



## مقایسه میدانی دوام بتن مسلح با الیاف ماکروسینتتیک و الیاف فولادی پس

### از ترک خوردگی در محیط های خورنده

Erik Stefan Bernard<sup>1</sup>, Ralf Winterberg<sup>2</sup>, Mohamad.R Hajizadeh<sup>3</sup>

1- PhD Civil Engineering, Technologies in Structural Engineering Pty Ltd, Sydney, Australia

2- PhD Civil Engineering, Group Chief Engineer, EPC Holdings Pte Ltd., Singapore

3- Civil Engineer, Tehran Polytechnic University, Tehran, Iran

#### چکیده

عملکرد بسیار عالی بتن مسلح الیافی (FRC) یا شاتکریت مسلح الیافی (FRS) در بحث دوام در شرایط قبل از ترک خوردگی نسبت به بتن مسلح شده سنتی و رایج (با میلگرد/مش) حتی در مواقعی که از الیاف فولادی به عنوان مسلح کننده استفاده شده، تاکنون در موارد مختلفی به اثبات رسیده است. با این وجود توانایی بتن/شاتکریت الیافی در برابر خوردگی و حفظ ظرفیت باربری بعد از ایجاد ترک نامشخص است. تحقیق حاضر به منظور مطالعه و مقایسه در مورد تاثیر طولانی مدت در معرض قرار گرفتن شاتکریت مسلح با الیاف فولادی و الیاف ماکروسینتتیک در محیط هوای آزاد و در شرایط زیر آب دریا بر روی عملکرد طاقت پس از ترک خوردگی نمونه ها انجام شده است. به طوری که عملکرد نمونه ها قبل و بعد از ترک مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفته است.

نتایج نشان داد دوام شاتکریت حاوی الیاف ماکروسینتتیک در هر دو محیط آزاد و درون آب دریا بسیار عالی بود. این مقدار بالای دوام، از عرض ترک خوردگی مستقل بود و در واقع افزایش عرض ترک منجر به بدتر شدن عملکرد آن نشد.

در مقابل، عملکرد نمونه های حاوی الیاف فولادی در خوردگی، حتی پس از گذشت ۷ ماه قرارگیری در محیط خورنده بسیار تحت تاثیر منفی قرار گرفت. مقدار عرض ترک ها هم بر کاهش عملکرد این نمونه ها تاثیر قابل توجهی گذاشت.

کلمات کلیدی: شاتکریت الیافی، الیاف ماکروسینتتیک، الیاف فولادی، دوام پس از ترک خوردگی، جذب انرژی

## ۱. مقدمه

بتن مسلح الیافی (FRC) و شاتکریت مسلح الیافی (FRS) امروزه به صورت وسیعی در کاربردهایی مانند روسازی و کفسازی های بتنی صنعتی و لاینینگ اولیه یا نهایی تونل ها مورد استفاده قرار می گیرد. توانایی الیاف در FRC و FRS در مقاومت در برابر خوردگی در شرایط طبیعی آب و هوایی و شرایط در مجاورت آب دریا در دوره زمانی طولانی مدت مورد ارزیابی قرار گرفته است [۱-۳]. همچنین خوردگی رشته هایی از الیاف فولادی که در نزدیکی سطح بیرونی بتن قرار داشتند، در مطالعات قبلی نشان داده شده است [۴ و ۵]. خوردگی های موضعی سطحی، به عنوان یک تهدید سازه ای در درون بتن الیافی آنطور که در بتن های به روش سنتی مسلح شده وجود دارد، گسترش پیدا نمی کنند [۶].

نتایج تحقیقات و تجارب میدانی انجام شده تا به امروز، باعث افزایش میزان اعتماد به بتن های الیافی در شرایط بتن ترک نخورده شده است. اما این باور وجود دارد که وجود ترک باعث کم شدن و تحت تاثیر قرار گرفتن دوام بتن/شاتکریت الیافی خواهد شد، به خصوص اگر الیاف فولادی باشد. اگرچه یک کار تحقیقاتی نشان داد که ترک های با عرض تا ۰.۵ میلیمتر تاثیر چندانی بر روی دوام بتن مسلح با الیاف فولادی ندارد [۷]. اما تست های دیگر آزمایشگاهی نشان داده اند که در معرض قرار گرفتن نمونه های ترک خورده حاوی الیاف فولادی در محیط های تهاجمی می تواند باعث کم شدن عملکرد نمونه ها در تست مقاومت پس از ترک شود [۸]. همچنین Nordstrom دریافت که میزان خوردگی شاتکریت مسلح با الیاف فولادی با عرض ترک افزایش یافت. او نتیجه گیری کرد که خوردگی ها برای نمونه های حاوی الیاف فولادی با عرض خیلی کم (کمتر از ۰.۱ میلیمتر) قابل چشم پوشی است [۹ و ۱۰].

## ۲. برنامه آزمایشگاهی

### ۲-۱ روش نمونه گیری

تحقیقات شامل دو سری نمونه گیری از شاتکریت الیافی شد، سری اول نمونه ها قبل از ایجاد ترک و به مدت ۵۶ روز در آب در محیط آزمایشگاه نگهداری شدند که نتایج آن ها برای کنترل استفاده شد. و تعداد

دیگری نمونه که پس از ۵۶ روز عمل آوری و ایجاد ترک در یکی از دو شرایط زیر نگهداری شدند. تعدادی در معرض هوای آزاد و تعدادی زیر آب دریا. سپس نمونه ها بعد از گذشت ۷، ۱۴ یا ۲۴ ماه در معرض محیط بودن، مجدد تحت آزمایش قرار گرفتند تا مقاومت و ظرفیت باربری پس از ایجاد ترک نمونه ها در زمان قبل از ترک و بعد از ترک که در معرض محیط خورنده بودند، تحت بررسی قرار گیرد.

نمونه ها مطابق با استاندارد ASTM C-1550 به صورت پنل دایره ای و با دو نوع الیاف فولادی در سر قلاب و الیاف ماکروسینتتیک مطابق جدول ۱ ساخته شدند. از  $50 \text{ kg/m}^3$  الیاف فولادی با طول ۳۵ میلیمتر با نسبت طول به قطر ۶۵ استفاده شد. همچنین از  $9 \text{ kg/m}^3$  الیاف ماکروسینتتیک Barchip HT48 با جنس پلی پروپیلن خالص استفاده شد. میزان مقاومت فشاری ۲۸ روزه نمونه ها اندازه گیری نشد، اما با توجه به نتایج قبلی با این طرح مخلوط مقدار ۵۵ مگاپاسکال پیش بینی می شود.

#### جدول ۱- طرح مخلوط نمونه های شاتکریت ساخته شده در این تحقیق

مقدار ( $\text{kg/m}^3$ )	نوع مصالح
۶۲۰	شن (10/7 mm)
۶۰۰	ماسه (2 mm)
۴۰۰	ماسه ریز
۳۶۰	سیمان
۴۰	خاکستر بادی
۲۰	میکروسلیس
۰,۴۲	فوق روان کننده (کاهنده آب)

تمامی نمونه ها به صورت روش دستی بوسیله دستگاه شات به قالب های دایره ای شکل استاندارد پاشیده شده و قالب ها زاویه ۴۵ درجه نسبت به قفسه داشته اند. بلافاصله پس از اتمام نمونه گیری قالب ها به حالت افقی برگردانده شدند و سطح آن ها برای دستیابی به سطحی صاف و ضخامتی یکسان آماده سازی و پرداخت شد. سپس داخل پلاستیک یک شب نگهداری شدند تا اینکه از قالب باز و برای مدت ۵۶ روز داخل آب عمل آوری شدند. مجموعاً ۸۰ نمونه جهت انجام این تحقیق ساخته شد.

## ۲-۲ پارامترهای مورد ارزیابی

هدف از انجام این تحقیق ارزیابی میزان کاهش در عملکرد شاتکریت مسلح با الیاف فولادی و الیاف ماکروسینتتیک تحت قرارگیری در شرایط محیطی داخل آب دریا (محیط خورنده) و شرایط هوای آزاد، و اندازه گیری وابستگی و تحت کنترل بودن شدت خرابی با عرض ترک خوردگی بود. بنابراین نمونه ها به دو گروه تقسیم شدند: آن هایی که حاوی الیاف فولادی بودند (که در جدول ۲ با H مشخص شدند)، و نمونه های حاوی الیاف ماکروسینتتیک (B). سپس هرکدام از این دو گروه خودشان به دو دسته بر اساس محیط نگهداری شده تقسیم شدند، در هوای آزاد (I) و در آب دریا (S). مجددا هر دسته به دو گروه تقسیم شد، آن هایی که میانگین ترک اولیه تقریبی ۰,۱ میلیمتر یا ۱ میلیمتر داشتند. سپس سه دوره زمانی که نمونه ها در معرض محیط بودند اجرایی شد (X - Y - Z). مشخصات نمونه ها در جدول ۲ نشان داده شده است. نمونه هایی که در سن ۵۶ روزه آزمایش شدند، با نوع 'L' مشخص شدند به معنای انجام تست نرمال C-1550 برای محاسبه عملکرد میانگین هر مخلوط، یا با نوع 'W' مشخص شدند به معنای نمونه های کنترل که تحت سیکل بارگذاری تا ترک اولیه قرار گرفتند (و تست متوقف شد) و بلافاصله مجدد بارگذاری شدند برای اینکه یک مرجعی ایجاد شود در برابر نمونه هایی که بعدا پس از قرار گرفتن در محیط خورنده و پس از ترک اولیه تست می شوند، تا با آن ها مقایسه و کنترل شود.

توضیح اینکه پیمانکاران ساخت نا آگاهانه کلیه نمونه های باقیمانده نگهداری شده در سایت را هفته ها قبل از رسیدن آن ها به موعد ۲۴ هفته خراب و از بین برده بودند. بنابراین نتایج عملکرد برای نمونه های نگهداری شده در هوای آزاد فقط برای ۷ و ۱۴ ماهه در دسترس و قابل گزارش بود.

### جدول ۲- مشخصات نمونه ها با توجه به نوع الیاف، محل نگهداری، عرض اولیه ترک و مدت نگهداری

نوع و مخفف		پارامتر
ماکروسینتتیک-بارچپ B - ۴۸	فولادی دو سر قلاب - H	نوع الیاف
هوای آزاد - I	در آب دریا - S	محل نگهداری
عرض در حد ۱ میلیمتر - 10	خیلی کم در حد ۰,۱ میلیمتر - 01	عرض ترک ایجاد شده
۷ ماه X	عدم مواجهه W	مدت نگهداری در محیط
۲۴ ماه Z	۱۴ ماه Y	

### ۲-۳ انتخاب محل های نگهداری

یون های کلراید به عنوان یکی از عوامل بسیار مهم در تسریع بخشیدن به خوردگی میلگردهای فولادی در بتن شناخته شده هستند [۶]. بنابراین دو محیطی که برای این تحقیق انتخاب شدند، این ویژگی را داشتند تا با قرار گرفتن در معرض یون های کلراید تاثیر آن را بر نمونه ها بسنجیم. یکی از محل های نگهداری، محوطه چمن در دانشگاه Western Sydney بود که در ۶۰ کیلومتری ساحل شرقی استرالیا واقع شده. این مکان در واقع نماینده محیطی بود که تمرکز خیلی کمی از یون های کلراید در آن وجود دارد. نمونه های از قبل دارای ترک بر روی زمین در مکان ذکر شده به نحوی که ترک رو به محیط بود نگهداری شدند، پس به فرآیند خوردگی کمک بیشتری می کرد. در طول نگهداری نمونه ها چمن ها بلند شدند و اطراف نمونه ها را گرفتند و از سطح آن ها بالا آمدند، بنابراین محتمل بود اسید کربنیک بر روی سطح نمونه ها پدیدار شود. (شکل ۱)



شکل ۱- محل نگهداری نمونه ها در هوای آزاد (I) که نشان از رشد چمن ها در اطراف نمونه ها می دهد.

مکان نگهداری دوم محل آموزش شیرجه نیروی دریایی ارتش استرالیا بود که در مجاورت بندر سیدنی بود. این محل انتخاب شد چراکه هر آن در دسترس بود و خطر خراب شدن و از بین رفتن نمونه ها در دوره نگهداری خیلی کم بود. با این وجود نمونه ها در عمق ۲-۴ متری از سطح دریا به دلیل کمبود فضا نگهداری

شدند. نمونه ها سپس در این مکان در یک محیط حاوی مقدار زیادی یون کلر اما با غلظت اکسیژن کم نگهداری شدند. نمونه ها به صورت دستی داخل آب دریا فرو برده شدند و سپس در هر زمانی که نیاز بود مطابق شکل ۲ از آب بیرون آورده می شدند. هر کدام از نمونه ها در هر سایت به طور جداگانه نامگذاری شده بودند، بنابراین عرض ترک ها قبل و بعد از در معرض قرار گرفتن محیط و عملکرد نمونه ها کاملاً قابل تشخیص بود.



شکل ۲- بیرون آوردن نمونه ها از داخل آب به روش دستی

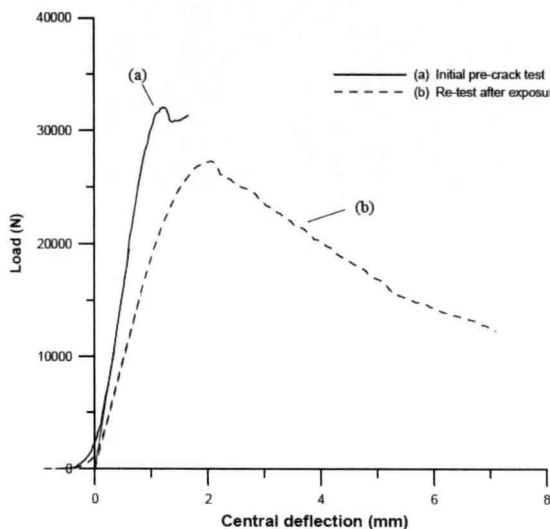
#### ۴-۲ ارزیابی عملکرد

عملکرد پنل های ساخته شده به روش ASTM C-1550 به صورت نرمال بر اساس جذب انرژی نمونه ها گزارش می شود به نحوی که بارگذاری تا تغییر مکان مشخص شده در مرکز نمونه ادامه می یابد و میزان جذب انرژی بدست می آید [۱۱]. در این تحقیق، در اکثر نمونه ها از قبل ترکی ایجاد شده بود که این کار با استفاده از تغییر مکان کنترل شده ای ایجاد شده بود تا به عرض ترک مورد نظر برسیم، سپس چک به حالت اولیه برگردانده و نمونه ها از زیر بار خارج می شدند. این روش بارگذاری باعث ایجاد نمودار نیرو-تغییر مکان نوع 'a' مطابق توضیح داده شده در شکل ۳ شد. از سه ترک ایجاد شده در نقاط مختلف نمونه اندازه گیری شد

تا میانگین عرض ترک خوردگی بدست آید. دستگاه تست موجود در این تحقیق به ما این اجازه را نداد که در زمان حرکت عکس جهت بارگذاری ثبت داده های نیرو و تغییر مکان انجام شود، بنابراین نمودار نیرو-تغییر مکان در زمان بازگشت پیستون قابل دستیابی و ترسیم نبود. همین امر باعث شد تا خطای کوچکی در نتایج جذب انرژی همه نمونه ها اتفاق بیفتد، و مقدار کمی انرژی جذب شده تا رسیدن به ترک اولیه به نمونه در طول زمان جمع شدن پیستون اضافه شود.

سپس هر نمونه در مکان و محیط نگهداری مشخص شده انتقال داده می شد تا اینکه به موعد مشخص شده برسد. سپس نمونه مورد نظر به محل آزمایشگاه انتقال داده می شد و تمیز شده و مجدد عرض ترک خوردگی ها اندازه گیری می شد. سپس آزمایش اعمال نیرو و اندازه گیری تغییر مکان مرکز نمونه انجام شد و نمودار نوع 'b' برای هر نمونه رسم شد که در شکل ۳ قابل مشاهده است.

در نهایت عملکرد هر نمونه با توجه به میزان انرژی جذب شده قبل از در معرض محیط قرار گرفتن و تا ایجاد ترک اولیه، بعد از در معرض محیط بودن و تا تغییر مکان ۴۰ میلیمتر، و مجموع قبل و بعد از در معرض محیط بودن تا تغییر مکان ۴۰ میلیمتر مورد ارزیابی و مقایسه قرار گرفت.



شکل ۳- نمودار نیرو-تغییر مکان نمونه ها، نشان دهنده عملکرد آن ها پیش از در معرض محیط بودن و تا ترک اولیه (a) و پس از آن (b)

### ۳. نتایج

#### ۳-۱ عملکرد نمونه های حاوی الیاف ماکروسینتتیک

پروسه ایجاد ترک در نمونه ها قبل از در معرض محیط قرار گرفتن باعث جذب انرژی شد. مشاهده شد که میزان انرژی جذب شده در طول پروسه آزمایش با شکل گیری ترک ها افزایش یافت (شکل ۴). به طور کلی الیاف ماکروسینتتیک نسبت به الیاف فولادی در ترک های با عرض خیلی کم میزان جذب انرژی کمتری داشت. از آن جایی که حرکت دستگاه تست با عرض ترک ها قابل کنترل نبود، و سه ترک جداگانه طی هر تست ایجاد می شد، امکان اینکه میانگین عرض ترک برای هر نمونه به صورت دقیق قابل کنترل باشد نبود.

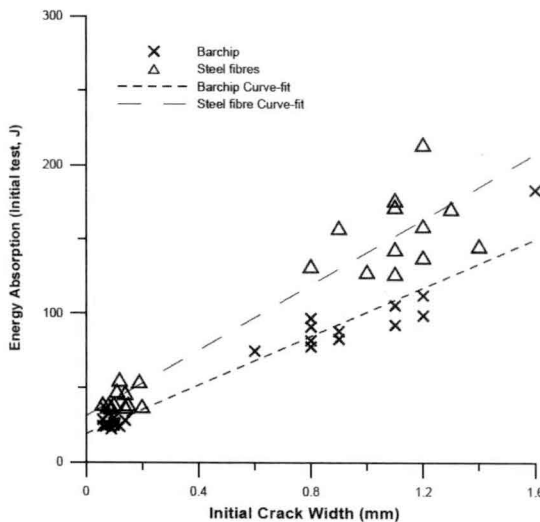
میزان جذب انرژی برای نمونه های مسلح با الیاف ماکروسینتتیک Barchip پس از دوره نگهداری در معرض محیط های ذکر شده در قبل و تا رسیدن به تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلیمتر، در شکل ۵ قابل مشاهده می باشد. نمودار فیت شده برای نتایج حاصله به شکل نمودار هایپربولیک ( $1/x$ ) می باشد. دو نتیجه آخر که نتایجی با عرض ترک بین ۰,۸ تا ۱ میلیمتر ایجاد کرده مربوط به نمونه هایی است که در زمان انتقال نمونه برای تست بعد از در معرض محیط بودن آسیب دیده بودند. اگر این دو نتیجه از نتایج حاصله از الیاف بارچیب کنار گذاشته شوند، ضعیف شدن عملکرد این نمونه ها نسبت به متغیر عرض ترک در مقایسه با میزان عملکرد نمونه هایی که در معرض محیط خورنده نبودند، قابل چشم پوشی است.

در تعدادی از نمونه ها ترک اولیه ایجاد شد و سپس بلافاصله مورد تست مجدد تا رسیدن به تغییر مکان مرکزی مجموع ۴۰ میلیمتر در سن ۵۶ روزه قرار گرفتند (نوع '01W' و '10W')، به جدول ۳ رجوع شود. این تست عملکرد متوسطی که نمونه ها داشتند را مشخص کرد و درجه ظرفیت باربری پس از ترک قابل انتظار از نمونه ها را در شرایط ایده آل (بدون قرارگیری در معرض محیط خورنده) نشان می داد. از این نتایج برای ایجاد نمودار مستقیم خط چین قابل مشاهده در شکل ۵ استفاده شد که عملکرد نمونه های در معرض محیط خورنده قرار گرفته با حالت ایده آل قابل مقایسه باشد. این خط نمودار بر اساس نتایج سه نمونه رسم شد بنابراین می تواند یک شاخص خیلی مطمئن برای مقایسه کلیه نمونه های ترک خورده نباشد. به همین دلیل نمودار فیت شده موجود در شکل ۵ و ۶ با این نمودار یکسان و همگرا نشده اند.

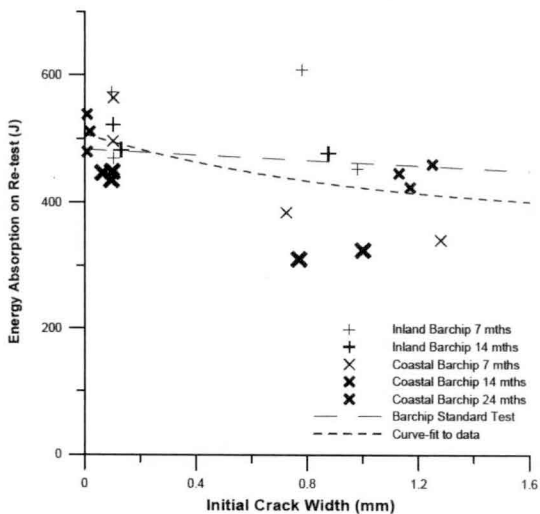
در شکل ۶ عملکرد مجموع انرژی جذب شده نمونه های حاوی الیاف بارچیب قبل و بعد از ایجاد ترک تا رسیدن به تغییر مکان ۴۰ میلیمتر قابل مشاهده است. این نتایج نشان می دهد که ۲ سال در معرض محیط



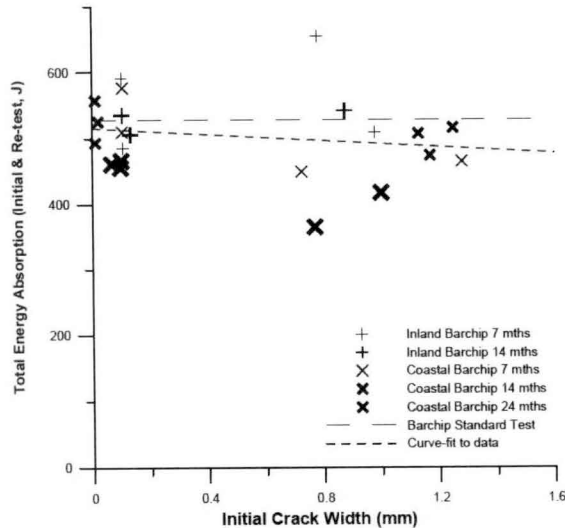
خورنده بودن چه در زیر آب و یا محیط بیرونی، تاثیر چندانی بر روی عملکرد پنل های شانکریت شده مسلح با الیاف Barchip 48 نداشته است.



شکل ۴- جذب انرژی اولیه (تا ترک اولیه) طبق استاندارد C-1550 برای نمونه های حاوی الیاف ماکروسینتتیک و الیاف فولادی



شکل ۵- جذب انرژی نمونه ها پس از در معرض محیط قرار گرفتن و بعد از ترک اولیه، طبق استاندارد C-1550 برای نمونه های حاوی الیاف ماکروسینتتیک Barchip 48



شکل ۶- مجموع انرژی جذب شده تا تغییر مکان ۴۰ میلیمتر طبق استاندارد C-1550 قبل از ایجاد ترک و بعد از ترک، برای نمونه های حاوی الیاف ماکروسینتتیک Barchip 48

## ۲-۳ عملکرد نمونه های حاوی الیاف فولادی

میزان جذب انرژی برای نمونه های مسلح با الیاف فولادی پس از دوره نگهداری در معرض محیط های ذکر شده تا رسیدن به تغییر مکان مرکزی ۴۰ میلیمتر، در شکل ۷ قابل مشاهده می باشد. نتایج نشان داد که انرژی جذب شده پس از ترک، با افزایش عرض ترک به شدت کاهش یافت، چه برای نمونه های در معرض محیط و چه نمونه های نگهداری شده در آب دریا. اگرچه تعداد نمونه های تست شده بعد از هر دوره مشخص در معرض محیط خورنده زیاد نبود، اما نتایج نشان می دهد درصد کاهش عملکرد نمونه های نگهداری شده در محیط بیرونی در ۷ ماهه نخست تغییر چشمگیری نداشت.

وقتی میزان جذب انرژی تجمعی نمونه ها قبل از ایجاد ترک اولیه و بعد از ترک تا رسیدن به تغییر مکان ۴۰ میلیمتر محاسبه شد (شکل ۸)، مشخص شد که برای عرض ترک خوردگی تا ۰٫۲ میلیمتر شدت کاهش عملکرد برای نمونه های حاوی الیاف فولادی زیاد بود، اما بعد از آن با شیب کمتری دچار ضعف در عملکرد شدند. نمودار فیت شده برای این نمونه ها از نوع هایپربولیک ( $1/x^2$ ) شد که بر این اساس می توان کاهش

عملکرد نمونه ها در عرض ترک های خیلی کم را نادیده گرفت. البته به دلیل زیاد نبودن نتایج و نمونه ها برای عرض ترک های خیلی کوچک (کمتر از ۰.۱ میلیمتر) نمی توان اظهار نظر قطعی کرد.

**جدول ۳- خلاصه نتایج عملکردی برای همه نمونه های آزمایش شده طبق استاندارد ASTM C-1550 (هر عدد میانگین ۲ یا ۳ نمونه پنل تست شده می باشد)**

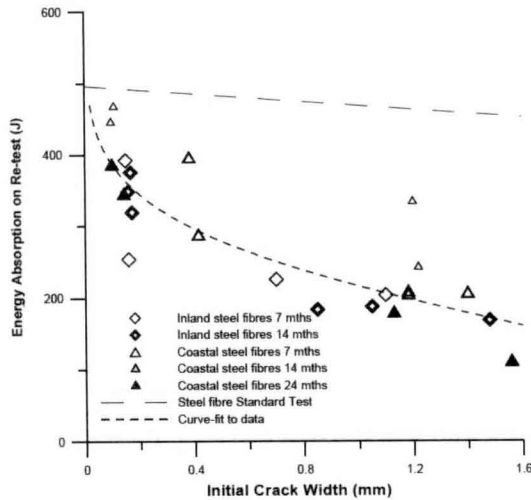
Specimen set	Exposure		Nominal crack width (mm)	Mean re-test energy (J)	Re-test energy over standard result at 56 d	Sum of initial & re-test energy to 40 mm cumulative (J)	Total Energy over control result at 56 d
	Site	duration (months)					
BLW	C-1550 test			502.5			
BL01W	Control, 56 d		0.1	470.0		496.7	
BL10W	Control, 56 d		1.0	433.0		518.0	
BI01X	Inland	7	0.1	511.5	1.065	538.3	1.061
BI01Y	Inland	14	0.1	468.7	0.975	497.8	0.982
BI10X	Inland	7	1.0	500.5	1.080	581.8	1.061
BI10Y	Inland	14	1.0	415.3	0.896	515.6	0.940
BS01X	Coastal	7	0.1	519.0	1.080	543.2	1.071
BS01Y	Coastal	14	0.1	498.3	1.037	525.3	1.036
BS01Z	Coastal	24	0.1	433.7	0.903	460.8	0.909
BS10X	Coastal	7	1.0	319.0	0.688	456.8	0.833
BS10Y	Coastal	14	1.0	415.3	0.896	498.7	0.909
BS10Z	Coastal	24	1.0	293.5	0.633	390.9	0.713
HLW	C-1550 test			592.5			
HL01W	Control, 56 d		0.1	494.0		531.7	
HL10W	Control, 56 d		1.0	473.5		577.0	
HI01X	Inland	7	0.1	397.0	0.841	447.4	0.832
HI01Y	Inland	14	0.1	352.7	0.726	385.3	0.717
HI10X	Inland	7	1.0	223.5	0.599	348.6	0.585
HI10Y	Inland	14	1.0	188.7	0.543	315.6	0.529
HS01X	Coastal	7	0.1	466.0	0.947	501.5	0.933
HS01Y	Coastal	14	0.1	345.0	0.719	382.0	0.502
HS01Z	Coastal	24	0.1	367.0	0.755	402.3	0.748
HS10X	Coastal	7	1.0	308.0	0.794	455.0	0.763
HS10Y	Coastal	14	1.0	217.3	0.672	388.3	0.652
HS10Z	Coastal	24	1.0	151.0	0.519	302.3	0.507

**۴. بحث**

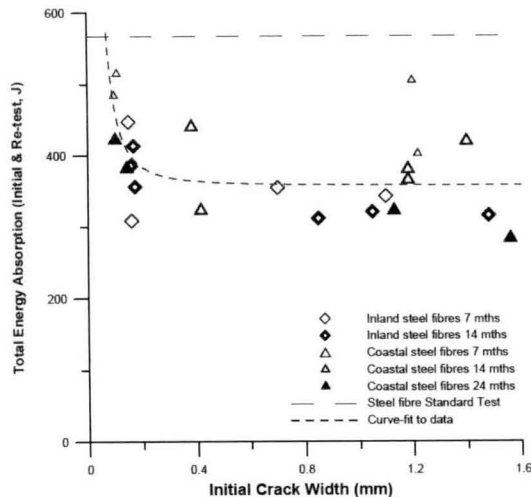
**۴-۱ بررسی تاثیر عرض ترک**

شاید مهمترین نتیجه بدست آمده از این تحقیق این مشاهده بود که میزان تاثیرپذیری در کاهش عملکرد و جذب انرژی نمونه های شاکریت مسلح شده با الیاف فولادی در برابر میزان عرض ترک خوردگی بسیار زیاد می باشد، حتی در مقایسه با مدت زمان در معرض محیط خورنده بودن (تا ۲ سال) و شرایط قرارگرفتن در محیط خورنده (در آب یا بیرون). وقتی ترکی با عرض بیشتر از ۰.۲ میلیمتر ایجاد می شد، میزان ظرفیت باربری باقیمانده پس از ترک نمونه بعد از گذشت حتی ۷ ماه در معرض محیط خورنده بودن نسبت به زمانی که عرض ترک کمتر از ۰.۱ میلیمتر بود یا ترکی نداشتیم، بسیار اندک بود. مشاهده شد

هنگامی که میزان انرژی جذب شده در زمان ایجاد ترک نمونه‌ها با انرژی جذب شده پس از در معرض محیط بودن جمع شد، تمام ترک‌های با عرض حدوداً بیش از ۰٫۱ میلی‌متر منجر به ضعیف شدن و کاهش عملکرد نمونه‌های حاوی الیاف فولادی می‌شود.



شکل ۷- جذب انرژی نمونه‌ها تا ۴۰ میلی‌متر پس از در معرض محیط قرار گرفتن و بعد از ترک اولیه، طبق C-1550 برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی



شکل ۸- مجموع انرژی جذب شده تا تغییر مکان ۴۰ میلی‌متر طبق استاندارد C-1550 قبل از ایجاد ترک و بعد از ترک، برای نمونه‌های حاوی الیاف فولادی

## ۲-۴ بررسی تاثیر مکان نگهداری نمونه ها

همانطور که قبلا اشاره شد در این تحقیق دو محل برای در معرض محیط قرار دادن نمونه ها استفاده شد، یکی در محیط آزاد و تقریبا خالی از یون های کلراید، و دیگری در زیر آب و کاملا حاوی یون های کلراید و البته با غلظت اکسیژن کم. این واقعیت که میزان و عمق ضعیف شدن عملکرد نمونه های شاتکریت مسلح با الیاف فولادی در هر دو نوع محیط نگهداری شده یکسان بود، این مطلب را می رساند که وجود ترک به تنهایی نقش بسیار مهمی در عملکرد بتن حاوی الیاف فولادی می تواند بگذارد، صرفنظر از اینکه در محیط خورنده شدید هست یا خیر.

نسبت به انتظاراتی که در مورد کاهش کیفیت عملکرد شاتکریت/بتن الیافی ترک خورده در محیط هوای باز داشتیم، نتیجه گیری فوق از اهمیت بالایی برخوردار است. تاکنون در استرالیا این طور فرض می شد که محیط های عاری از منابع یون کلراید تقریبا به عنوان محیط های بی خطر برای خوردگی فولاد محسوب می شوند. بنابراین میزان کاهش و از دست دادن طاقتمت نمونه های ترک خورده بتن و شاتکریت الیافی فرض می شد که در نمونه های نگهداری شده در آب دریا بیشتر از هوای آزاد باشد. اما در این تحقیق خطر یکسان بود. لازم است این یافته ها در کاربردهای مهمی مانند بتن الیافی روی زمین که خوردگی در محل ترک های ناشی از جمع شدگی محتمل است بررسی شود و به آن توجه زیادی گردد.

## ۵. نتیجه گیری

دوام نمونه های شاتکریت شده الیافی مسلح با الیاف فولادی و الیاف ماکروسینتتیک با روش ایجاد ترک از قبل و در معرض قراردادن نمونه های ترک خورده به مدت ۷ تا ۲۴ ماه در فضای آزاد و درون آب دریا مورد ارزیابی قرار گرفت. مطابق استاندارد ASTM C-1550 با آزمایش مقاومت پس از ترک خوردگی یا ظرفیت جذب انرژی، تاثیر خوردگی بر عملکرد نمونه ها قبل از قرارگیری در محیط های خورنده (برای کنترل) و بعد از قرارگیری مورد ارزیابی قرار گرفت.

دوام شاتکریت الیافی حاوی الیاف ماکروسینتتیک در هر دو محیط آزاد و درون آب دریا بسیار عالی بود. این مقدار بالای دوام از عرض ترک خوردگی مستقل بود و در واقع افزایش عرض ترک منجر به بدتر شدن عملکرد نشد.

در مقابل، عملکرد نمونه های حاوی الیاف فولادی در خوردگی حتی بعد از گذشت ۷ ماه قرارگیری در محیط خورنده بسیار تحت تاثیر منفی قرار گرفت. عرض ترک ها هم بر کاهش عملکرد این نمونه ها تاثیر محسوسی گذاشت. ترک های دارای عرض بیش از ۰.۱ میلیمتر میزان خرابی بسیار بیشتری بر جای گذاشتند. این واقعیت که میزان و عمق ضعیف شدن عملکرد نمونه های شاتکریت مسلح با الیاف فولادی در هر دو نوع محیط نگهداری شده یکسان بود، این مطلب را می رساند که وجود ترک به تنهایی نقش بسیار مهمی در عملکرد بتن حاوی الیاف فولادی می تواند بگذارد، صرفنظر از اینکه در محیط خورنده شدید هست یا خیر.

## ۶. منابع

- [1] Mangat, P.S. and Gurusamy, K. 1985. Steel fibre reinforced concrete for marine applications, 4th International Conference on Behaviour of Offshore Structures, Delft, The Netherlands, pp867-879.
- [2] Hara, T., Shoya, M., and Kikuchi, K. 1992. Assessment of steel fibre concrete exposed for 14 years, Fibre Reinforced Cement and Concrete, Ed. R.N. Swamy, pp872-882.
- [3] Schupack, M. 1985. Durability of SFRC exposed to severe environments, Proceedings, U.S.-Sweden Joint Seminar on Steel Fiber Concrete, Swedish Cement and Concrete Research Institute, Stockholm, pp479-496.
- [4] Hoff, G., 1987. Durability of Fiber Reinforced Concrete in a Severe Marine Environment, Concrete Durability – Katharine and Bryant Mather International Conference SP-100, American Concrete Institute, pp997-1041.
- [5] Lankard, D.R. and Walker, H.J. 1978. Laboratory and field investigations of the durability of Wirand concrete exposed to various service environments, Battelle Development Corp., Columbus Laboratories, Ohio, 26p.
- [6] Neville, A. 1995. Chloride attack of reinforced concrete: an overview, Materials and Structures, 28, pp63-70.

[7] Nemegeer, D. & Stang, H. 2003. Brite Euram Program Steel Fibre Concrete Subtask: Durability – Corrosion Resistance of Cracked Fibre Reinforced Concrete. RILEM TC 162 –TDF Workshop, Bochum Germany.

[8] Kosa, K. and Naaman, A.E., 1990. Corrosion of Steel Fiber Reinforced Concrete, *ACI Materials*, 87 (1), Jan-Feb, pp27-37.

[9] Nordström, E., 1999. Durability of steel fibre reinforced sprayed concrete with regard to corrosion, *Proceedings, 3rd Int. Symposium on Sprayed Concrete*, Gol, Norway, 26-29 September.

[10] Nordström, E., 2001. Durability of steel fibre reinforced shotcrete with regard to corrosion, *Shotcrete: Engineering Developments*, Bernard (ed.), pp213-217, Swets & Zeitlinger, Lisse.

[11] American Society for Testing and Materials, 2002. Standard C-1550, Standard Test Method for Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete (Using Centrally Loaded Round Panel), ASTM, West Conshohocken.