دانشگاه لرستان
دانشکده فنی و مهندسی

فصلنامه مهندسی عمران و سازه

دوره (۱) ، شماره (۲) ، پاییز ۱۳۹۶
شماره شاپا : ۳۲۸۳-۲۵۸۸

مروری بر روند شکل گیری و توسعه بتن خود احساس

محمد رضائی[1*]، ابراهیم خلیل زاده وحیدی[2]

۱- دانشجوی دکتری عمران سازه، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه ، ایران
۲- استادیار گروه مهندسی عمران، دانشکده فنی و مهندسی، دانشگاه رازی، کرمانشاه ، ایران
[*]پست الکترونیکی نویسنده مسئول: mohammad.rezaei1367@yahoo.com

چکیده

بتن ذاتا خودحس (ISSC) به یک مادۀ سازه ای اطلاق می شود که می تواند بدون نیاز به جاگذاری یا اتصال حسگر یا کنترل از راه دور، خود را پایش کند. با اندازه گیری مقاومت الکتریکی ISSC، تنش، کرنش، ترک و آسیب می تواند درجا پایش شود. در مقایسه با مواد سازه ای معمولی که نیاز به حسگرهای اضافی برای پایش یا ردیابی هست، ISSC به دلایل ذیل دارای مزیت است: حساسیت بالا، خاصیت خوب مکانیکی، سازگاری طبیعی، طول عمر یکسان، نصب و نگهداری آسان. ISSC می تواند برای پایش سلامتی سازه ای، ردیابی ترافیک و امنیت مرزی و نظامی به کار رود. در این مقاله به صورت سیستمی، پیشرفت تحقیقات ISSC را با توجه به ترکیبات آن، روشهای ساخت، روشهای تست سیگنال حسی، خواص حسی و مکانیزم تولید و کاربردهای ساختاری معرفی می کنیم. چالشهای آینده در توسعه و کاربرد ISSC نیز بحث خواهد شد.

کلمات کلیدی

بتن خوداحساس، روش ساخت، خواص الکتریکی.

تاریخ دریافت مقاله: ۱۳ مهر ۱۳۹۶

تاریخ پذیرش مقاله: ۲۸ آذر ۱۳۹۶

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

۱- مقدمه

بتن دومین منبع مورد استفاده بعد از آب در جهان است. اکثر زیرساخت‌ها در جهان با بتن ساخته می شوند. با این‌حال به خاطر خرابی مصالح بتن، پیچیدگی واکنش بین مصالح بتن و محیط مربوطه، عدم وجود طراحی پیشرفته و ابزار برای ارزیابی شرایط و تعمیرات زمان‌مند، بسیاری از سازه های بتنی در شرایط غیر قابل تعمیر هستند و تلاش زیادی برای برگرداندن زیرساخت‌های خراب به شرایط سالم قبلی لازم است. بتن خود حس ذاتی (ISSC) یک مادۀ ایده‌آل مهندسی برای پرداختن به این موضوع است. این مادۀ هوشمند می تواند به پژوهشگران کمک کند تا زیرساخت هوشمندی را که قابلیت حسگری و پایش سلامتی دارد توسعه یابد بنابراین کاربری، ایمنی، قابلیت اعتماد و دوام زیرساخت‌ها بهبود می یابد. ISSC روش جدیدی برای حفظ توسعۀ پایدار در مواد و سازه های بتنی فراهم می کند [۱-۴].

ISSC (بتن خودپایش، ذاتا هوشمند، پیزومقاومت یا حساس به فشار نیز نامیده می شود) که با افزودن برخی فیلرهای وظیفه ای مانند الیاف کربنی (CF)، نانولولۀ کربنی (CNT)، و پودر نیکل (NP) به بتن معمولی ساخته می شود تا قابلیت حس کرنش، تنش، ترک یا آسیب را افزایش دهد در این شرایط خواص مکانیکی و دوام آن حفظ یا بهبود می یابد. فیلرهای وظیفه ای در ماتریس بتن پراکنده هستند تا شبکۀ رسانا و بزرگی درون کامپوزیت بتن تشکیل دهند. چنانچه در اثر نیروی خارجی یا عملکرد محیط، این کامپوزیت تحت تنش یا تغییر شکل قرار گیرد شبکۀ رسانای درون آن تغییر کرده و بر رفتارهای الکتریکی آن اثر می گذارد. کرنش ، تنش ، ترک و آسیب تحت شرایط استاتیکی یا دینامیکی را می توان با اندازه گیری خواص الکتریکی کامپوزیت ردیابی کرد. ISSC دو عملکرد سازه ای و حسگری دارد بنابراین نیاز برای حسگرهای اضافی را برطرف می کند. ISSC نه تنها توانایی پایش سلامتی سازه و ارزیابی شرایط سازه های بتنی را دارد بلکه می تواند برای ردیابی ترافیک (رفت و آمد)، پایش خوردگی آرماتورها، امنیت نظامی و مرزها، کنترل ارتعاش سازه ای و غیره بکار رود. رفتار ذاتی خودحسی بتن در بدو امر در سال ۱۹۹۲ مورد بررسی قرار گرفت. از آن زمان بسیاری از تحقیقات روی خواص حسی، مکانیزم حس و کاربرد ساختاری ISSC با فیلرهای مختلف وظیفه ای انجام شده است . فیلرهایی مانند CF، الیاف فولاد(SF)، پودر گرافیت (GP)، سرباره فولاد (SS)، NP، نانوالیاف کربنی (CNF)، آهن هیبریدی دارای دانۀ رسانای وظیفه ای و CF در این کامپوزیت ها مورد استفاده قرار می گیرد. در دو دهۀ گذشته تلاش‌ها معطوف به توسعۀ ISSC بوده است و دستاوردهای نوآورانۀ زیادی در توسعه و کاربرد ISSC حاصل شده است. قلمرو این مقاله فراهم آوری نگرشی سیستماتیک بر پیشرفت و ترقی در طراحی، ساخت، اندازه گیری، تعیین خصوصیات، خواص حسی و مکانیزم تولید و کاربردهای سازه ای ISSC می باشد. چالشهای آینده برای پیشرفت مستمر و توسعۀ ISSC و سازه ها نیز بحث خواهد شد [۵-۱۱].

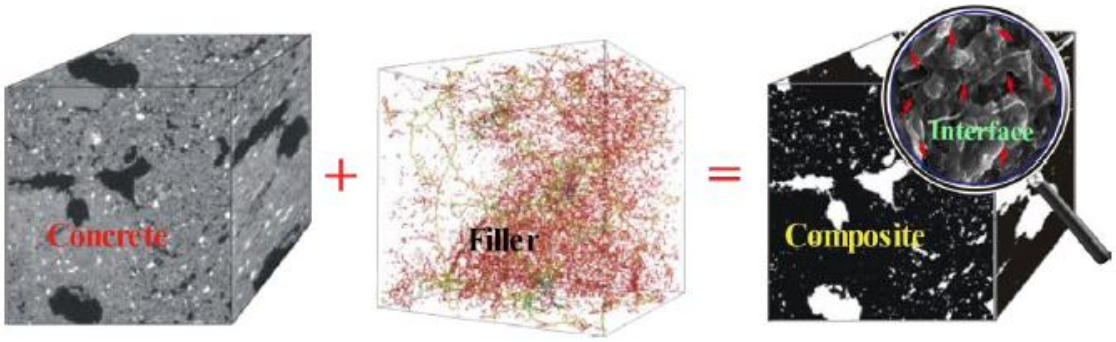
۲- ترکیبات ISSC

ISSC با داشتن ساختاری بسیار پیچیده، یک کامپوزیت چند فازی، چند مقیاسی و چند جزئی است. در سطح ماکروسکوپی، ISSC را می توان دو فازی در نظر گرفت که دارای فیلرهای وظیفه ای است که در ماتریس بتن پراکنده هستند (شکل ۱). فاز فیلر در فاز ماتریس بتن پخش شده است تا شبکه ای رسانا ایجاد گردد. فاز ماتریس بتن متشکل از دانه های معدنی است که با یک چسب به هم چسبیده اند و فیلرهای وظیفه ای را نگه داشته و در جای خود حفظ می کنند. در اینجا عامل چسب کننده می تواند سیمان، آسفالت یا حتی پلیمر باشد.

در سطح میکروسکوپی، در ISSC فاز سومی وجود دارد که شامل فصل مشترک بین فیلرها و ماتریس بتن و بین فیلرها است. از آنجا که فیلرها در مقیاس میکرو یا نانو هستند نواحی بالقوۀ فصل مشترک فیلر-ماتریس و فیلر-فیلر بسیار بزرگ هستند. این فصل مشترک‌ها بر کیفیت اتصال الکتریکی بین فیلرها و ماتریس بتن و بین فیلرها تاثیر گذاشته و در نتیجه بر شبکۀ رسانایی و رسانایی الکتریکی ISSC

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

اثر می گذارد. بنابراین آنها تاثیر بزرگی بر رفتار حسی ISSC دارند. برخی محققین این موضوع را تایید کرده و خواص حسی ISSC را با تغییر فصل مشترک بین فیلرها و ماتریس اصلاح کرده اند.



شکل ۱: ساختار ISSC

معمولا موادی که برای ساخت ISSC استفاده می شوند به سه دسته تقسیم می شوند: مادۀ ماتریس، فیلر وظیفه ای و ماده ای برای کمک به پراکنش فیلر. انتخاب مواد مناسب و تعیین نسبت آنها (یعنی طراحی نسبت اختلاط) برای ساخت ISSC ضروری است.

۲-۱- مادۀ ماتریس

مادۀ ماتریس آن جزئی است که فیلر وظیفه ای را به هم نگه داشته تا تودۀ کامپوزیت را شکل دهد بنابراین تمام انواع بتن می تواند به عنوان ماتریس ISSC به کار رود. در اینجا بتن یک مفهوم عام است که فقط شامل بتن (دارای دانه های ریز و درشت)، ملات (دارای دانه های ریز) و مادۀ چسبنده است. در مطالعات قبلی بتن سیمان پرتلند معمولی مکررا به عنوان مادۀ ماتریس ISSC بکار رفته است زیرا سیمان پرتلند پر استفاده ترین ماده بعنوان چسباندگی بوده است. علاوه بر سیمان پرتلند، سیمان سولفوآلومینات، سیمان سرباره قلیایی فعال، آسفالت و پلیمر نیز بعنوان چسب کننده در تهیۀ ISSC بکار رفته اند. از آنجا که تحقیقات قبلی عمدتا بر خواص حسی ISSC با سیمان متمرکز بوده است از این به بعد ISSC به بتن سیمان اطلاق می شود مگر آنکه به صراحتا مشخص شده باشد.

اگر چه ماتریس بتن فاقد خاصیت حسی است یا در آن خاصیت ضعیف می باشد با این‌حال برخی خواص ماتریس سیمان بر خواص حسی تاثیر زیادی می گذارد. این بدان علت است که توانایی حس کردن به شدت به رفتار مکانیکی (یعنی تنش، کرنش، آسیب و ...) و رسانایی الکتریکی وابسته است در حالی‌که خواص مکانیکی (مثل تنش نهایی/کرنش، مدول یانگ) ISSC به شدت به خواص مکانیکی ماتریس وابسته است. به علاوه انواع و نسبت اختلاط مواد انتخاب شده برای ماتریس برای تهیۀ بتن (مثل نوع سیمان و درجۀ استحکام، استفاده از عامل کاهندۀ آب، نسبت آب سیمان و افزودن دانه ها) نیز بر نحوۀ پراکنش فیلرها، پخش فیلرها در ماتریس و خواص مکانیکی کامپوزیت موثر است بنابراین قابلیت حسگری کامپوزیت را تحت تاثیر قرار می دهد.

۲-۲- فیلر وظیفه ای

فیلر وظیفه ای جزئی اساسی برای ISSC است زیرا در خاصیت حسی ISSC نقشی غالب دارد. بعلاوه اینکه هیبریدهای ترکیبی می توانند خواص حسی را در ISSC بهبود بخشند این موضوعی است که نمی توان آن را از یک فیلر به تنهایی به دست آورد. این امر می تواند به عنوان اثری مکمل به بهبود خواص حسی فیلرهای مختلف کمک کند.

تا الان بیشتر تلاشها معطوف به بررسی ISSC با CF در مقیاس نانو بوده است. CB مزیتهایی مثل وزن سبک، پایداری شیمیایی و حرارتی بالا، رسانایی الکتریکی دائمی و قیمت پایین دارد. امروزه CB یکی از متداول ترین فیلرهای مورد استفاده برای حس دادن به

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

بتن است. لازم به ذکر است که برخی درصد، به محققین ISSC را شبیه فیلرهای الیافی، با ترکیب کردن CB به قطر ۳۰ نانومتر و غلظت زیر ۱ بتن ساخته اند. در SS محتوای بالایی از $Fe_{1-\sigma}O$ و دیگر اکسیدهای فلزی وجود دارد. $Fe_{1-\sigma}O$ شامل FeO، Fe_2O_3 و Fe_3O_4 می باشد. مقاومت ویژۀ FeO و Fe_3O_4 به ترتیب $5x10^{-2}$ و $4x10^{-3}$اهم سانتیمتر می باشد که تقریبا با CF پایۀ قیر (Pitch-based) برابر است. در نتیجه SS خاصیت رسانایی الکتریکی خوبی از خود نشان می دهد. همچنین SS را می توان به عنوان دانه بجای دانه های طبیعی به بتن افزود که برای کاهش آلودگی محیطی و مصرف منابع، مفید می باشد. بنابراین SS نوعی فیلر امید بخش است زیرا هم به عنوان فیلر وظیفه ای و هم بعنوان دانه عمل می کند. NP دارای رسانایی الکتریکی عالی، مقاومت به خوردگی ناشی از قلیایی های تند (بتن سیمان بسیار خاصیت قلیایی دارد، pH حدود ۱۲-۱۳) و دارای خواص مکانیکی خوب است. علاوه بر این، NP تیز و کروی دارای نوک نانویی تیز در سطح است که می تواند اثر انتشار میدانی را القاء کند. ISSC با NP در بین تمام ISSC های گزارش شده دارای بالاترین خاصیت حسی است. لازم به توضیح است که رفتار خودحسی بتن بشدت به برخی پارامترهای فیلرها مثل جزء ماده، قالب(مانند شکل، اندازه، طول، وضعیت سطح و درجۀ دانه ها و توده بودن) و میزان غلظت بستگی دارد. نتایج تحقیقات ISSC فوق الذکر نشان می دهند که فیلرهای الیافی نسبت ابعادی بالایی داشته (یعنی نسبت طول به قطر)، و می توانند قابلیت حسگری بتن را در غلظتی کمتر از فیلرهای ذره ای بهبود دهند. غلظت موثر فیلرهای الیافی بیش از ۱ درصد نیست در حالیکه برای فیلرهای ذره ای حداقل ۵ درصد است. با اینحال در مقایسه با فیلرهای ذره ای، در خصوص پراکنش فیلرهای الیافی باید توجه ویژه ای مصروف داشت زیرا فیلرهای الیافی در حین تولید بتن به سختی پراکنده شده و به آسانی آسیب می بینند.

۲-۳- مادۀ پخش کننده

فیلرهای وظیفه ای که در ساخت ISSC بکار می روند معمولا در مقیاس نانو یا میکرون هستند که پراکنش آنها در بتن یک چالش است. با افزایش مساحت سطح فیلرها، نیروهای جاذب بین فیلرها افزایش می یابد. مخصوصا برای فیلرهای الیافی نسبت‌های ابعادی بالا بهمراه انعطاف پذیری بالا، امکان درهم تنیدگی و کلوخه شدن نزدیک به هم را افزایش می دهد. بنابراین برخی مواد پخش کنندۀ موثر برای کمک به پراکنش فیلر و بهبود همگنی در ماتریس بتن، لازم می باشند. استفاده از مواد پخش کننده سه مزیت دارد: ایجاد خواص حسی و مکانیکی تجدید پذیر و پایدار، تحقق کامل اثر بهبود فیلرها (یعنی کاهش سطح غلظت فیلر) و کاهش مصرف انرژی اختلاط مکانیکی. یک مادۀ ایده آل برای پخش کنندگی باید قابلیت پخش مطلوب و سازگاری خوب با ماتریس را داشته و در عین حال بدون اثر منفی یا اثر منفی کمی بر هیدراسیون سیمان و قابلیت کارکرد و خواص مکانیکی بتن داشته باشد. مواد پخش کننده به دو شیوه طبقه بندی می شوند: سورفکتانت (مواد فعال سطحی) و مخلوط معدنی. قابلیت پخش کنندگی سورفکتانت با خیس کردن، دافعۀ الکترواستاتیکی و اثرات ممانعت فضایی یا فقط با اثرات ممانعت فضایی قابل حصول است در حالی که برای مخلوط معدنی این امر با درجه بندی، جذب و اثرات جدایش یا فقط با اثرات جدایش بدست می آید. بعلاوه، سورفکتانتهای مختلف یا مخلوط سورفکتانت و مخلوط معدنی اغلب با هم استفاده می شود. سورفکتانت موثر یا مخلوط معدنی برای فیلرهای وظیفه ای مختلف متفاوت هستند. وقتی چنین مواد پخش کننده ای در ISSC ترکیب می شوند راندمان پراکنش به شدت به غلظت مواد پخش کننده، ترکیب ISSC، خواص سیال شناسی (رئولوژی) ISSC و غیره وابسته است. پراکنش موثر فیلرهای وظیفه ای بویژه الیاف یا ذرات نانویی یک چالش محسوب می شود و به قدر کافی مطالعه و بازبینی شده است. جزئیات بیشتر در مراجع مربوطه قابل دستیابی است.

۲-۴- طرح نسبت اختلاط

طرح نسبت اختلاط برای ISSC بر اساس روش طرح نسبت اختلاط بتن معمولی است. با اینحال حضور فیلر خاصیت رئولوژی و قابلیت کارکرد بتن تازه را بدلیل مساحت سطح ویژۀ بالا، تحت تاثیر قرار می دهد. همچنین استفاده از برخی مواد پخش کننده می تواند بر قابلیت کارکرد و برخی خواص مکانیکی ISSC اثر بگذارد. بنابراین لازم است که نسبت اختلاط خاص ISSC از طریق ترکیب روش

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

طرح نسبت اختلاط برای بتن معمولی و روش اختلاط آزمایشی، بدست آید. از آنجا که اجزاء ISSC و تاثیر آنها بر خواص کامپوزیت خیلی پیچیده است برخی روشهای طرح آزمایش موثر ضروری می باشند از جمله: طرح ارتوگونال و طرح یکنواخت برای دستیابی به یک فرمول طرح نسبت اختلاط مناسب یا بهینه.

۳- ساخت ISSC

ISSC به عنوان یک کامپوزیت یک سیستم چند جزئی با ویژگیهای دینامیکی و ترمودینامیکی پیچیده است. فناوری ساخت موثر برای ترکیب هر جزء در کامپوزیت نیاز به بررسی دارد تا کامپوزیتی با خواص پایدار و تجدید پذیر به دست آید. عموما ساخت شامل سه مرحله است: اختلاط/پراکنش، مدل کردن و کیورینگ.

۳-۱- اختلاط/پراکنش

برای ISSC اختلاط با پراکنش برابر است که شامل پراکنش فیلر در ماتریس بتن و پراکنش دانه ها در خمیر سیمان است. اختلاط مهمترین مرحله در ساخت کامپوزیت است که به شدت یکنواختی و رفتار حسی ISSC را تحت تاثیر قرار می دهد. فرایند و روش تصویب در اختلاط دو منظر مهم هستند که اثربخشی اختلاط را تحت تاثیر قرار می دهند.

۳-۲- فرایند اختلاط

بر اساس ترتیب افزودن فیلرهای وظیفه ای، مراحل اختلاط در تهیهٔ ISSC می تواند به سه گروه (طبق تصویر ۲) تقسیم شود. این مراحل شامل روش اختلاط اولیه، روش اختلاط همزمان و روش اختلاط انتهایی می باشد. لازم به ذکر است که این مراحل اختلاط باید برای ساخت ISSC با فیلرهای هیبریدی، با هم به کار رود.

۳-۳- روش اختلاط/پراکنش

روشهای موجود اختلاط فیلر را می توان به دو گروه اصلی تقسیم کرد: روشهای فیزیکی و روشهای شیمیایی. روشهای فیزیکی (یعنی روشهای مکانیکی) مانند اختلاط برشی زیاد و آسیاب کروی (Ball milling) می توانند فیلرها را از هم جدا کنند اما این روشها به آسانی فیلرها ،مخصوصا فیلرهای الیافی را قطعه می کنند. این امر نسبتهای ابعادی فیلر را کاهش خواهد داد. امواج فراصوت روش فیزیکی رایج دیگری برای پخش فیلرها در محلول آبی اختلاط آب است. این روش از آسیب به فیلرها جلوگیری کرده و بویژه برای فیلرهای در مقیاس نانو مناسب است.

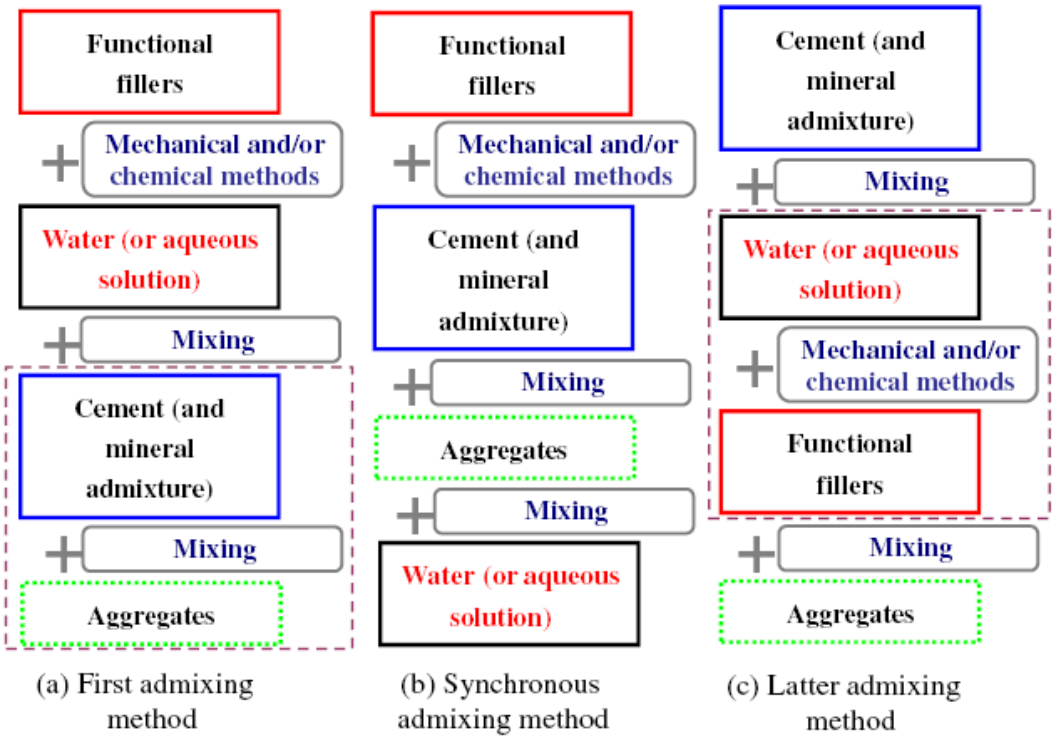
روشهای شیمیایی (یعنی روشهای بهبود سطح) طراحی شده اند تا ساختارهای سطح فیلر را یا از طریق بهبود سطح نا هم ظرفیت (non-covalent) بوسیلهٔ سورفکتنت ها و یا از طریق بهبود سطح هم ظرفیت، تغییر دهند (covalent). این روشها معمولا برای بهبود ترشوندگی سطوح فیلر به کار می رود بنابراین حل شوندگی و پراکنش فیلر را تقویت می کند. روش بهبود سطح هم‌ظرفیت با استفاده از وظیفه ای کردن سطح فیلرها، ترشوندگی آنها را بهبود بخشیده و میل توده شدن را در آنها کاهش می دهد. با این‌حال وظیفه‌ای کردن شیمیایی خورنده مثل استفاده از اسیدهای قوی در دماهای بالا، سبب آسیب ساختاری شده و باعث خواص نامرغوب در فیلرها می شود (مثل کاهش خاصیت مکانیکی، خاصیت الکتریکی، نسبت ابعادی و ...). روش بهبود سطح هم‌ظرفیت بخاطر عدم اختلال در فیلرهای بکر، مصرف انرژی کم و قابل کنترل بودن، بسیار جذاب است.

برای بعضی فیلرها (مثل CF، CNT و CNF)، استفاده از روش منحصرا فیزیکی یا شیمیایی برای جدا کردن آنها از همدیگر مشکل می باشد بنابراین روشهای مختلف شیمیایی و فیزیکی اغلب با هم برای پراکنش فیلرها بکار می رود. علاوه بر این، برای پخش موثر فیلرها

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

در بتن، انرژی اختلاط/پراکنش مناسبی مورد نیاز می باشد. برخی از محققین مشاهده کرده اند که شدت اختلاط و زمان تا حد زیادی بر یکنواختی ISSC اثر می گذارند.

موضوع مهم دیگری که قابل ذکر است چگونگی ارزیابی اثر نهایی اختلاط/پراکنش فیلرها در بتن است. تاکنون چهار روش ارزیابی شامل مشاهدهٔ میکروساختار، اندازه گیری مقاومت الکتریکی، مشاهدهٔ اختلاط تازه و مشاهدهٔ پراکنش برای فیلرها در محلول آبی، در کار تحقیقاتی قبلی استفاده شده است.



شکل ۲: سه مرحلهٔ اختلاط/پراکنش برای ISSC

۳-۴- قالب بندی و کیورینگ

مخلوط ISSC رفتار رئولوژی را نشان می دهد. فناوری موثر قالب بندی برای شکل دهی مخلوط مورد نیاز می باشد. فناوری قالب بندی فشردگی کامپوزیت را تعیین می کند بنابراین کارکرد مکانیکی و حسی کامپوزیت را تحت تاثیر قرار می دهد. شیوه کیورینگ بر محصول هیدراسیون و ساختارهای درون ISSC اثر دارد. همچنین کامپوزیتها خواص مکانیکی متفاوت، چسبندگی متفاوت بین فیلرهای وظیفه ای و ماتریس، و محتوای متفاوت آب تحت شیوه های مختلف کیورینگ را نشان می دهند. بنابراین خاصیت حسی ISSC بسیار به شیوه کیورینگ آن وابسته است.

۳-۵- اندازه گیری سیگنال حسی ISSC

خاصیت حسی ISSC بر تغییر شبکهٔ رسانای درون کامپوزیت استوار است. بنابراین حجم مقاومت/مقاومت ویژه الکتریکی کامپوزیت بطور کامل مشخص کنندهٔ رفتار حسی آن است. به علاوه اینکه برخی از محققین چند پارامتر مفید دیگر (مثل راکتانس، امپدانس، ظرفیت خازنی، مقاومت الکتریکی سطح و ثابت دی الکتریک نسبی) برای توصیف رفتار حسی ISSC یافته اند. از آنجا که حجم مقاومت/مقاومت ویژه الکتریکی دو نشانگر رایج برای تشخیص رفتار حسی ISSC هستند در اینجا اندازه گیری آنها تاکید می شود.

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

۳-۶- روش ساخت الکترود

الکترودها پلی بین ISSC و ابزار اندازه گیری هستند از آنجا که الکترودها رابطهٔ مستقیمی با دقت اندازه گیری سیگنال حسی دارند بنابراین ساخت آنها مسئلهٔ مهمی در تحقیقات و کاربرد ISSC است. ساخت الکترودها برای ISSC دارای سه جنبه است: انتخاب مواد الکترود، فیکس کردن الکترودها و چیدمان الکترودها.

مواد الکترود باید دارای دو ویژگی اساسی باشد: مقاومت الکتریکی پایین و خاصیت رسانایی الکتریکی پایدار. تا کنون موادی که برای الکترود ISSC استفاده شده است عمدتا شامل موارد ذیل بوده است: فلز ورقه ای (مثل مس، فولاد زنگنزن و سرب) با یا بدون سوراخ، فویل فلز (مثل مس، فولاد زنگنزن) شبکه (مش) فلز (مثل مس، فولاد زنگنزن)، حلقه مسی، میلهٔ فلزی (مثل مس، فولاد زنگنزن)، میلهٔ کربنی، نوار/سیم مسی، رنگ رسانا (مثل نقره، مس و رنگ CB). این موارد با هم یا جدای از هم به عنوان الکترود بکار رفته و با شیوه های: اتصالی، جایدهی، آبکاری یا تکه کردن، ثابت می شوند. از میان این روشهای ثابت کردن، اتصال و جایدهی بیشترین کاربرد را دارد. همچنین الکترودهای ISSC معمولا به شکل دو پرابی یا چهار پرابی چیده می شوند.

نتایج آزمایش و شبیه سازی گذشته نشان می دهد که شیوهٔ ثابت کردن و چیدمان الکترودها تاثیر مستقیمی بر توزیع میدان الکتریکی در ISSC دارد بنابراین نتایج اندازه گیری مقاومت ویژهٔ الکتریکی را تحت تاثیر قرار می دهد. در حال حاضر شش طرح آسان و قابل دستیابی برای ثابت کردن و چیدمان الکترود طبق تصویر ۳ وجود دارد. الکترودها روی سطح ISSC در طرح a و b به هم متصل می شوند. این دو طرح بسیار در اندازه گیریهای آزمایشگاهی خواص حسی ISSC بکار رفته اند زیرا در خواص مکانیکی ISSC خللی ایجاد نمی کنند. با این‌حال الکترودهای متصل، در کاربردهای عملی از ISSC جدا می شوند. برای غلبه بر این وضعیت چهار طرح (طبق تصاویر c تا f در تصویر ۳) پیشنهاد می شود. توری مدفون، صفحهٔ سوراخدار یا الکترود حلقوی می تواند اثر تلفیق الکترود را کاهش دهد و یکپارچگی الکترود و ISSC را تضمین می کند. همچنین ISSC می تواند نسبت به الکترودهای مدفون حفاظت ایجاد کند.

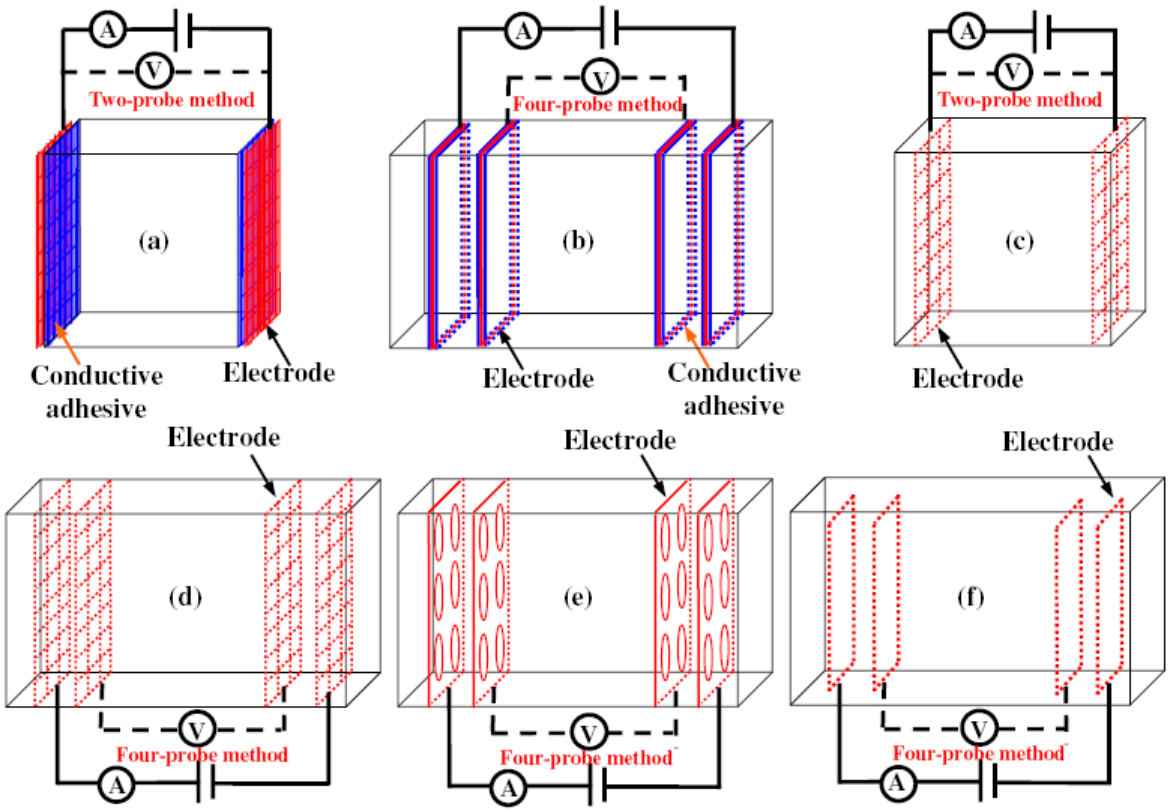
لازم به ذکر است که شکل نمونه های ISSC در تصویر ۵ بصورت مکعب یا منشور بوده که تحت فشار می باشد و نمونهٔ تحت کشش یا خمش لحاظ نگردیده است. در واقع شیوه های ثابت کردن و چیدمان الکترودها که در بالا ذکر شد برای نمونه های شکل‌های مختلف و حتی برای نمونه های تحت کشش نیز موثر هستند. وقتی شکل یا حالت بارگذاری نمونه ها تغییر می کند تنظیمات اندکی در پارامترهای شکل الکترود لازم خواهد بود.

۳-۷- روش اندازه گیری مقاومت الکتریکی

با توجه به چیدمان الکترود، روشهای اندازه گیری مقاومت الکتریکی ISSC شامل روش دو پرابی و روش چهار پرابی (طبق تصاویر۳) می باشد. اگرچه روش دو پرابی مدار اندازه گیری ساده تری نسبت به چهار پرابی دارد، روش چهار پرابی نسبت به دو پرابی ارجح است. چون می تواند مقاومت تماسی بین الکترودها و ISSC را حذف کند. این موضوع با آزمایشهای زیادی که روی ISSC با فیلرهای وظیفه ای مختلف انجام گردیده است تایید شده است. همچنین نتایج اندازه گیری مقاومت الکتریکی می تواند در برابر پارامترهای پیکربندی الکترود نسبی باشد. پارامترهایی مثل مساحت الکترودهای ولتاژ، اندازه شبکه (مش) الکترودها و فاصلهٔ بین الکترودهای جریان و ولتاژ در روش چهار پرابی.

بر اساس نتایج تحقیقات قبلی، روش چهار پرابی برای اندازه گیری مقاومت الکتریکی ISSC توصیه می شود. با این‌حال برخی محققان اشاره کرده اند که مقدار مقاومت اندازه گیری شده از روش دو پرابی ممکن است بعلت تاثیر مقاومت تماسی، از مقاومت واقعی کامپوزیتها بالاتر باشد اما این موضوع بر توانمندی روش دو پرابی برای ردیابی تغییرات مقاومت کامپوزیتهای تحت بارگذاری اثری ندارد. همچنین روش دو پرابی نسبت به چهار پرابی ساده تر و راحت تر است. بنابراین در تحقیق و کاربرد ISSC این روش بوفور استفاده می شود.

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]



تصویر ۳: شیوهٔ رایج فیکس کردن و چیدمان الکترودها در ISSC

در اندازه گیری مقاومت الکتریکی ISSC با استفاده از روش دو یا چهار پرابی، روش تست جریان مستقیم (DC) ساده ترین راه است. با این‌حال از آنجا که میدان الکتریکی DC در حین اندازه گیری مقاومت الکتریکی اعمال می شود جابجایی و مجموع یون‌ها در ماتریس بتن سبب قطبی شدن الکتریکی در کامپوزیت شده و غالب رسانایی الکتریکی آن توسط مکانیزم رسانایی یونی خواهد بود . اندازه گیری دقیق تغییرات مقاومت الکتریکی کامپوزیت که تحت بارگذاری خارجی است با اندازه گیری DC بسیار مشکل می باشد. یک روش برای بی اثر کردن قطبی شدگی در اندازه گیری DC مقاومت الکتریکی، اعمال ولتاژ پتانسیل DC بطور کامل جلوی بارگذاری کامپوزیت است به نحوی که اجازه دهد مقاومت پس از قطبی شدگی کامل، مسطح شود. یک روش دیگر استفاده از سیگنال جریان متناوب (AC) با مقادیر مساوی پیک مثبت و منفی برای کامپوزیت است. گرچه در این حالت هم قطبی شدگی را می توان در سیگنالهای AC مشاهده کرد لیکن اثر آن با افزایش فرکانس یا کاهش دامنهٔ ولتاژ AC اعمالی، تا محدوده قابل قبولی کاهش داده می شود.

۳-۸- دریافت و پردازش سیگنال حسی

در روش دو پرابی سیگنال مقاومت الکتریکی می تواند مستقیما با استفاده از مولتی متر جمع آوری شده یا بصورت غیر مستقیم توسط روش پل وتستون جمع آوری شود. در روش DC چهار پرابی برای جمع آوری مقاومت الکتریکی به ولتاژ الکتریکی تبدیل می شود این روش می تواند در روش دوپرابی هم بکار رود. به علاوه سیگنال مقاومت الکتریکی را می توان با یک مدار دیفرانسیلی بر پایهٔ روش چهار پرابی نیز جمع آوری کرد. روش دیفرانسیلی نه تنها می تواند حساسیت بالایی فراهم کند بلکه می تواند اندرکنش بین پیزومقاومت و حساسیت به دما در ISSC را جدا کند.

به طور کلی سیگنالهای دریافت شده بناچار توسط نویز اندازه گیری آلوده می شوند بنابراین روش پردازش دیگری باید بکار رود تا نویز حذف شده و اطلاعات حسی موثری حاصل گردد.

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

۳-۹- خاصیت حسی ISSC

رفتار حسی ISSC می تواند با رابطهٔ بین تغییرات جزیی در مقاومت الکتریکی $\Delta\rho/\rho_0$ و نیروی خارجی F (یا تنش σ و کرنش ε) بیان شود. حساسیت که عاملی مهم برای ارزیابی خاصیت حسی ISSC است می تواند به وسیلهٔ چنین پارامترهایی مشخص شود مثل ماکزیمم دامنهٔ تغییر جزئی در مقاومت الکتریکی (یعنی $\max(|\Delta\rho/\rho_0|)$) ضریب حساسیت نیرو (یعنی $(\Delta\rho/\rho_0)/F$)، ضریب حساسیت تنش (یعنی $(\Delta\rho/\rho_0)/\sigma$) یا ضریب حساسیت کرنش (یعنی $(\Delta\rho/\rho_0)/\varepsilon$) که ضریب گیج هم خوانده می شود.

. همچنین برخی پارامترهای دیگر مثل محدوده ورودی/خروجی، خطی بودن، تکرار پذیری، هیسترزیس، نسبت سیگنال به نویز و شیفتهای صفر نیز برای کمک به تشخیص خاصیت حسی ISSC بکار می روند.

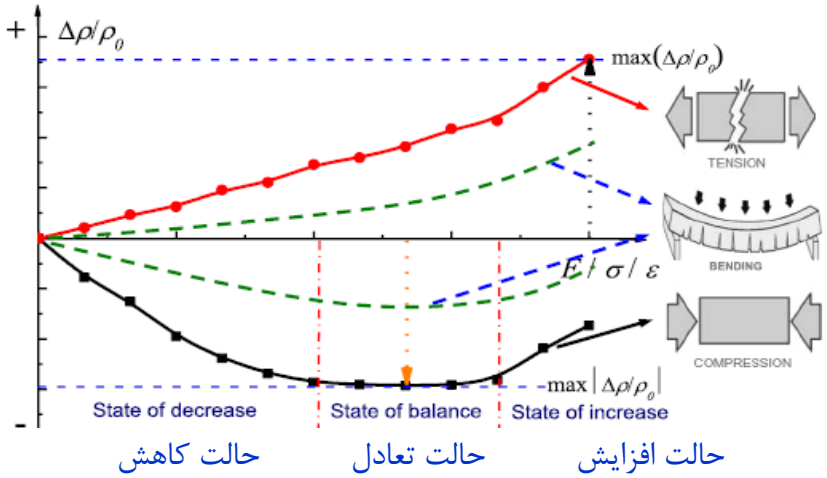
۴- خصوصیات حسی تحت شرایط بارگذاری مختلف

رفتار حسی ISSC تحت بارگذاری های مختلف مثل فشاری، کششی و خمش، متفاوت می باشد که به شرح ذیل تشریح می شود.

۴-۱- بارگذاری فشاری

(۱) تحت فشار یکنواخت: همانطور که در تصویر ۴ نشان داده شده است معمولا $\Delta\rho/\rho_0$ برای ISSC به سه حالت کاهش، تعادل و افزایش ناگهانی می باشد که به ترتیب به تراکم فشاری، رویش ترکهای تازه و بزرگ شدن ترک تحت تنش فشاری یکنواخت تک محوری، مربوط می شوند. تراکم فشاری سبب می شود که فیلرهای وظیفه ای به هم نزدیک شوند بنابراین شبکهٔ رسانای درون ISSC بهبود می یابد. روییدن ترک تازه باعث تخریب و بازسازی شبکهٔ رسانا می شود. بزرگ شدن ترک سبب شکست شبکهٔ رسانا می شود. این پدیده با آزمایشهای انجام شده بر روی ISSC با فیلرهای گوناگون تحت فشار یکنواخت تک محوری، تصدیق شده است اگر چه که الگوهای منحنی ارتباط بین مقاومت ویژهٔ الکتریکی و بارگذاری فشاری (یا تنش و کرنش) با هم تفاوت هایی دارند. علاوه بر بارگذاری فشاری تک محوری، برخی محققین خاصیت حسی ISSC را تحت فشار یکنواخت چند محوری مورد بررسی قرار داده اند.

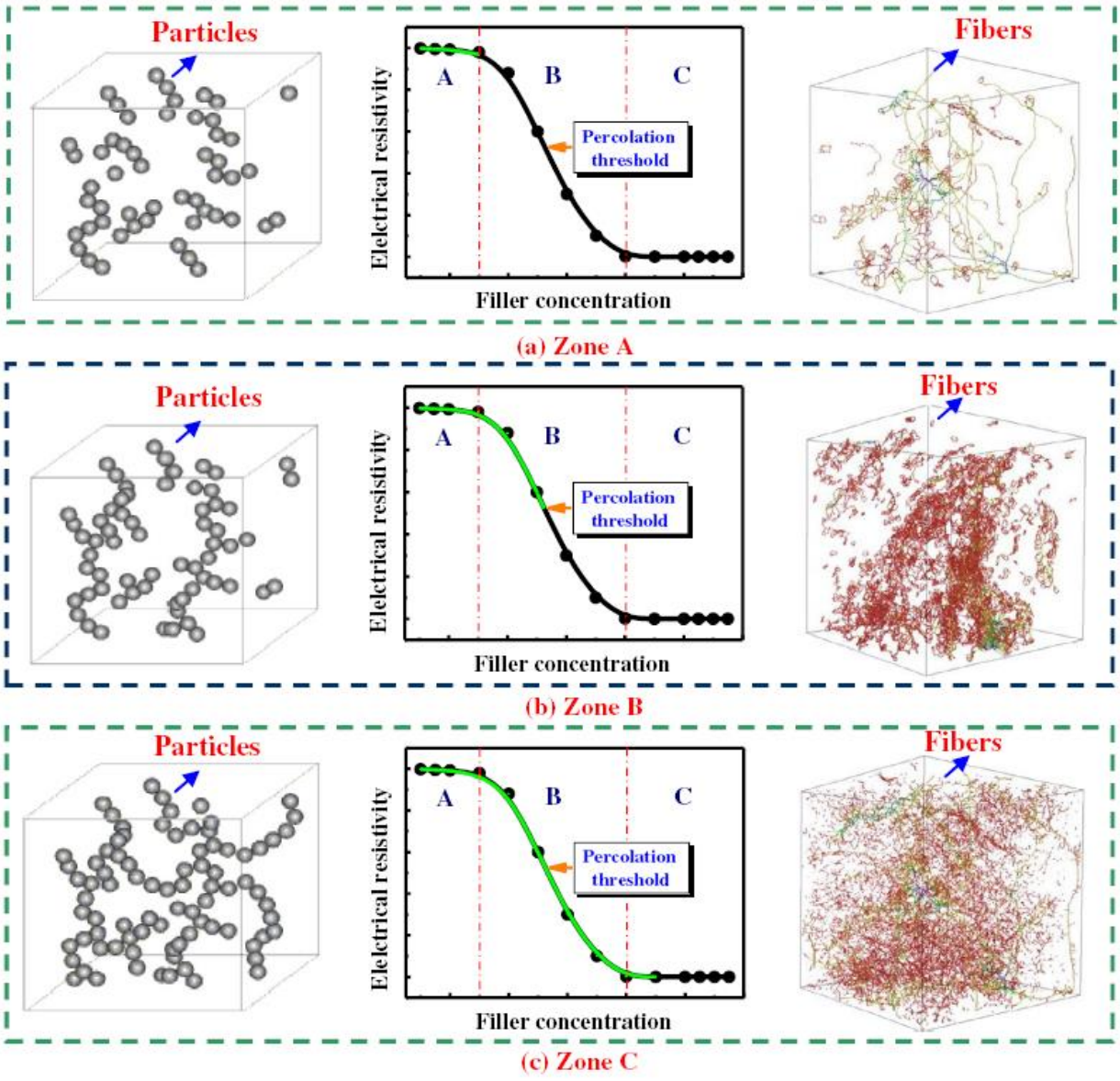
(۲) تحت بارگذاری فشاری مکرر: تحت بارگذاری فشاری مکرر $\Delta\rho/\rho_0$ برای ISSC در هر سیکل نسبت به بارگذاری کاهش یافته و نسبت به باربرداری افزایش می یابد. با این‌حال برای دامنه های مختلف تنش فشاری، تغییر خط پایهٔ مقاومت ویژهٔ الکتریکی و تغییر در مقاومت ویژهٔ الکتریکی متفاوت خواهند بود. در اینجا خط پایهٔ مقاومت ویژهٔ الکتریکی وقتی تنش فشاری تحت بارگذاری سیکلی به صفر بر می گردد به مقاومت ویژهٔ الکتریکی اطلاق می شود. این حالت با مقاومت ویژهٔ الکتریکی اولیهٔ یک نمونه که اصلا تحت نیروی خارجی نبوده است ، متفاوت است. زیرا برخی آسیب‌های داخلی (یعنی ترکهای محلی، سوراخها و غیره) در کامپوزیتها بتدریج در سیکلهای بارگذاری فشاری، کاهش می یابند. در نتیجه مقاومت ویژهٔ الکتریکی ISSC در شروع هر سیکل با مقاومت ویژهٔ الکتریکی اولیه برابر نیست و به عنوان خط پایهٔ مقاومت ویژهٔ الکتریکی تعریف می شود.



شکل۴: رفتار حسی نوعی برای ISSC تحت بارگذاری

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

قوانین تغییر مقاومت ویژهٔ الکتریکی ISSC با فیلرهای مختلف تحت بارهای فشاری تکراری تک محوری یا سه محوری از تعداد زیادی آزمایش به دست آمده است. این قوانین را می توان به شرح ذیل خلاصه کرد. وقتی دامنهٔ تنش فشاری زیر ۳۰٪ استحکام نهایی ISSC است هم مقاومت ویژهٔ الکتریکی خط پایه و هم تغییر در مقاومت ویژهٔ الکتریکی برگشت پذیر هستند که از تغییر شکل الاستیک برگشت پذیر ISSC نتیجه می شود. وقتی دامنهٔ تنش فشاری از محدوده حدود ۳۰ تا ۷۵ درصد استحکام نهایی ISSC است تغییر در مقاومت ویژهٔ الکتریکی برگشت پذیر است در حالی‌که مقاومت ویژهٔ الکتریکی خط پایه برگشت ناپذیر است. این موضوع به آسیب کوچک ماتریس و بازسازی متعاقب شبکهٔ رسانا در ISSC مربوط است. وقتی دامنهٔ تنش فشاری بالای تقریبا ۷۵ درصد استحکام نهایی ISSC است هم تغییر در مقاومت ویژهٔ الکتریکی و هم مقاومت ویژهٔ الکتریکی خط پایه برگشت ناپذیر هستند. این امر بدان علت است که آسیب ماتریس بزرگ بوده و شبکهٔ رسانا در ISSC شکسته می شود.



تصویر ۵: تغییر مقاومت ویژهٔ الکتریکی بهمراه غلظت فیلر

(۳) تحت ضربه: بار ضربه ای یکی از بارهای متداول روی سازه های بتنی است. جیا، میهان و همکاران، و هان و همکاران تغییر در مقاومت الکتریکی ملات سیمان SS، ملات سیمان CF و کامپوزیت CNT/سیمان را تحت بارهای ضربه ای به ترتیب، تست کرده اند. آنها مشاهده کردند که این کامپوزیتها می توانند به بارگذاری ضربه ای و حس آسیب نائل گردند.

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

۴-۲- تحت تنش (کششی)

۱) تحت تنش یکنواخت: از شکل ۴ می توان دید که $\Delta\rho/\rho_0$ مربوط به ISSC در تنش یکنواخت تک محوری با میل فیلرها به جدایش، افزایش می یابد. این پدیده در ISSC با برخی فیلرها شامل CF، الیاف نایلون با پوشش کربنی، فقط PVAF، PVAF هیبریدی و SF، PVAF هیبریدی و CF، PVAF هیبریدی و CB مشاهده شده است. فقط الگوهای منحنی رابطهٔ حسگری تفاوتهایی دارند. رفتار حسی ISSC نه تنها تابعی از کرنش است بلکه از رفتار ترک هم تاثیر می پذیرد. همچنین رضا و همکاران رفتار حسی ملات سیمان با CF تحت تنش فشاری را بررسی کرده اند. آنها ارتباط خوب بین رفتار الکتریکی و رفتار مکانیکی ISSC را مشاهده کردند. برای ایجاد بینشی در مورد توسعه و مکانیزم های ناحیهٔ فرایند شکست، می توان استفاده کرد همچنین از مقاومت الکتریکی می توان تخمینی برای طول ترک در حال گسترش فراهم کرد.

۲) تحت تنش کششی تکراری: تحت تنش تکراری $\Delta\rho/\rho_0$ مربوط به ISSC در هر سیکل نسبت به بارگذاری افزایش یافته و در باربرداری کاهش می یابد. مثل حالت فشاری تکراری، تغییر مقاومت ویژهٔ الکتریکی خط پایه و تغییر در مقاومت ویژهٔ الکتریکی، تحت دامنه های مختلف تنش کششی، متفاوت خواهند بود. مقاومت ویژهٔ الکتریکی خط پایه و تغییر در مقاومت ویژهٔ الکتریکی، در ناحیهٔ الاستیک برگشت پذیر هستند. تحت دامنه های بالایی از تنش هم تغییر در مقاومت ویژهٔ الکتریکی و هم مقاومت ویژهٔ الکتریکی خط پایه بازگشت ناپذیر هستند. این موضوع با مشاهدهٔ رفتارهای حسی ISSC با CF، SF، الیاف نایلون با پوشش کربنی،PVAF هیبریدی و SF، و CNT تایید شده است.

۴-۳- تحت خمش

وقتی تیری با تکیه گاه در دو انتها، در قسمت مرکزی اش تحت فشار قرار گیرد نیمهٔ بالایی سطح مقطع نمونه/جزء ISSC تحت فشار بوده و نیمهٔ پایینی دچار کشش تحت بارگذاری خمشی می شود. در نتیجه، رفتار حسی تحت بارگذاری خمشی، ترکیبی از خواص حسی تحت فشار و کشش است (همانطور که در شکل ۴ نشان داده شده است). همچنین بشدت به جزء ISSC و چیدمان الکترودها بستگی دارد. بنابراین رفتارهای مختلف حسی ISSC تحت بارگذاری خمشی در تحقیقات قبلی مشاهده گردید. نتایج تحقیق بالا نشان می دهد که روابط خوبی بین مقاومت/مقاومت ویژهٔ الکتریکی ISSC و تنش/کرنش مربوط به آن، ترک، آسیب و میزان آسیب وجود دارد. بنابراین تنش/کرنش، ترک و آسیب در ISSC می تواند با اندازه گیری سیگنالهای الکتریکی، درجا پایش شوند.

۴-۴- برخی عواملی که بر خاصیت حسی اثر دارند

علاوه بر نیروهای خارجی، عوامل دیگری مثل اجزاء کامپوزیت، فناوری ساخت و شرایط محیطی نیز بر مقاومت ویژهٔ الکتریکی کامپوزیت اثر دارند. از آنجا که برخی عوامل اثرگذار بر خاصیت حسی در ذکر گردیدند این بخش جزئیات تاثیر عوامل اصلی بر خاصیت حسی ISSC را به شرح ذیل بیان می کند.

۱) غلظت فیلر وظیفه ای: غلظت فیلر در تشکیل و توزیع شبکهٔ رسانا در درون ISSC غالب است بنابراین پارامتری مهم است که خاصیت حسی ISSC را تحت تاثیر قرار می دهد. با فیلرهای مختلف و تحت بارهای مختلف، کارهای زیادی برای مطالعهٔ اثر غلظت فیلر بر رفتار حسی، تکرارپذیری و $\max|\Delta\rho/\rho_0|$ مربوط به ISSC انجام شده است.

۲) شکل هندسی فیلر وظیفه ای: شکل هندسی فیلرها نیز بر توزیع شبکهٔ رسانا و مکانیزم رسانایی ISSC اثر دارد. برخی تلاشهای تحقیقاتی معطوف به بررسی اثر شکل هندسی فیلر بر رفتار حسی و پایداری ISSC با فیلرهای مختلف تحت بارهای مختلف، مانند شکل/ساختار، طول/اندازه و قالب شناسی سطح، بوده است.

۳) میزان بارگذاری: میزان بالای بارگذاری انتشار ترک را محدود کرده و مانع تغییر شکل پلاستیکی کامپوزیت بتن می شود. این موضوع می تواند روند تغییر شبکهٔ رسانا در ISSC تحت بارگذاری را تغییر دهد. برخی محققین رفتارهای حسی ISSCبا فیلرهای مختلف با میزان بارگذاریهای مختلف را مطالعه کرده اند و مشاهده کرده اند که خاصیت حسی ISSC به میزان بارگذاری وابسته است.

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

۴) محتوای آب: محتوای آب درون ISSC به عوامل زیادی مثل رطوبت و دمای محیطی، رژیم کیورینگ و ساختارهای بتن بستگی دارد. تغییر آن سبب تغییر در رسانایی الکتریکی فیلرهای وظیفه ای و ماتریس بتن می شود. برخی محققین تایید کرده اند که محتوای آب تاثیر زیادی بر خاصیت حسی ISSC دارد که در عمل نگرانی مهمی برای ISSC تلقی می شود.

۵) دما: کم یا زیاد شدن دما باعث انقباض یا انبساط ISSC می شود که سبب تغییر فواصل بین فیلرهای وظیفه ای مجاور می گردد. به علاوه تغییر در دما باعث افزایش یا کاهش انرژی انتقال (Transition) الکترونها در فیلرهای وظیفه ای می شود و همچنین محتوای آب را در ماتریس بتن تغییر می دهد. عموما تغییر مقاومت ویژهٔ الکتریکی ISSC بر اساس تغییر دما است. بنابراین خاصیت حسی ISSC بشدت به دما مرتبط است.

۶) چرخهٔ انجماد-ذوب: چرخهٔ انجماد-ذوب موجب تغییر شکل مکرر و تسپس تشکیل ترک در ساختار داخلی ISSC بر پایهٔ تفاوت تنش می شود. با افزایش چرخهٔ انجماد-ذوب، ترکها جمع شده و بتدریج گسترده می شوند به نحوی که تغییر بازگشت ناپذیر مقاومت ویژهٔ الکتریکی ISSC القاء می شود. در نهایت خاصیت حسی ISSC تنزل می کند.

۷) چرخهٔ خشک-خیس: در حالت خشک رسانایی الکتریکی ISSC توسط الکترونها غالب است. در حالیکه در حالت خیس، بویژه در شرایط آب اشباع، رسانایی یونی بسیار بزرگتر از رسانایی الکترونی در ISSC است. همچنین تحت چرخه های خشک-خیس، محتوای آب درون ISSC بطور مکرر تغییر کرده و دوام ISSC کاهش می یابد بنابراین شبکهٔ رسانای درون ISSC و خاصیت حسی آن را تخریب می کند.

۸) محیط خورنده: در محیط خورندهٔ کوتاه مدت مثل اسید قوی، باز قوی، کلر بالا، سولفات بالا و کربناته شدن، مقاومت ویژهٔ الکتریکی ISSC بعلت نفوذپذیری بویژه در محلول کلر، اندکی کم می شود و در نتیجه خاصیت حسی ISSC شدیدا تغییر می کند. با اینحال در خوردگی بلند مدت، یونهای خورنده به ساختار داخلی ISSC وارد شده با هیدراسیون و فیلرهای وظیفه ای واکنش داده و سبب تخریب ساختارهای ISSC می شود که در نهایت هم باعث کاهش خاصیت حسی ISSC می شود.

علاوه بر عواملی که در بالا گفته شد برخی محققان برای خاصیت حسی ISSC این اثرات را هم مشخص کرده اند: طول مدت بارگذاری، بارگذاری ناهم مرکز (نامتقارن)، بارگذاری طولانی مدت، فرکانس (تکرار) بار، اندازهٔ نمونهٔ تحت تست، فاصلهٔ بین الکترودها.

۵- مکانیزم حس کردن در ISSC

مکانیزم ایجاد اساس فهم و کنترل خاصیت ذاتی خودحسی بتن است و با جزئیات در چهار منظر ذیل معرفی خواهد شد.

۵-۱- نوع رسانایی الکتریکی

انواع اصلی رسانایی الکتریکی ISSC شامل این موارد است: رسانایی الکترونی یا حفره ای و یا هر دو آنها با هم است (یعنی تماسی، تونلی یا انتشار میدانی و یا ترکیبی از سه مورد) و رسانایی یونی. منشا الکترونها یا حفره و یا هر دو، فیلرهای وظیفه ای رسانا می باشد در حالیکه یونها از ماتریس بتن سیمان نشات می گیرند. همچنین لازم به ذکر است که رسانایی حفره ای فقط برای فیلرهای کربن دار موثر هستند.

۱) رسانایی تماسی: این نوع رسانایی ناشی از تماس مستقیم فیلرهای وظیفه ای همسایه است بنابراین یک اتصال رسانا تشکیل می شود.

۲) رسانایی تونلی و رسانایی انتشار میدانی (یا هردو): رسانایی تونلی وقتی رخ می دهد که فیلرهای جدا از هم بقدر کافی بهم نزدیک می شوند، تقریبا کمتر از ۱۰ نانومتر. انتشار میدانی مظهری از اثر تونلی است اما توسط یک میدان الکتریکی قوی موضعی القاء می شود. فیلرهای معمولی قادر به ایجاد میدان الکتریکی قوی برای القای انتشار میدانی در ولتاژهای پایین نیستند. با اینحال برخی فیلرها با قالب شناسی منحصر بفرد (مثل NP کروی نوک تیز، CNT) می توانند افزایش موضعی میدان الکتریکی در نوک تیز خود القاء کنند.

۳) رسانایی یونی: آبی که منافذ و جاهای خالی را در خمیر سیمان هیدراته شده پر کرده است می تواند انواع یون را حل کند (عمدتا Ca^{2+} و OH^{-})، در نتیجه مقداری رسانایی یونی از طریق اتصال منافذ مویین حاصل می شود. از آنجاکه نوع رسانایی یونی مرتبط با حرکت یونها در محلول دارای منافذ است بنابراین با وجود مقدار زیادی آب آزاد در سیمان، رسانایی یونی بسیار متغیر خواهد بود. در

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

شرایط خشک تقریبا ماتریس سیمان ماده‌ای عایق است. بعلاوه اینکه در ISSC وقتی غلظت فیلر زیر حد نفوذ است عموما رسانایی یونی غالب است.

مکانیزم واقعی رسانایی ISSC طبیعتی پیچیده دارد. انواع رسانایی که در بالا گفته شد بصورت همزمان در ISSC وجود داشته و با یکدیگر مرتبط هستند. رابطهٔ مقاومت الکتریکی DC با زمان می تواند نشان دهد که بین رسانایی الکترونی یا حفره ای و رسانایی یونی، کدامیک در رسانایی ISSC غالب هستند. وقتی رسانایی یونی غالب است مقاومت الکتریکی DC ظاهرا نسبت به مدت زمان اندازه گیری، بعلت اثر قطبی شدگی، افزایش می یابد. وقتی رسانایی الکترونی و حفره ای یا یکی از این دو غالب است مقاومت الکتریکی DC اساسا نسبت به زمان اندازه گیری پایدار می ماند. بعلاوه رابطهٔ جریان-ولتاژ می تواند نشانه ای بدست دهد که آیا رسانایی الکتریکی ISSC ناشی از رسانایی تونلی و انتشار میدانی است یا تماس مستقیم فیلرهای وظیفه ای همسایه. رابطهٔ خطی ولتاژ-جریان، یا همان قانون اهم نشان می دهد که تماس مستقیم فیلرهای وظیفه ای همسایه، مکانیزم رسانایی غالب است. با اینحال وضعیت غالب انتشار میدانی و تونلی در رسانایی الکتریکی ISSC توسط رابطهٔ جریان-ولتاژ قانون توان مشخص می شود.

۵-۲- مکانیزم رسانا

۵-۲-۱- بدون بارگذاری

ISSC با افزودن فیلرها به ماتریس بتن تهیه شده و ویژگیهای رسانایی آن بسیار به غلظت فیلرها وابسته است. تغییر مقاومت ویژهٔ الکتریکی ISSC بهمراه غلظت فیلر، یعنی منحنی خاصیت رسانایی ISSC، در تصویر ۵ بصورت گرافیکی نشان داده شده است. یک ترکیب بحرانی یا حد نفوذ وجود دارد که در آن رسانایی الکتریکی تا چندین برابر افزایش می یابد و ISSC را از یک مادهٔ عایق تا نیمه رسانا و رسانا تغییر می دهد. منحنی خاصیت رسانایی می تواند به سه بخش تقسیم شود: ناحیهٔ A با مقاومت ویژهٔ بالاتر که ناحیهٔ عایق نامیده می شود؛ ناحیهٔ B با کاهش سریع مقاومت ویژه که ناحیهٔ نفوذ نامیده می شود؛ ناحیهٔ C با مقاومت ویژهٔ پایدار و پایین که ناحیهٔ رسانا نامیده می شود.

در ناحیهٔ A غلظت فیلر در ماتریس بتن بسیار پایینتر از حد نفوذ است فاصلهٔ بین فیلرها زیاد است و تجمع فیلرها کم است بنابراین تشکیل مسیر رسانا مشکل است؛ الکترونها به سختی بین فیلرها جابجا می شوند و کامپوزیت مثل ماتریس از خود مقاومت بالایی نشان می دهد. رسانایی الکتریکی ماتریس (یعنی رسانایی یونی) در رسانایی الکتریکی کامپوزیت غالب است. در ناحیهٔ B فیلرها اتصال رسانایی تشکیل داده و مسیر رسانا را به وجود می آورند؛ فاصلهٔ بین فیلرهای مجاور کاهش می یابد. احتمال انتقال الکترونی بشدت افزایش یافته و در نتیجه افزایش سریعی در رسانایی کامپوزیت رخ می دهد. وقتی که غلظت فیلر زیر حد نفوذ است رسانایی تماسی، رسانایی تونلی و رسانایی انتشار میدانی یا انتشار میدانی به تنهایی و رسانایی یونی، همگی عوامل غالب در رسانایی الکتریکی کامپوزیت هستند. با اینحال وقتی غلظت فیلر از حد نفوذ تجاوز می کند علاوه بر تماس مستقیم فیلرهای وظیفه ای، رسانایی تونلی و رسانایی انتشار میدانی یا رسانایی انتشار میدانی به تنهایی نقشی اساسی در رسانایی کامپوزیت دارند. در ناحیهٔ C غلظت فیلر بسیار بیشتر از حد نفوذ است و فیلرها را می توان تقریبا متصل به هم فرض کرد.

۵-۲-۲- تحت نیروی خارجی

وقتی بتن تحت بارگذاری تغییر شکل می دهد مقاومت ویژهٔ الکتریکی ISSC تغییر می کند. چند عامل در تغییر مقاومت ویژهٔ الکتریکی دخیل اند: (۱) تغییر مقاومت ذاتی فیلرهای وظیفه ای. (۲) تغییر چسبندگی بین فیلرهای وظیفه ای و ماتریس. (۳) تغییر تماس بین فیلرهای وظیفه ای. (۴) تغییر فاصلهٔ تونلی بین فیلرهای وظیفه ای. (۵) تغییر ظرفیت خازنی.

در واقع عوامل فوق الذکر برای کمک به خاصیت حسی ISSC با همدیگر کار می کنند اما یک یا چند تا از آنها در ناحیه های مشخصی ار منحنی مشخصهٔ رسانایی به عنوان عامل اصلی هستند. در ناحیهٔ A مسیر رسانا به سختی قابل تشکیل است حتی اگر یک نیروی خاجی به کامپوزیت اعمال شود. تغییر ظرفیت خازنی عامل غالب است. در نتیجه خاصیت حسی کامپوزیت صفر یا بسیار ضعیف است. در ابتدای ناحیهٔ B تغییر ظرفیت خازنی، تغییر مقاومت ذاتی فیلرها و تغییر چسبندگی بین فیلر و ماتریس عوامل غالب هستند. در نزدیکی حد نفوذ عوامل اصلی عبارتند از: تغییر فاصلهٔ تونلی بین فیلرها، تغییر تماس بین فیلرها، تغییر چسبندگی بین فیلر و ماتریس و تغییر مقاومت ذاتی فیلرها. در انتهای ناحیهٔ B تغییر تماس بین فیلرها، تغییر فاصلهٔ تونلی بین فیلرها و تغییر مقاومت ذاتی فیلرها نقشهای اصلی را بازی می کنند. از تحلیل بالا می توان اینگونه دریافت که در هر بخش از ناحیهٔ B چند عامل با هم در تغییر خاصیت

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

حسی کامپوزیت نقش دارند. بنابراین کامپوزیت در ناحیهٔ B خاصیت حسی خوبی دارد. در ناحیهٔ C تغییر تماس بین فیلرها و تغییر مقاومت ذاتی فیلرها عوامل غالب هستند. شبکهٔ رسانای درون کامپوزیت پایدار شده و تغییر آن تحت بارگذاری مشکل می باشد. در نتیجه کامپوزیت از لحاظ خاصیت حسی پایدار شده و حساسیت پایینی خواهد داشت.

عموما مقاومت ویژهٔ الکتریکی پایین در اندازه گیریهای ISSC مطلوب می باشد زیرا مقاومت ویژهٔ الکتریکی پایین برای افزایش نسبت سیگنال به نویز مفید است. با اینحال با پایین بودن مقاومت ویژهٔ الکتریکی، حساسیت بالا در خاصیت حسی و پایین بودن غلظت فیلر بطور همزمان حاصل نمی گردد. خوشبختانه در نزدیکی حد نفوذ، تعادلی بین حساسیت بالا در خاصیت حسی، پایین بودن غلظت فیلر و مقاومت ویژهٔ الکتریکی پایین وجود دارد. بنابراین حد نفوذ پارامتر مهمی برای طراحی و بهبود خاصیت حسی ISSC است. غلظت فیلر بطور کلی در بالای حد نفوذ برای خاصیت حسی تحت کشش مفید است در حالی که در قسمت پایین حد نفوذ برای خاصیت حسی تحت فشار مفید است.

۵-۳- مدل ساختاری حسی

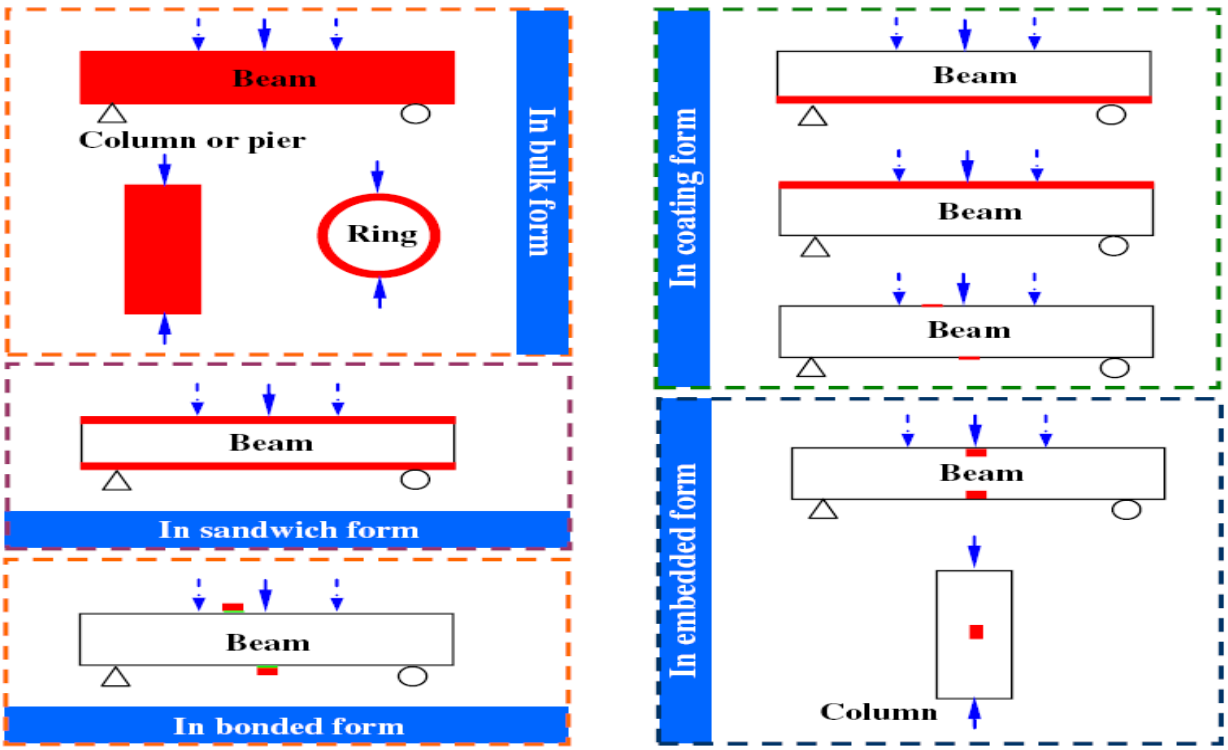
مدلهای ساختاری مختلفی برای بطور پی در پی تهیه شده اند تا مکانیزم پیشنهادی ایجاد خاصیت حسی را تایید کنند و خاصیت حسی ISSC را بطور کمی توصیف یا پیش بینی کنند.

۶- کاربردهای ساختاری ISSC

با توجه به قابلیت ISSC در انعکاس تنش، کرنش، ترک و آسیب درونی، این ماده توانایی کاربرد در حوزهٔ پایش سلامتی ساختاری (SHM) و ردیابی ترافیک را دارا می باشد.

۶-۱- پایش سلامتی ساختاری

همانطور که در تصویر ۶ نشان داده شده است ISSC می تواند برای SHM بصورت فله (توده)، پوشش، ساندویچ، پیوندی و جایدهی توکار (Embedded) استفاده شود. در اینجا فله به این معنی است که قطعه (جزء) کاملا از ISSC ساخته شده است. پوشش به معنی این است که یک سطح قطعه با لایه ای از ISSC پوشیده شده است و ساندویچ به سطوح بالا و پایین قطعه اطلاق می شود که با لایه های ISSC پوشیده شده است.



شکل ۶: اشکال کاربرد نوعی ISSC برای SHM (قسمتهای قرمز نشانگر ISSC هستند). برای تفسیر مراجع برای راهنمای رنگ تصویر، خواننده به نسخهٔ اینترنتی این مقاله ارجاع داده می شود.)

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

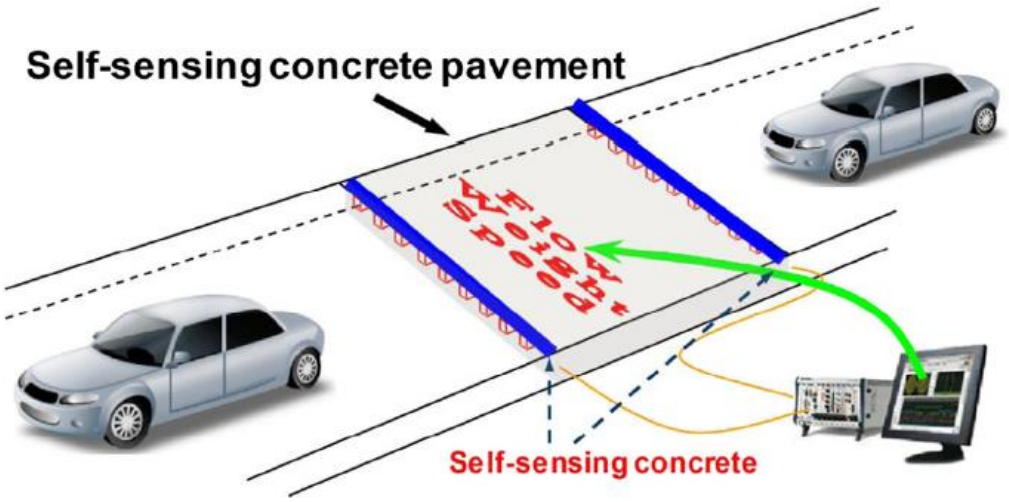
۶-۲- ردیابی ترافیک

همانطور که در تصویر ۷ نشان داده شده است پیاده روها یا قطعات پل که با ISSC یکپارچه شده اند می توانند مقدار زیادی داده های ترافیکی مهم را ردیابی کنند از جمله: میزان جریان ترافیک، سرعت وسایل نقلیه، تراکم ترافیک، حتی تعیین وزن برای حرکتها (همانطور که در جدول ۸ نشان داده شده است). بعلاوه اینکه تغییر سیگنال حسی که بعلت قطبی شدن عوامل محیطی (شامل دما و رطوبت) رخ می دهد مستمر و تدریجی می باشد حال آنکه عوامل مرتبط با بار وسایل نقلیه، گذرا و ناگهانی است. در نتیجه تغییر سیگنال حسی می تواند پس از پردازش سیگنال، فیلتر شده و خارج گردد و دقت ردیابی را مخدوش نکند. بنابراین پیاده روهای خودحسی که با ISSC یکپارچه شده اند نسبت به قطبی شدگی درون ISSC و تغییرات محیط بیرون مقاومت خوبی دارند.

۶-۳- چالشهای توسعه و گسترش ISSC

اگر چه از ظهور ISSC تقریبا دو دهه می گذرد اما تحقیق روی آن هنوز در جریان است. تلاشهای زیادی برای پیشبرد و توسعهٔ ISSC مورد نیاز است. گمان می رود چالشهای ذیل در پیشبرد و توسعهٔ آن در آینده مهم باشند.

(۱) ساخت ISSC. ISSC یک کامپوزیت چند جزئی، چند فازی و چند مقیاسی است بنابراین تکرارپذیری حسی باید در آینده از طریق فناوری ساخت موثر بهبود یابد. همچنین با توجه به هزینهٔ فیلر، مقدار فیلر مورد استفاده در ISSC باید تا حد امکان کاهش یابد تا هزینهٔ محصول نیز کم شود. بنابراین برخی فناوریهای مفید و غیر پیچیده باید توسعه یابد تا ISSC با غلظت پایین فیلر ساخته شود. یک راه حل مهم برای این موضوع، یافتن روشهای ساده، تکرارپذیر، با مقیاس بزرگ و با مصرف کم انرژی است تا توزیع فیلرها در بتن بدون تغییر در فرایند ساخت مواد بتن انجام پذیرد. بتن با شن و دانه در عمل بسیار مفید است تا بدون شن و دانه (یعنی خمیر سیمان). اما دانه ها بویژه دانه های درشت، تقویت خواص حسی ISSC را با استفاده از غلظت پایین فیلرها مشکل و پیچیده می کنند. برای این چالش، استفاده از فناوری کامپوزیت چند مقیاسی با فیلر هیبریدی و استفاده از دانه های رسانا می تواند راه حلی بالقوه باشد. همچنین ایجاد چند روش ارزیابی ساده و راحت برای کیفیت پراکنش فیلر در ماتریس بتن ضروری است. عموما پیشنهاد می شود که تحقیقات بعدی باید به ایجاد روشی یکسان، راهنماها و مشخصاتی برای طراحی، بهینه سازی و ساخت ISSC کمک کند.



تصویر ۷: شماتیک طرح ساختار پیاده رو ISSC برای ردیابی خودرو

(۲) اندازه گیری سیگنال حسی ISSC. سیگنالهای حسی دارای اطلاعاتی است که وضعیت ISSC را منعکس می کند با اینحال اگر روش اندازه گیری سیگنال پردازش مناسب نباشد نویز اندازه گیری و عدم قطعیت محیطی، سیگنالهای حسی را مخدوش می کند. همچنین ساختارهای ISSC براحتی در معرض عوامل محیط خشن بیرون (مثل دمای بالا، رطوبت و کلر بالا) قرار می گیرند. این امر می تواند منجر به تغییر در خواص الکتریکی ISSC شود بنابراین بر دقت اندازه گیری اثر می گذارد. پس توسعهٔ این موارد ضروری است:

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

طراحی جدید الکترود، طراحی مدار اندازه گیری، روشهای دریافت و پردازش سیگنال. با این توسعه، استخراج کامل، عمیق و دقیق اطلاعات موثری که شرایط ساختارهای ISSC را منعکس می کنند فراهم می گردد. هدف نهایی، ایجاد روشهای اندازه گیری و تجهیزات اندازه گیری استاندارد برای ISSC می باشد.

(۳) خاصیت حسی و مکانیزم آن در ISSC. تلاشهای تحقیق قبلی عمدتا بر خاصیت حسی ISSC تحت بارگذاری تکمحوری متمرکز بوده است. این بدان معنی است که ISSC می تواند فقط اندازه گیری کرنش یا تنش را برای یک محور انجام دهد. در سازه های واقعی، ISSC تحت شیوه های مختلف بارگذاری و شرایط پیچیدهٔ تنشی قرار می گیرد. بنابراین خاصیت حسی کل ISSC باید برای کاربرد ساختاری تعیین گردد. در تحقیقات آینده باید عملکرد حسی پارامترها (مثل رنج ورودی/خروجی، خطی بودن، تکرار پذیری، هیسترزیس، نسبت سیگنال به نویز و شیفتهای صفر) روی جهات ۱، ۲ و ۳ محوره برای ISSC تحت شرایط پیچیدهٔ تنش، بدست آید. همچنین تکامل طولانی مدت خاصیت حسی ISSC باید بررسی شود. اگر چه محققین با ترکیب آزمایشها و تئوریها توجیهات معقولی برای خاصیت حسی ارائه کرده اند لیکن بعضی از توجیه ها هنوز واضح نشده است یا نیاز به صحه گذاری بیشتر دارد چرا که مکانیزم واقعی ماهیتی پیچیده دارد. استفاده از برخی ابزار پیشرفتهٔ تحلیل و تست برای بررسی مکانیزم حس کردن، تحت شرایط مختلف مکانی و زمانی مفید می باشد. بعلاوه در تحقیقات گذشته مدلهای خصوصیت حسی فقط برای ISSC تحت کشش یا فشار تکمحوری ساخته شده اند. در کارهای آینده تلاشها باید معطوف به سرمایه گذاری روی توسعهٔ مدلهای جامع برای تشریح و پیش بینی خواص حسی ISSC تحت شرایط مختلف مکانی و زمانی بر اساس آزمایشات و شبیه سازیهای عددی باشد.

(۴) کاربرد ISSC. از ISSC نه تنها در ردیابی ترافیک استفاده می شود بلکه این توانایی را دارد که در پایش سلامت زیرساختهای عمرانی مثل ساختمانها، پلها، تونلها و سازه های روی دریا نیز به کار گرفته شود. همچنین از آن می توان برای مرزداری و امنیت نظامی نیز استفاده کرد. برای استفاده از ISSC در حوزه های فوق الذکر بررسیهای عمیقی باید صورت گیرد. مقاوم سازی های جدیدی برای کاربرد ساختاری ISSC باید انجام شود. بطور کلی پیشنهاد می شود که مطالعات بعدی در خصوص کاربرد ISSC باید به استقرار یک روش یکسان، راهنماها و مشخصاتی برای طراحی و ساخت سازه های ISSC کمک کند.

۷- نتیجه گیری

ISSC ماده ای ذاتا هوشمند برای ساخت و ساز است که از مادهٔ سیمان ساخته شده است و در طول این دو دهه بسیار مورد علاقه بوده است. ISSC مزیتهای فراوانی دارد از جمله حساسیت بالا، خاصیت خوب مکانیکی، سازگاری طبیعی، عمر یکسان با بتن و نصب و نگهداری آسان. بنابراین ISSC زمینهٔ کاربرد گسترده ای در زیربناهای عمرانی دارد مانند ساختمانهای بلند مرتبه، بزرگراهها، پلها، باندهای فرودگاهی، قطعات تراورس ریل قطارهای پرسرعت، سد و نیروگاههای اتمی. ISSC بویژه پتانسیل خوبی در حوزهٔ پایش سلامت سازه ای، ردیابی ترافیک و امنیت مرزی و نظامی دارد. همچنین ISSC برای موارد ذیل مفید خواهد بود: حصول اطمینان از یکپارچگی ساختاری و ایمنی، افزایش عمر سازه ها، بهبود و راندمان ایمنی رفت و آمد (ترافیک)، هدایت طراحی ساختاری و ترافیکی، کاهش مصرف منابع و انرژی و غیره. ISSC یک گزینهٔ هوشمند برای حفظ توسعهٔ پایدار در مواد بتنی و سازه ها است. این ماده انقلابی بزرگ در حوزهٔ مصالح بتن معمولی ایجاد کرده و تاثیر مفیدی بر اقتصاد، جامعه و محیط خواهد داشت.

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

منابع

[1] Sustainable concrete, Cement and Concrete Institute, 2011.
[2] J.P. Ou, H. Li, Structural health monitoring in mainland China: review and future trends, Struct. Health Monit. 9 (3) (2010) 219–231.
[3] N. Banthia, Fiber Reinforced Concrete for Sustainable and Intelligent Infrastructure, in: First International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries, Algeria, 2009, pp. 337–350.
[4] D.D.L. Chung, Self-monitoring structural materials, Mater. Sci. Eng.: R: Reports 22 (2) (1998) 57–78.
[5] J.P. Ou, B.G. Han, Piezoresistive cement-based strain sensors and self-sensing concrete components, J. Intell. Mater. Syst. Struct. 20(3) (2009) 329–336.
[6] T.C. Hou, J.P. Lynch, Conductivity-based strain monitoring and damage characterization of fiber reinforced cementitious structural components, Proc. SPIE 5765 (2005) 419–429.
[7] Q.Z. Mao, B.Y. Zhao, D.R. Sheng, Z.Q. Li, Resistance changement of compression sensible cement speciment under different stresses, J. Wuhan Univ. Technol. 11 (1996) 41–45.
[8] P.W. Chen, D.D.L. Chung, Carbon fiber reinforced concrete as a smart material capable of non-destructive flaw detection, Smart Mater. Struct. 2 (1993) 22–30.
[9] X.L. Fu, W.M. Lu, D.D.L. Chung, Ozone treatment of carbon fiber for reinforcing cement, Carbon 36 (1998) 1337–1345.
[10] Z.J. Zhou, Z.F. Yang, Study on the smart property of carbon coated nylon fiber-reinforced concrete composites, J. Chin. Ceram. Soc. 29(2001) 192–195.
[11] Baoguo Han, Siqi Ding Xun Yu study on Intrinsic self-sensing concrete and structures, Measurement 59 (2015) 110–128

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]

A review of the process of formation and development of self-sensing concrete

Mohammad Reazaei [1*], Ebrahim khalilzadeh vahidi [2]

[1] Phd Candidate , Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.
[2] Assistant Professor, Department of Civil Engineering, Razi University, Kermanshah, Iran.
[*]**E-mail: mohammad.rezaei1367@yahoo.com**

ABSTRACT

Self-sensing concrete (ISSC) refers to a structural material that can be monitored without the need for a sensor or remote control. By measuring the electrical resistance of the ISSC, stress, strain, cracks and damage can be monitored in situ. Compared to conventional structural materials that require additional sensors for monitoring or tracking, ISSC has the advantage of: high sensitivity, good mechanical properties, natural compatibility, durability, easy installation and maintenance. The ISSC can be used to monitor structural health, tracking traffic and border and military security. In this paper, we describe the ISSC research advances in terms of its composition, construction methods, sensory signal testing methods, sensory properties, and manufacturing mechanism and structural applications. future challenges in the development and application of ISSCs will also be discussed.

KEYWORDS

Self-sensing concrete, Construction method, Electrical properties.

[Downloaded from journals.lu.ac.ir on 2024-07-06]