشاری در اثر پدیده Relaxation؛ رسیدن دما در انتهای این مرحله به T_{max}
- مرحله IV: حدود نه تا یازده ساعت
- کاهش دما؛ آزادشدن بخشی از تنش فشاری در اثر پدیده Relaxation؛ رسیدن دمای بتن به T_{02} که به‌علت سرمایش و انقباض بیش‌تر از T_{01} می‌باشد.
- مرحله V: حدود یازده تا پانزده ساعت
- ادامه سرمایش بتن؛ افزایش تنش کششی و سپس کاهش محدود آن در اثر پدیده Relaxation؛ ایجاد ترک در صورت افزایش تنش کششی از مقاومت کششی بتن (ΔT_{crit})



شکل ۱: روند تغییرات تنش و دما در زمان گیرش بتن (Weigler and et al., 1974)

۳- شرایط آزمایش

برای بررسی نتایج ابزار، از نمونه بتن سیلندری شکل که با سه کرنش‌سنج، یک سلول تنش و دو دماسنج ابزاربندی شده، استفاده شد. قرائت ابزار، بلافاصله پس از بتن‌ریزی نمونه آغاز شد؛ به طوری که تغییرات دما، کرنش و تنش به طور کامل در طول فرایند گیرش بتن، ثبت گردید. مشخصات ابزار مورد استفاده و شکل آن‌ها به ترتیب در جدول ۱ و شکل ۲ ارائه شده است.

جدول ۱: مشخصات ابزار مورد استفاده در تحقیق

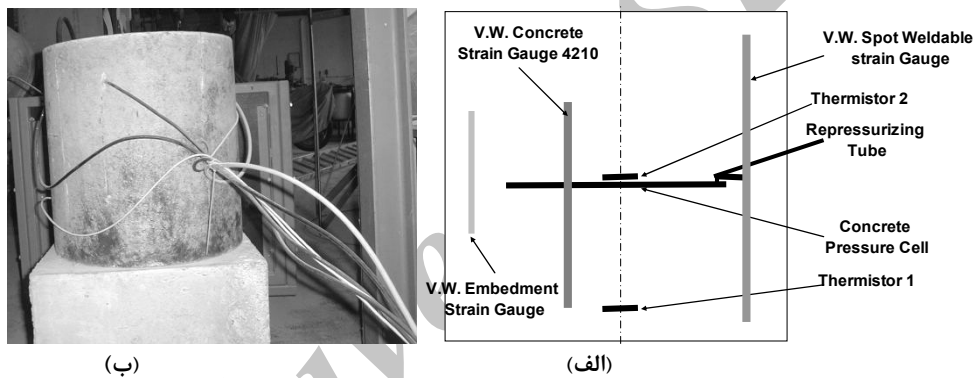
نوع ابزار	مدل	دامنه اندازه‌گیری	دقت	ابعاد	شرکت سازنده	کاربرد
سلول تنش بتن	4850-2	۲ MPa	۰/۱ %	-	Geokon	اندازه‌گیری تنش در بتن
کرنش‌سنج بتن	VCE-4210	۳۰۰۰ $\mu\epsilon$	۰/۴ $\mu\epsilon$	۲۶۰ mm	Geokon	اندازه‌گیری کرنش در توده بتن با ماسه درشت‌دانه
کرنش‌سنج Spot-Weldable	1320500	۲۵۰۰ $\mu\epsilon$	-	۴۰۰ mm	Interfels	اندازه‌گیری کرنش در اجزای فولادی
کرنش‌سنج بتن	52640126	۳۰۰۰ $\mu\epsilon$	۱ $\mu\epsilon$	۱۵۳ mm	Slope Indicator	اندازه‌گیری کرنش در ستون‌ها و دیوارهای حایل
دماسنج	3800	-	-	-	Geokon	اندازه‌گیری دما

در این تحقیق از نمونه بتنی سیلندری شکل، با قطر و ارتفاع به ترتیب ۵۰ و ۴۸ سانتی‌متر استفاده شده است (شکل ۳-الف). به منظور مقایسه نتایج اندازه‌گیری، سنسورها در مکان‌های یکسان نصب شدند. سلول تنش در وسط استوانه بتنی و کرنش‌سنج‌ها در فاصله حدودی ۵ سانتی‌متری قالب بتنی جانمایی شدند. شکل ۴-ب) مقطع عرضی جانمایی ابزار را در نمونه بتنی نشان می‌دهد.

برای اطمینان از قرارگیری صحیح و دقیق ابزار اندازه‌گیری و عدم تغییر نحوه و محل قرارگیری آن‌ها، تجهیزات مذکور ابتدا بر روی یک اسکلت فلزی محکم، سپس کل مجموعه در داخل قالب استوانه‌ای شکل قرار گرفت و بتن‌ریزی انجام شد. در حین بتن‌ریزی نیز به طور مرتب و به شکل مناسب، بتن نمونه ویریه گردید (شکل ۴).



شکل ۲: ابزار مورد استفاده



شکل ۳: (الف) - نمونه بتنی ساخته شده، (ب) - مقطع عرضی جانمایی ابزار در نمونه بتنی



شکل ۴: نحوه قرارگیری ابزار در نمونه بتنی

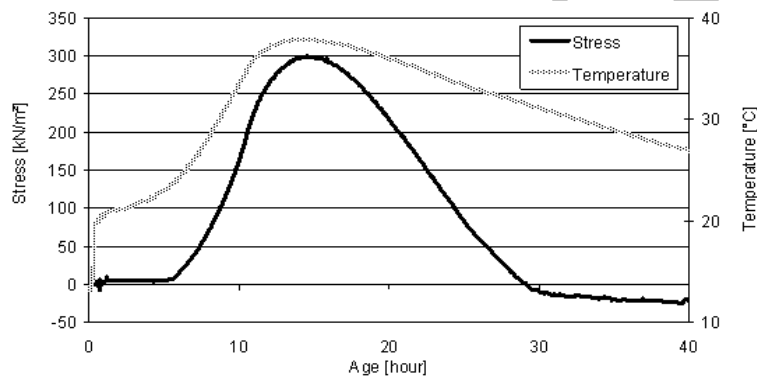
حرارت ایجاد شده در اثر فرایند گیرش بتن بر سلول تنش نیز تاثیر می‌گذارد. مایع پرکننده سلول در طول این مرحله منبسط شده و در نتیجه موجب افزایش ضخامت سلول می‌گردد؛ این موضوع در حالی است که بتن هنوز سخت نشده و به صورت پلاستیک تغییر شکل می‌دهد. پس از پایان فرایند گیرش، دمای بتن کاهش یافته و در نتیجه ضخامت سلول کاهش می‌یابد. حفره ایجاد شده ناشی از این کاهش ضخامت بین سلول تنش و بتن دربرگیرنده با تزریق مایع پرکننده (از طریق تیوپ بازفشارش که در سلول تعبیه شده است) به داخل سلول جبران می‌گردد؛ در نتیجه،

تماس کامل دوباره برقرار شده و تنش واقعی اندازه‌گیری می‌شود. یک هفته پس از بتن‌ریزی، قالب نمونه جدا شده و بلافاصله با توجه به نتایج سلول تنش، از طریق تیوپ بازفشارش روغن اضافی به داخل سلول تزریق گردید تا از تماس مناسب سلول با بتن دربرگیرنده اطمینان حاصل شود. بتن مورد استفاده در این آزمایش B35 و با نسبت آب به سیمان ۰/۶۷ می‌باشد که نوع سیمان آن CEMI 42.5 است. بتن‌ریزی نیز در دمای ۲۰ درجه سانتی‌گراد آزمایشگاه انجام شد.

۴- نتایج آزمایش

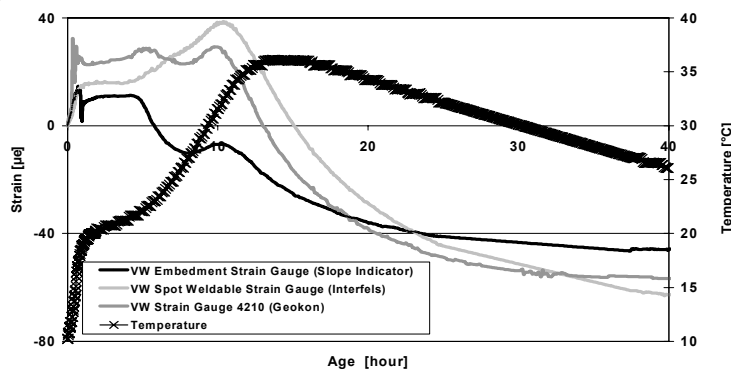
۴-۱- نتایج اندازه‌گیری در بتن تازه

پس از بتن‌ریزی، حرارت ناشی از هیدراسیون موجب افزایش دمای بتن شده و زمانی که دمای حداکثر در بتن ایجاد گردید، تنش فشاری معادل 300 kN/m^2 در نمونه بتنی توسط سلول تنش اندازه‌گیری شد. این تنش، بدون اعمال هیچ‌گونه بارگذاری خارجی ایجاد گردید. با سرد شدن بتن، تنش فشاری ایجاد شده دوباره کاهش یافت؛ به طوری که پس از چند روز، تنش فشاری مربوطه، کمتر از تنش صفر مربوط به کالیبراسیون سلول شد (شکل ۵).



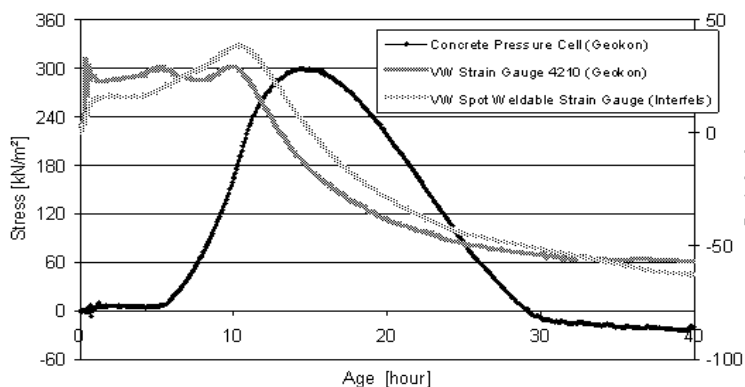
شکل ۵: تغییرات دما و تنش فشاری بتن پس از بتن‌ریزی

شکل ۶ روند تغییرات دما و کرنش اندازه‌گیری شده را نشان می‌دهد. تغییرات دما مشابه شکل ۵ است. کرنش‌های اندازه‌گیری شده در طول ۱۰ ساعت اولیه پس از بتن‌ریزی تقریباً ثابت بوده و در ادامه کاهش مستمر را نشان می‌دهد؛ به طوری که کرنش منفی تا حدود ۲۳ ساعت اولیه با سرعت زیاد و پس از آن با سرعت کمتر ادامه می‌یابد. نکته قابل توجه این است که کاهش حجم (کرنش منفی) اندکی پیش از دمای حداکثر در نمونه بتنی آغاز می‌شود.



شکل ۶: تغییرات دما و کرنش بتن پس از بتن‌ریزی

در شکل ۷ نتایج سلول تنش و کرنش‌سنج‌ها در طول دو روز اولیه پس از بتن‌ریزی مقایسه شده‌اند. روند کرنش‌های اندازه‌گیری شده توسط دو کرنش‌سنج تقریباً مشابه روند تغییرات تنش اندازه‌گیری شده توسط سلول تنش می‌باشد. با افزایش سختی بتن، تنش‌های اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد. حداکثر تنش کمی پیش از رسیدن به دمای حداکثر ایجاد می‌گردد.

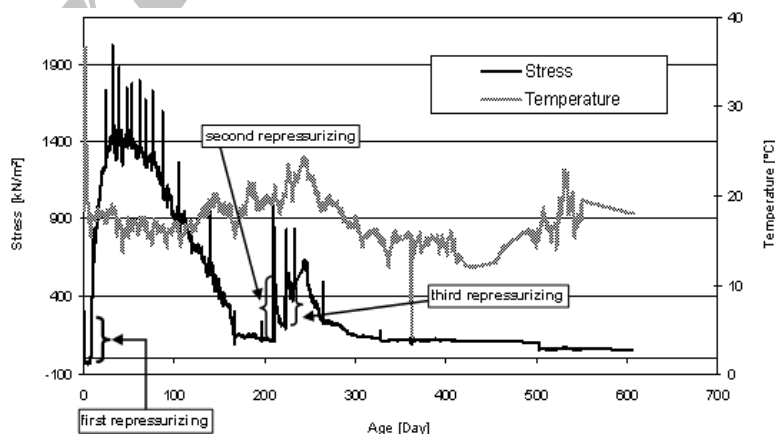


شکل ۷: مقایسه نتایج سلول تنش و کرنش‌سنج‌ها در طول دو روز اولیه پس از بتن‌ریزی

۲-۴- نتایج اندازه‌گیری در بتن سخت‌شده

۴-۲-۱- سلول تنش بتن

همان‌طور که اشاره گردید پس از گذشت ۷ روز از بتن‌ریزی، نمونه آزمایشی قالب‌برداری شده و با تزریق روغن اضافی به داخل سلول، بارگذاری صورت گرفت. به‌منظور بررسی دقت اندازه‌گیری سلول تنش و چگونگی تماس مابین سلول و بتن، نمونه بتنی در مقاطع زمانی مختلف بارگذاری شد (شکل ۸). خطوط عمودی ظاهر شده در نمودار شکل ۸ بیانگر بارگذاری خارجی در مقاطع زمانی مختلف می‌باشد. با گذشت زمان تنش‌های اندازه‌گیری شده توسط سلول افزایش یافته و بالغ بر 1400 kN/m^2 گردید. پس از طی ۳۰ روز، تنش‌ها تقریباً ثابت شده و در طول ۱۵۰ روز بعدی کاهش یافت. کاهش تنش می‌تواند ناشی از پدیده Relaxation و خشک‌شدگی بتن باشد.

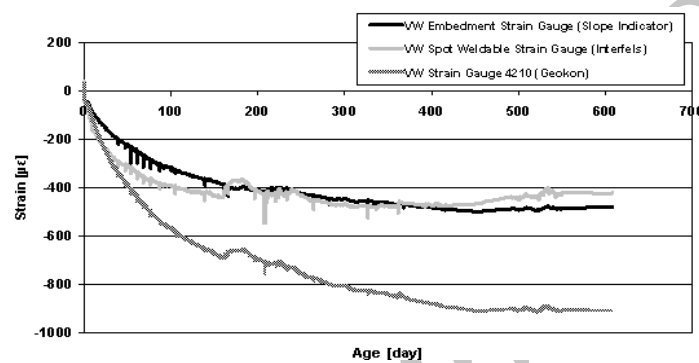


شکل ۸: نتایج اندازه‌گیری سلول تنش

پس از کاهش تنش (حدود ۲۰۰ روز)، تغییری در نتایج مشاهده نشد. با گذشت ۲۱۰ روز سلول تنش برای بار دوم با تزریق روغن اضافی منبسط گردید. به دنبال فرآیند تزریق دوم، رفتار مشابه بار اول تکرار شد. به طوری که تنش‌ها ابتدا افزایش یافته و سپس کاهش پیدا نمودند. نتیجه مشابهی پس از تزریق سوم نیز تکرار شد. در هر یک از بازه‌های زمانی پس از تزریق روغن به داخل سلول، ابتدا تنش‌های نزدیک به واقعیت اندازه‌گیری شد ولی پس از گذشت مدت زمانی، به علت ایجاد حفره در سطح تماس مابین سلول و بتن، تنش‌های اندازه‌گیری شده کمتر از مقدار واقعی گردید.

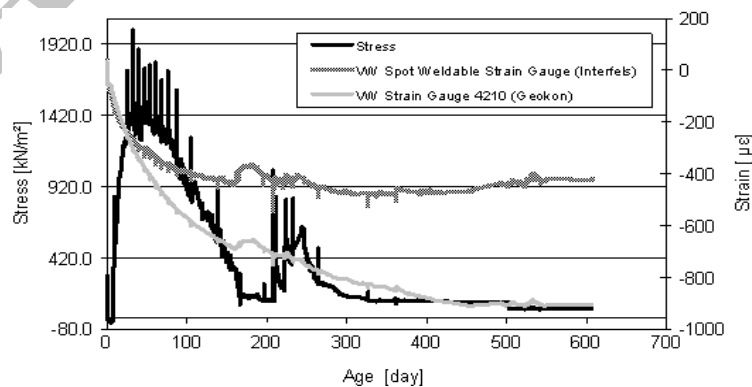
۴-۲-۲- کرنش سنج‌ها

شکل ۹ روند تغییرات کرنش اندازه‌گیری شده توسط کرنش‌سنج‌ها را نشان می‌دهد. همان‌گونه که مشاهده می‌شود سرعت تغییرات کرنش با گذشت زمان کاهش یافته و پس از طی مدتی ثابت می‌گردد.



شکل ۹: نتایج اندازه‌گیری کرنش‌سنج‌ها

در شکل ۱۰ نتایج مربوط به کرنش‌سنج‌ها و سلول تنش با یکدیگر مقایسه شده است. در کرنش‌سنج مدل 4210 در طول ۴۰۰ روز پس از بتن‌ریزی، تغییرات کرنش مشاهده می‌شود در حالی که در کرنش‌سنج مدل Spot-Weldable پس از طی حدود ۲۰۰ روز از بتن‌ریزی تغییراتی در کرنش اندازه‌گیری شده، دیده نمی‌شود. این اختلاف می‌تواند مرتبط با خصوصیات کرنش‌سنج‌ها باشد. سختی و طول بزرگ‌تر کرنش‌سنج مدل Spot-Weldable، ایجاد کرنش در مجموعه به هم پیوسته ابزار را تعدیل می‌نماید. در حالی که طول کوتاه ابزار اندازه‌گیری، منجر به ایجاد کرنش‌ها موضعی در بخش‌های میانی نمونه بتنی که هنوز سخت نشده، می‌شود.



شکل ۱۰: مقایسه نتایج سلول تنش و کرنش‌سنج‌ها

۵- نتیجه گیری

با نصب سلول تنش در بتن و پس از سخت‌شدگی آن (تا حدی که تغییرشکل‌های پلاستیک در بتن رخ ندهد)، می‌توان فرایند گیرش بتن را رفتارنگاری نمود. کاهش تنش اندازه‌گیری شده می‌تواند نشانه ایجاد حفره و در نتیجه عدم برقراری تماس کامل بین سلول تنش و بتن اطراف آن باشد که در این هنگام می‌باید با تزریق روغن از طریق تیوپ با فشارش سلول، نسبت به برقراری مجدد تماس کامل مابین سلول و بتن اقدام نمود.

در این تحقیق از سه مدل مختلف کرنش‌سنج (از نوع تار مرتعش) استفاده شد. نتایج نشان داد که سختی ابزار بر نتایج اندازه‌گیری کرنش‌سنج‌ها تاثیر می‌گذارد، به طوری که با افزایش سختی، کرنش‌های اندازه‌گیری شده کاهش می‌یابد. نتایج همچنین نشان می‌دهند که کرنش‌سنج مدل VCE-4210 که حساسیت بیشتری نسبت به کرنش‌سنج‌های دیگر دارد، تغییرشکل بیشتری را اندازه‌گیری می‌نماید.

با وجود آن که روند تغییرات دما و تنش اندازه‌گیری شده در این تحقیق، تطابق مناسبی با تئوری‌های موجود دارد؛ اما موضوع تبدیل رفتار تنش-کرنش ابزار به رفتار تنش-کرنش سازه مرکب ابزار-بتن، همچنان همراه با عدم اطمینان است. تغییرات زیاد مدول الاستیسیته بتن در طول زمان نیز تبدیل نتایج کرنش‌سنج‌ها را به تنش مشکل می‌سازد که این امر با توجه به اختلاف مدول الاستیسیته کرنش‌سنج و بتن و همچنین عدم اطمینان به نتایج تنش‌سنج‌ها، افزایش می‌یابد.

با توجه به این که تغییرات تنش و کرنش در طول فرایند گیرش بتن، تحت تاثیر عوامل متعددی است که می‌تواند تغییرات تنش واقعی ناشی از بارگذاری خارجی را متاثر سازد، بهتر است برای بررسی و اندازه‌گیری تنش‌های مذکور، نتایج اندازه‌گیری پس از پایان فرایند گیرش مورد استفاده قرار گیرد. در این راستا انجام تحقیق‌های آزمایشگاهی و صحرایی در مقیاس‌های مختلف و با هدف بررسی جداگانه عوامل موثر بر نتایج ابزار در بتن و به دست آوردن ضرایب تصحیح مناسب برای عوامل مذکور، مورد نیاز است.

۶- منابع

1. Sellers, B.; The measurement of stress in concrete, Field Measurement in Geomechanics, ISBN 90 5809 602 5, 2003, pp. 643-656.
2. Sellers, B.; Temperature effects on earth pressure and concrete stress cells, Geotechnical News, Vol. 18, No. 1, 03/ 2000.
3. Weigler, H.; Karl, S.; Junger beton, beanspruchung – festigkeit - verformung, Betonwerk + Fertigteiltechnik 40, 1974, H. 6 und 7.