

## تأثیر نانورس بر دوام تیرهای بتن مسلح تحت بارهای بهره‌برداری و تهاجم کلراید

طالب رودیان<sup>۱</sup>، حمید رحمانی<sup>۲\*</sup>، شهاب‌الدین حاتمی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد مهندسی سازه، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

۲- استادیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه زنجان، زنجان، ایران

۳- دانشیار، دانشکده فنی و مهندسی، گروه مهندسی عمران، دانشگاه یاسوج، یاسوج، ایران

### چکیده

دوام بتن‌های مسلح در محیط‌های خورنده در سال‌های اخیر با استفاده از افزودنی‌های مختلف افزایش یافته است. در این تحقیق نیز نانو ذرات رس به میزان ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی سیمان، جایگزین سیمان در طرح اختلاط شاهد شده‌اند. بر همین اساس ۲۴ عدد تیر بتن مسلح پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب به سه گروه تقسیم‌بندی شدند که در هر گروه میزان جایگزینی نانو ذرات رس متغیر می‌باشد. گروه اول شامل ۸ عدد تیر که پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند. گروه دوم و سوم نیز هر کدام شامل ۸ عدد تیر بودند که پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب به مدت ۶ ماه در محلول کلراید و چرخه تر و خشک قرار گرفته و سپس تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند، با این تفاوت که تیرهای گروه سوم در مدت ۶ ماه قرارگیری در محلول خورنده تحت بارگذاری نیز قرار داشتند. همچنین مقاومت فشاری و جذب آب کلیه طرح اختلاط‌ها در سنین مختلف اندازه‌گیری گردید. نتایج نشان داد که افزودن نانورس به بتن باعث کاهش قابل توجه مقاومت فشاری شده و همین امر باعث می‌گردد که ظرفیت خمشی تیرها نیز کاهش یابد. علاوه بر این افزودن نانورس به بتن باعث کاهش جذب آب نیم ساعته و افزایش جذب آب ۲۴ ساعته می‌شود. ضمناً نتایج نشان داد که قرارگیری تیرها در محلول کلراید و سیکل‌های تر و خشک باعث کاهش ظرفیت خمشی تیرها می‌گردد، اما بارگذاری تیرها تأثیر مخرب محلول کلراید را کاهش می‌دهد. همچنین تیرهای حاوی نانورس در برابر تهاجم کلرایدها به مراتب عملکرد بهتری داشتند.

کلمات کلیدی: نانورس، تیر بتن مسلح، بار بهره‌برداری، یون کلراید، سیکل تر و خشک، خوردگی آرماتور

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:			
10.22065/JSCE.2018.98869.1337	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
doi: 10.22065/JSCE.2018.98869.1337	۱۳۹۸/۰۶/۰۱	۱۳۹۶/۱۱/۰۷	۱۳۹۶/۱۱/۰۷	۱۳۹۶/۱۰/۰۶	۱۳۹۶/۰۷/۰۳
حمید رحمانی hrahmani@znu.ac.ir			*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:		

## Effect of Nano Clay on the Durability of Reinforced Concrete Beams under Service Loads and Chloride Attack

Taleb Roodian<sup>1</sup>, Hamid Rahmani<sup>2\*</sup>, Shahabaddin Hatami<sup>3</sup>

1-M.Sc. Student in Structural Engineering, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

2-Assistant Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, University of Zanjan, Zanjan, Iran

3- Associate Professor, Faculty of Engineering, Department of Civil Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran

### ABSTRACT

*Durability of reinforced concrete (RC) structures has been increased using different additives under corrosive environments in the recent years. In the present study, 0, 0.5, 1 and 1.5 percentage of nano clay particles were substituted as cement. Therefore, 24 RC beams divided in three groups after 28 days of curing. The first group consists of 8 beams which were tested after 28 days of moist curing. The second and the third groups consist of 8 beams in each group, which were tested after 6 months exposure in chloride solution and wetting and drying cycles, where the third group beams were additionally under service loads. Also, compressive strength and water absorption of the mixtures were evaluated at different ages. Results showed that the addition of nano-clay particles considerably reduces the compressive strength of concretes which consequently decreases the flexural capacity of the beams. In addition, nano-clay particles reduce the half-hour water absorption and increase 24-hour water absorption. Also, results showed that the wetting and drying cycles of chloride solution for 6 months reduces the flexural capacity of the beams, but service loads reduces the negative effect of the exposure. Also, the beams containing nano-clay particles showed better performance under chloride attack.*

### ARTICLE INFO

Received: 25/09/2017

Revised: 27/12/2017

Accepted: 27/01/2018

### Keywords:

*Nano-clay,  
Reinforced concrete beam,  
Service loads,  
Chloride ion,  
Wetting and drying cycle,  
Corrosion of rebar.*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2018.98869.1337

\*Corresponding author: Hamid Rahmani

Email address: hrahmani@znu.ac.ir

## ۱- مقدمه

در سال‌های اخیر، خوردگی آرماتورهای فولادی در بتن مسلح به عنوان یکی از مهمترین دلایل اصلی خرابی‌های زودرس سازه‌های بتن آرمه، مخصوصاً در محیط‌های دریایی، گزارش شده است [۳-۱]. بنابراین در نظر گرفتن اثر عوامل محیطی مخرب جهت طراحی سازه‌های بتنی در مجاورت آب دریا ضروری بوده و لازم است به دوام بتن نیز علاوه بر معیار مقاومت توجه گردد. در این میان تحقیقات زیادی در خصوص دوام بتن‌های قرار گرفته در منطقه خلیج فارس به دلیل املاح زیاد موجود در آب دریا و شرایط اقلیمی حاکم انجام شده است [۵-۱]. در این میان نفوذپذیری بتن نقش بسزایی در خوردگی آرماتورها و تخریب پوشش بتن روی میلگرد دارد. در صورت اعمال بارهای بهره‌برداری نیز عضو بتن آرمه ترک خورده و در نتیجه یون‌های کلراید به آسانی وارد بتن شده و با تسریع خوردگی میلگردها عملکرد عضو بتن آرمه کاهش می‌یابد. لذا، مقیدسازی یون کلراید توسط افزودنی‌ها یکی از راه‌های جلوگیری از ایجاد خوردگی در آرماتورهای بتن مسلح می‌باشد که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری از محققین بوده است [۷-۳]. در تحقیق حاضر از نانورس مونت موریلونیت به عنوان ماده افزودنی معدنی استفاده شده است که این ذرات به دلیل وجود بارهای الکتریکی مثبت و منفی در سطح خود می‌توانند همزمان با دفع یا جذب یون‌های کلراید خوردگی میلگردها را به تعویق اندازند. در ادامه به برخی از تحقیقات انجام شده در خصوص تاثیر مواد افزودنی بر نفوذپذیری و مقیدسازی یون کلراید اشاره می‌شود.

گرابر<sup>۱</sup> و همکاران [۶] در سال ۲۰۰۱ نشان دادند که افزودن متاکائولین ضریب نفوذپذیری یون کلراید را نسبت به بتن معمولی کاهش می‌دهد. بای<sup>۲</sup> و همکاران [۸] در سال ۲۰۰۲ عمق نفوذ یون کلر در بتن حاوی متاکائولین را بررسی کرده و دریافتند که استفاده از متاکائولین در بتن سبب کاهش عمق نفوذ یون کلراید می‌گردد. فرجی و افشین در سال ۱۳۸۴ دوام بتن‌های مسلح حاوی پوزولان‌های مختلف در شرایط متفاوت محیطی را مورد بررسی قرار دادند [۷]. نتایج حاکی از تاثیر مخرب‌تر شرایط جزر و مدی بر کاهش میزان مقاومت فشاری، افزایش نفوذ یون کلر و پتانسیل خوردگی داشت. چهکندی و همکاران [۹] در سال ۱۳۹۰ دوام بتن خودتراکم حاوی نانو-سیلیس را در مجاورت آب دریا و اثرات جزر و مدی بررسی کرده و نشان دادند که محیط جزر و مدی نسبت به محیط مستغرق مخرب‌تر می‌باشد. همچنین در سال‌های اخیر تاثیر خوردگی آرماتور بر ظرفیت باربری عضو بتن مسلح نیز بررسی شده است که در ادامه به برخی موارد اشاره می‌شود. تسنیمی و همکاران [۱۰] در سال ۱۳۸۴ اثر خوردگی میلگرد بر مقاومت خمشی تیرهای بتن مسلح تحت اثر نیروهای قائم تناوبی را بررسی کردند. نتایج این تحقیق نشان داد که در صورت وقوع خوردگی آرماتورها به علت تهاجم کلراید و عدم ترک خوردگی تیر تحت بارهای وارده اصطکاک بین میلگرد و بتن افزایش یافته و این امر باعث می‌شود که سختی خمشی تیرها به صورت کاذب افزایش یابد، چراکه در واقع میزان جذب انرژی تیرها کاهش می‌یابد. پوربهی و همکاران [۱۱] در سال ۱۳۸۵ اثر خوردگی آرماتورها بر ظرفیت باربری اعضای بتنی را در محیط‌های دریایی بررسی نمودند. نتایج حاکی از آن بود که در صورت نفوذ کلراید سطح مقطع آرماتورها در طول زمان به دلیل خوردگی کاهش می‌یابد و مقدار این کاهش برای محیط‌های مختلف و نرخ‌های خوردگی متفاوت متغیر است. همچنین تأثیر قابل توجه یون‌های کلراید بر کاهش ظرفیت باربری یک عضو بتنی انکارناپذیر است. در سال ۲۰۰۷ ویدال<sup>۳</sup> و همکاران [۱۲] نتایج بررسی‌های انجام شده در خوردگی بتن مسلح در معرض محیط کلرایدی به مدت ۱۷ سال را منتشر نمودند. در تحقیق مذکور، نمونه‌های بتن مسلح به مدت ۱۷ سال تحت بارهای بهره‌برداری و در محیط کلرایدی نگهداشته شد. در مراحل مختلف، نقشه رشد ترک‌ها تعیین شده و میزان یون کلراید کل به انضمام مشخصات مکانیکی نمونه‌ها اندازه‌گیری شد. نتایج نشان داد که با گذشت زمان، تعداد و عرض ترک‌ها در نواحی کششی و فشاری تیرها افزایش یافته و همچنین سختی خمشی تیرها در معرض خوردگی کاهش یافته است.

در تحقیق حاضر، نانورس مونت موریلونیت به میزان ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد وزنی جایگزین سیمان در طرح اختلاط شاهد شده است. سپس ۶ عدد تیر از هر طرح اختلاط ساخته شده و ۲ عدد از آنها تحت بارهای بهره‌برداری قرار گرفتند. تیرهای مذکور به مدت ۲۸ روز با آب عمل‌آوری شده و سپس به مدت ۶ ماه در محیط کلرایدی و تحت سیکل تر و خشک قرار گرفتند. در پایان تیرها تحت آزمایش خمشی قرار گرفته و نتایج ثبت گردید.

<sup>1</sup> Gruber<sup>2</sup> Bai<sup>3</sup> Vidal

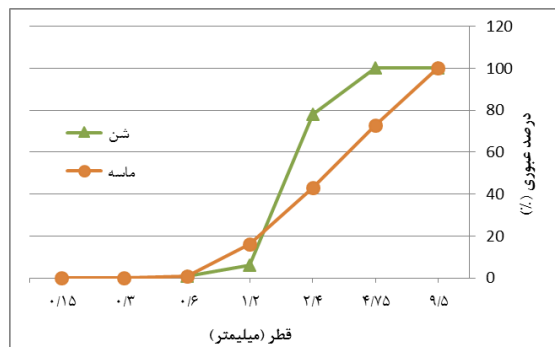
## ۲- مواد مصرفی

سیمان: در این تحقیق از سیمان پرتلند تیپ یک کارخانه یاسوج استفاده شد. نتایج آزمایش‌های شیمیایی سیمان مصرفی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: نتایج آزمایش‌های شیمیایی سیمان مصرفی

ترکیبات اصلی (درصد وزنی)					ترکیبات شیمیایی (درصد وزنی)						ترکیبات نتایج آزمایش
C <sub>2</sub> S	C <sub>3</sub> S	C <sub>4</sub> AF	C <sub>3</sub> A	Free CaO	SO <sub>3</sub>	CaO	MgO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	
۱۵/۳۲	۵۹/۹۵	۱۱/۵۶	۶/۶۱	۱/۲	۱/۲	۶۴/۴۶	۲/۲۱	۳/۸	۴/۹۲	۲۱/۱۲	

**سنگدانه‌ها:** به علت تراکم زیاد خاموت در نمونه‌های تیر بتن مسلح که به منظور جلوگیری از شکست برشی در تیرها استفاده شده بود و همچنین ضخامت کم پوشش بتن روی خاموت، حداکثر اندازه اسمی سنگدانه‌ها ۱۱ میلی‌متر در نظر گرفته شد. ماسه شسته مصرفی نیز از کارخانه یاسوران یاسوج تهیه شد. نمودار دانه‌بندی شن و ماسه در شکل ۱ نشان داده شده است. در جدول ۲ نیز سایر مشخصات سنگدانه‌ها ارائه شده است.



شکل ۱: منحنی دانه‌بندی شن و ماسه

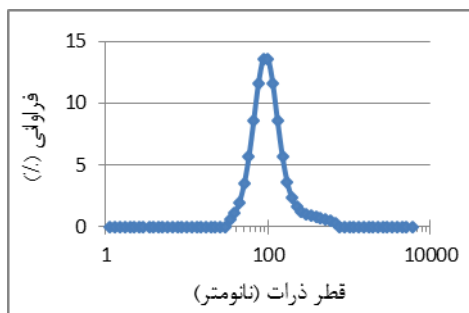
جدول ۲: مشخصات مصالح مصرفی

ماسه شسته	شن نخودی	
۲۶۲۰	۲۶۴۰	وزن مخصوص ( $\frac{kg}{m^3}$ )
۰/۹۱	۱/۰۰	درصد جذب آب (%)

**نانورس:** نانو رس مورد استفاده در این تحقیق مونت موریلونیت با خلوص ۹۵٪ بوده و شکل ظاهری آن به صورت پودر و به رنگ سفید شیری می‌باشد. همچنین چگالی ظاهری و سطح مخصوص آن به ترتیب ۰/۴۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و ۷۶۰ مترمربع بر گرم می‌باشد. در شکل ۲ نمودار توزیع قطر ذرات نانورس مونت موریلونیت مصرفی نشان داده شده است.

**فوق روان‌کننده:** در این تحقیق جهت جلوگیری از کلوخه شدن ذرات نانورس، به میزان ۲٪ وزنی نانورس، از فوق‌روان‌کننده پما<sup>۴</sup> بر پایه پلی‌کربکسیلات استفاده شد. این محصول به صورت مایع با وزن مخصوص حدود ۱/۱۵ گرم بر سانتی‌متر مکعب و دارای رنگ قهوه‌ای روشن بود. درصد ذرات جامد معلق در آن حدود ۳۲ تا ۳۴ درصد و درجه اسیدی<sup>۵</sup> آن نیز بین ۶ تا ۸ بود.

<sup>۴</sup> Pema<sup>۵</sup> pH

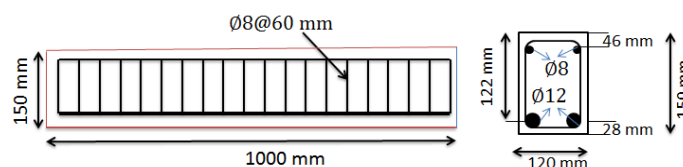


شکل ۲: نمودار توزیع ذرات نانورس مونت موریلونیت

**فولاد:** در این تحقیق از میلگردهای آجدار به قطر ۸ و ۱۲ میلیمتر با تنش تسلیم ۴۰۰ مگاپاسکال و تنش نهایی ۶۰۰ مگاپاسکال به عنوان خاموت و میلگردهای طولی در تیرهای بتن مسلح استفاده شد.  
**فنز:** به منظور اعمال بارهای بهره‌برداری به تیرهای بتن مسلح، از فنرهایی به طول اولیه ۲۰/۵ سانتیمتر و سختی ۲۵ کیلوگرم بر سانتیمتر استفاده شد.

### ۳- روش انجام کار

**طراحی و ساخت تیرهای بتن مسلح:** تیرهای بتن مسلح مطابق مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان [۱۳] و بر اساس وقوع شکست خمشی، طراحی و ساخته شدند. در شکل ۳ ابعاد و نحوه آرماتورگذاری تیرها نشان داده شده است. در تحقیق حاضر ۲۴ عدد تیر بتن مسلح پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب به سه گروه تقسیم‌بندی شدند. گروه اول شامل ۸ عدد تیر که پس از ۲۸ روز تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند. گروه دوم و سوم نیز هر کدام شامل ۸ عدد تیر بودند که پس از قرارگیری به مدت ۶ ماه در محلول کلراید و چرخه تر و خشک، تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند، با این تفاوت که تیرهای گروه سوم در مدت ۶ ماه تحت بارگذاری قرار داشتند. هر گروه شامل تیرهای ساخته شده با درصدهای مختلف نانورس از ۰ تا ۱/۵ درصد بود. همچنین در تحقیق حاضر، تیر ۲۸ روزه بدون نانورس، به عنوان نمونه شاهد در نظر گرفته شده است.



شکل ۳: ابعاد و نحوه آرماتوربندی تیرها در تحقیق حاضر

**ساخت بتن:** طرح اختلاط بتن مرجع بر اساس روش طرح اختلاط انجمن بتن آمریکا<sup>۶</sup> و با فرض مقاومت مشخصه ۲۸ مگاپاسکال و بزرگترین اندازه‌ی اسمی سنگدانه ۱۱ میلیمتر بدست آمد [۱۴]. در این تحقیق چهار طرح اختلاط با ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانورس جایگزین سیمان به شرح جدول ۳ مورد بررسی قرار گرفتند. جهت ساخت مخلوط‌های حاوی نانورس، ابتدا فوق‌روان‌کننده به میزان ۰/۲٪ وزنی نانورس با مقداری از آب طرح اختلاط مخلوط و به نانورس اضافه شد. مخلوط نانورس و فوق‌روان‌کننده توسط مخلوط‌کن استاندارد به مدت دو دقیقه با دور کند مخلوط گردید تا خمیر با لزجت کم ایجاد شود. سپس عمل اختلاط به مدت دو دقیقه با سرعت بالا ادامه یافت. باقیمانده آب مخلوط و خمیر نانورس تهیه شده، در مخلوط‌کن بتن ریخته شده و عمل اختلاط صورت گرفت. در حین اختلاط سیمان به تدریج به مخلوط اضافه شد تا خمیری همگن ایجاد شود. پس از آن شن و ماسه به تدریج به خمیر سیمان اضافه و مخلوط شد. بتن تهیه شده در سه لایه در قالب‌های چوبی تیر ریخته شده و با ضربه زدن توسط یک میله به قطر ۱۲ میلیمتر متراکم شد. همچنین ۱۴

<sup>۶</sup> ACI

نمونه مکعبی ۱۰ سانتیمتری برای هر طرح اختلاط، به منظور اندازه‌گیری مقاومت فشاری و درصد جذب آب در سنین مختلف ساخته شد. بعد از ۲۴ ساعت عمل‌آوری مرطوب، قالب‌ها باز شده و نمونه‌ها جهت عمل‌آوری در آب قرار داده شدند.

جدول ۳: طرح اختلاط بتن‌های مورد استفاده

شماره طرح	C1	C2	C3	C4
w/c	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳	۰/۴۳
نانورس ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۰	۲/۶	۵/۲	۷/۸
نانورس (درصد وزنی سیمان)	(۰)	(۰/۵)	(۱)	(۱/۵)
شن نخودی ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۷۲۵	۷۲۵	۷۲۵	۷۲۵
ماسه ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۸۱۲	۸۱۲	۸۱۲	۸۱۲
سیمان ( $\frac{kg}{m^3}$ )	۵۲۳	۵۲۰/۴	۵۱۷/۸	۵۱۵/۲
درصد وزنی فوق‌روان‌کننده نسبت به سیمان	۰	۰/۰۱	۰/۰۲	۰/۰۳
اسلامپ (cm)	۱۷	۱۸	۱۹	۲۱

محاسبه بار بهره‌برداری و عرض ترک در تیرها: لنگری که باعث ترک خوردگی مقطع می‌شود، از رابطه (۱) برابر ۱/۶۴

کیلونیوتن - متر محاسبه می‌شود.

$$f_{cr} = \frac{M_{cr} C}{I} \rightarrow M_{cr} = 1.64 kN.m \quad (1)$$

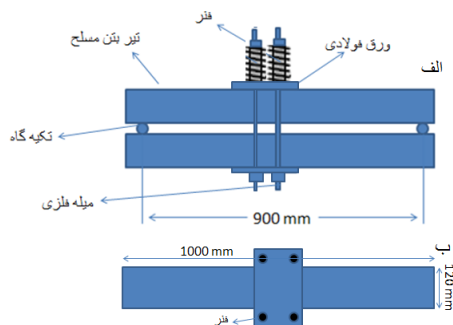
که پارامترهای  $M_{cr}$  و  $f_{cr}$  به ترتیب ممان اینرسی مقطع برابر  $\frac{bh^3}{12} = 38143067.03 mm^4$ ، تنش ترک‌خوردگی بتن کششی

لنگر ترک‌خوردگی بتن و فاصله‌ی دورترین تار کششی بتن تا تار خنثی که مطابق مقطع تبدیل یافته برابر با  $0.6\sqrt{f_c}$  محاسبه شده است، می‌باشند. جهت وقوع ترک‌های خمشی لازم است لنگر ایجاد شده در اثر بارهای بهره‌برداری، بیشتر از مقدار لنگر ترک-خوردگی مقطع باشد. همچنین بر اساس مبحث ۹ مقررات ملی ساختمان، لازم است تنش در فولادهای کششی در محیط‌های خورنده محدود گردد. لذا، با در نظر گرفتن رفتار الاستوپلاستیک و اعمال لنگر ترک‌خوردگی، میزان تنش در آرماتورها برابر  $0.626 f_y$  محاسبه گردید. جهت اطمینان از ترک‌خوردگی مقطع، میزان تنش در فولاد برابر با  $0.63 f_y$  در نظر گرفته شده و میزان لنگر متناظر نیز برابر با  $1.805 kN.m$  محاسبه گردید. بنابراین میزان بار اعمالی متمرکز در وسط تیر جهت وقوع ترک‌خوردگی از رابطه (۲) برابر با ۸۰۰ کیلوگرم بدست می‌آید:

$$M = \frac{PL}{4} \rightarrow P = \frac{(4 \times 1.805)}{0.9} = 800 kg \quad (2)$$

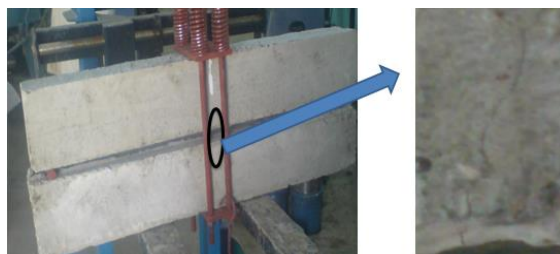
**اعمال بار بهره‌برداری به تیرها:** به منظور اعمال بار بهره‌برداری به تیرها مطابق شکل ۴ از چهار عدد فنر با سختی ۲۵ کیلوگرم

بر سانتیمتر در وسط تیر استفاده شد. هر فنر به میزان ۸ سانتیمتر فشرده شد. بنابراین با توجه به تعداد و سختی فنرها بار بهره‌برداری به میزان ۸۰۰ کیلوگرم به تیرها اعمال شد. هر چند جهت ثابت نگه داشتن بارها در مدت ۶ ماه کافی بود تا افزایش طول فنرها به علت خزش تیر بتنی، با بستن پیچ‌ها تنظیم گردد، اما با اعمال بار ۸۰۰ کیلوگرم بر تیرها، خیز ناشی از خزش پس از ۶ ماه با استفاده از ضوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان برابر با ۰/۲ میلیمتر محاسبه شد که با خیز اندازه‌گیری شده در این تحقیق برابر بود. این میزان خیز با توجه به سختی فنرها، افت باری در حدود ۳ کیلوگرم ایجاد می‌نماید، که از این افت بار در مقایسه با بار اعمالی صرف‌نظر گردید. همچنین عرض ترک خمشی ایجاد شده به علت بار اعمالی با استفاده از ضوابط مبحث نهم مقررات ملی ساختمان برابر ۰/۱۴۹ میلیمتر محاسبه گردید. در شکل ۵ ترک ایجاد شده در تیر تحت بار بهره‌برداری نشان داده شده است.



شکل ۴: نحوه‌ی اعمال بار بهره‌برداری به تیرها (الف) دید از پهلو (ب) دید از بالا

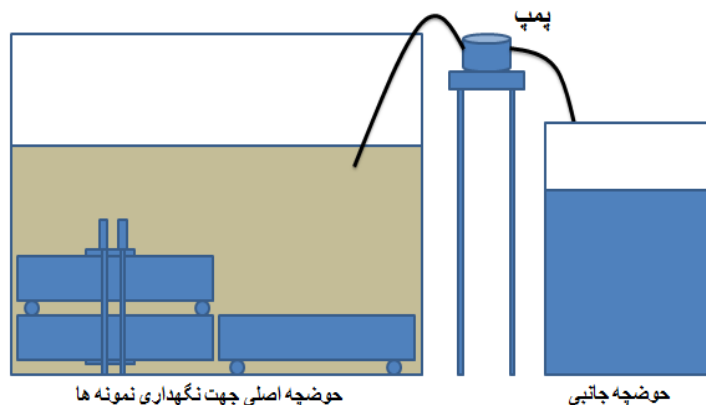
**شرایط محیطی قرارگیری نمونه‌ها:** یکی از شرایط لازم برای شروع خوردگی میلگردهای موجود در بتن مسلح، وجود یون کلراید کافی در مجاورت میلگرد می‌باشد. بدین منظور، تعدادی از نمونه‌های تیر بتن مسلح در محلول کلراید ۵٪ قرار گرفتند. برای تهیه محلول ۵٪ کلر، ۸/۳۳٪ سدیم کلراید در آب حل شد [۱۵]. همچنین برای وقوع خوردگی آرماتور وجود اکسیژن و رطوبت کافی در سطح میلگرد ضروری است که جهت این امر از چرخه‌ی تر و خشک استفاده گردید. لذا از یک حوضچه اصلی به ابعاد  $20 \times 15 \times 10.5$  سانتیمتر برای نگهداری نمونه‌ها درون محلول و یک حوضچه جانبی به ابعاد  $117 \times 80 \times 55$  سانتیمتر برای تخلیه محلول جهت خشک‌شدن نمونه‌ها و یک پمپ به منظور جابه‌جا کردن محلول بین دو حوضچه استفاده شد. شکل ۶ به صورت شماتیک نحوه قرارگیری این حوضچه‌ها و پمپ را نشان می‌دهد. چرخه تر و خشک‌شدن تیرها با قراردادن آنها در محلول به مدت ۱۰ ساعت و خارج کردن تیرها از محلول به مدت ۱۴ ساعت در یک شبانه روز انجام شد. در انتهای زمان خشک‌شدن، رنگ تیرها به علت حذف رطوبت سطح تیرها، سفید می‌شد. چرخه مذکور به مدت ۶ ماه بر روی تیرها انجام شد.



شکل ۵: ایجاد ترک در تیر با اعمال بار بهره‌برداری

#### ۴- آزمایشهای مورد نظر

**آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب:** مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های تحت بررسی، در سنین ۱۴، ۲۸، ۹۰ و ۲۱۰ روز و جذب آب طرح اختلاط‌ها نیز در سنین ۲۸، ۹۰ و ۲۱۰ روز، اندازه‌گیری گردید. جهت تعیین درصد جذب آب، نمونه‌های مکعبی  $10 \times 10 \times 10$  سانتی‌متر در دمای  $55 \pm 5$  °C تا رسیدن به وزن ثابت خشک شده و پس از توزین نمونه‌ها به مدت ۰/۵ و ۲۴ ساعت در آب قرار گرفتند. وزن نمونه‌ها پس از رسیدن به حالت اشباع با سطح خشک، مجدداً اندازه‌گیری شده و در نهایت درصد جذب آب نمونه‌ها محاسبه شد.



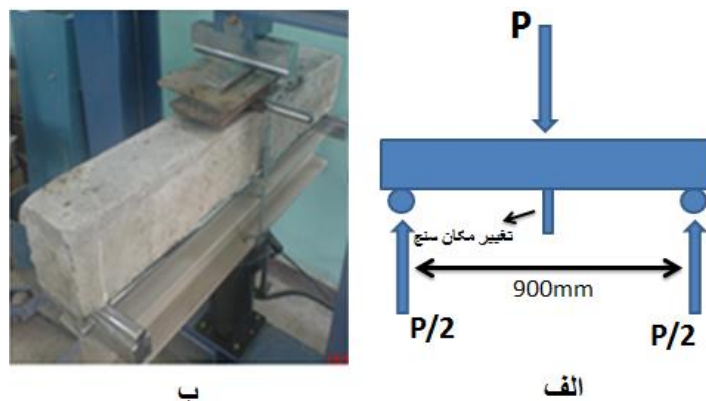
شکل ۶: شماتیک حوضچه‌های نگهداری نمونه‌ها در محلول کلراید

آزمایش تعیین درجه هیدراتاسیون: به منظور بررسی علت کاهش مقاومت فشاری نمونه‌های حاوی نانورس، آزمایش تعیین درجه هیدراتاسیون در سن ۱۴ روز انجام شد. این آزمایش بر روی خمیر سیمان انجام گردید که جهت ساخت خمیر مطابق طرح اختلاطها از نسبت آب به سیمان ۰/۴۳ و درصدهای وزنی ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ نانورس جایگزین سیمان استفاده شد. نمونه‌ها در سن مشخص خرد شده و نمونه‌برداری با ابعاد ۵ تا ۱۰ میلیمتر انجام شد. سپس نمونه‌ها در کوره قرار داده شده و تا دمای ۱۴۵ درجه سانتی‌گراد به نمونه حرارت داده شد تا آب موجود در حفرات موئینه خارج شود. سپس وزن نمونه اندازه‌گیری شده و مجدداً نمونه‌ها تا دمای ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد در کوره به مدت ۱ ساعت قرار گرفتند تا آب ترکیب شیمیایی نمونه خارج شود. در پایان وزن نمونه‌ها مجدداً اندازه‌گیری شده و درجه هیدراتاسیون از رابطه (۳) محاسبه شد [۱۶].

$$\alpha = 100 \times \frac{W_{n(t)}}{M_c \times W_{n(\infty)}} \quad (3)$$

در این رابطه،  $W_{n(t)}$  اختلاف وزن نمونه بعد از قرارگیری در دمای ۱۴۵ و ۹۵۰ درجه سانتی‌گراد می‌باشد،  $M_c$  وزن سیمان مورد استفاده در نمونه و  $W_{n(\infty)}$  نسبت آب به سیمان لازم جهت هیدراتاسیون کامل سیمان می‌باشد که طبق گزارش‌های منتشر شده برابر ۰/۲۵ فرض شده است [۱۶].

اندازه‌گیری عملکرد خمشی تیرها: نحوه‌ی انجام آزمایش خمشی تیرها در شکل ۷ نشان داده شده است. با توجه به این‌که دستگاه آزمایش خمشی قادر به اندازه‌گیری خیز نبود، با تعبیه یک تغییر مکان سنج در وسط تیر، خیز تیر نیز اندازه‌گیری گردید.



شکل ۷: نحوه‌ی آزمایش تیرهای بتن مسلح الف) شماتیک، ب) واقعی



## ۵- نتایج و بحث

## مشاهدات بصری

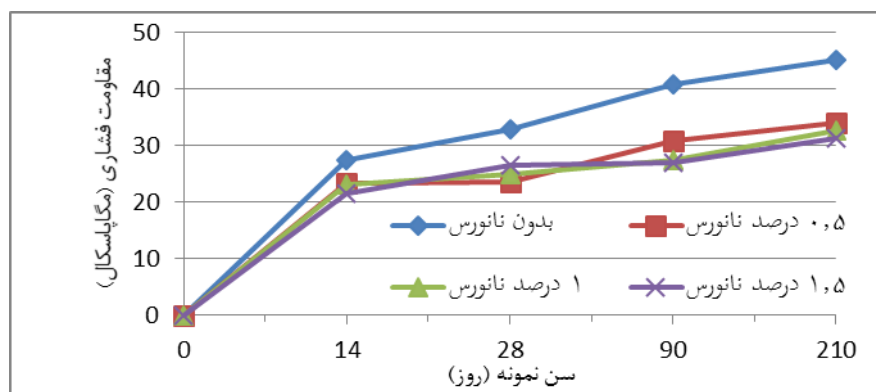
شکست تیرها پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب و ۶ ماه قرارگیری در محیط خورنده، مطابق انتظار، از نوع خمشی بود، اما ترک-های مورب خمشی-برشی نیز مطابق شکل ۸ در تیرها مشاهده شد. در تیرهای قرارگرفته در محیط خورنده نیز قبل از وقوع شکست، ترک افقی مطابق شکل ۸-ب در ناحیه‌ی فشاری تیر مشاهده شد. اما مطابق شکل ۸ تعداد ترک‌های خمشی در تیرهای با عمل آوری ۲۸ روزه نسبت به تعداد ترک‌های ایجاد شده در تیرهای قرارگرفته در محیط خورنده بیشتر بود و به همین دلیل، عرض ترک‌ها نیز کمتر بود. لازم به ذکر است که علیرغم ۶ ماه قرارگیری تیرها در محلول کلراید و سیکل تر و خشک و اعمال بار بهره‌برداری زنگ‌زدگی اندکی در آرماتورها مشاهده گردید که بر این اساس کاهش ظرفیت باربری خمشی زیادی در تیرها انتظار نمی‌رفت. بنابراین می‌توان گفت که قرارگیری تیرهای با عرض ترک ۰/۱۵ میلی‌متر به مدت ۶ ماه در محلول کلراید برای وقوع پدیده زنگ‌زدگی قابل توجه مدت زمان کمی می‌باشد.



شکل ۸: ترک‌های ایجاد شده در تیرها پس از آزمایش خمشی (الف) تیر در سن ۲۸ روز (ب) تیر پس از ۶ ماه قرارگیری در محیط خورنده

## نتایج آزمایش‌های مقاومت فشاری و جذب آب

تغییرات میانگین مقاومت فشاری طرح اختلاط‌ها نسبت به زمان عمل آوری در شکل ۹ ارائه شده است.

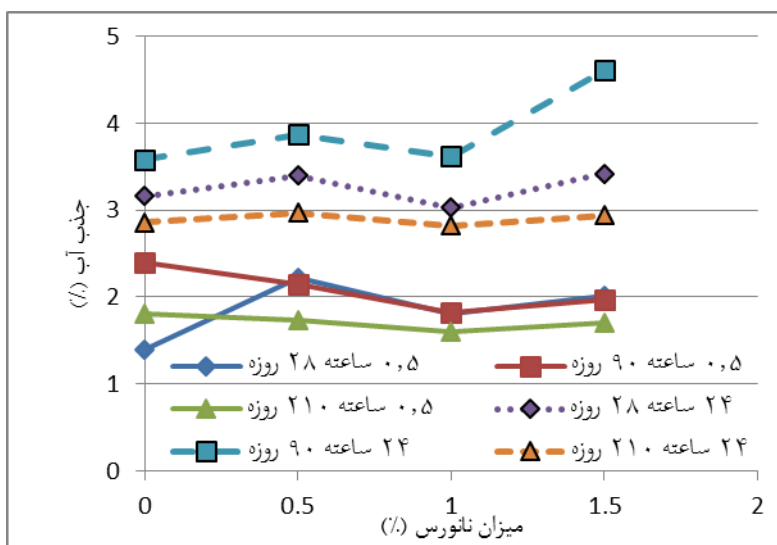


شکل ۹: تاثیر نانورس مصرفی بر مقاومت فشاری طرح اختلاط‌ها

مطابق شکل، مقاومت فشاری طرح اختلاط‌های حاوی نانورس از مقاومت فشاری نمونه فاقد نانورس به میزان قابل توجهی کمتر می‌باشد. جهت شناسایی علت این امر، آزمایش تعیین درجه هیدراتاسیون سیمان بر روی خمیرهای حاوی ۰، ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانورس در سن ۱۴ روز انجام گرفت. نتایج حاکی از این بود که درجه هیدراتاسیون خمیر فاقد نانورس به میزان ۵۳/۴ درصد می‌باشد و این در حالی بود که درجه هیدراتاسیون خمیرهای حاوی نانورس از ۵۵ تا ۵۶/۷ درصد متغیر بود. به عبارت دیگر نانورس باعث افزایش درجه

هیدراتاسیون خمیر شده بود. نیروهای دافعه ناشی از بارهای سطحی نانورس باعث پخش یکنواخت تر دانه‌های سیمان شده و در نتیجه درجه هیدراتاسیون به مقدار جزئی افزایش می‌یابد. بنابراین می‌توان گفت، چسبیدن ذرات نانورس به سطح سنگدانه‌ها باعث تضعیف ناحیه انتقال سنگدانه‌ها شده و در نتیجه مقاومت فشاری کاهش می‌یابد. همچنین در شکل ۹ مشاهده می‌شود که مقاومت کسب شده توسط نمونه‌های حاوی مقادیر مختلف نانورس در سنین مختلف، اختلاف زیادی ندارند.

جذب آب نیم و ۲۴ ساعته نمونه‌ها نیز در شکل ۱۰ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، جذب آب ۲۴ ساعته نمونه فاقد نانورس از جذب آب نمونه‌های حاوی نانورس کمتر می‌باشد. علت این امر جذب آب زیاد ذرات نانورس و چسبیدن این ذرات به سطح سنگدانه‌ها و تضعیف ناحیه انتقال می‌باشد. همچنین جذب آب نیم ساعته نمونه‌های حاوی نانورس کمتر از جذب آب نمونه‌ی شاهد می‌باشد. علت این امر نیز جذب آب توسط ذرات نانورس و متورم شدن آن و در نتیجه مسدود نمودن حفرات بتن می‌باشد ولی با گذشت زمان، به دلیل ضعیف بودن ناحیه انتقال، جذب آب ۲۴ ساعته این نمونه‌ها افزایش می‌یابد. همچنین در تمامی سنین یک لایه‌ی نازک نانورس بر وجوه نمونه‌ها تشکیل می‌شد و با گذشت زمان، پوشش این لایه بر وجوه نمونه‌های مکعبی گسترده‌تر می‌شد. این لایه در سن ۲۸ روز به صورت لکه‌های پراکنده و در سن ۹۰ روز و بعد از آن تقریباً به صورت کامل وجوه نمونه‌های مکعبی را پوشانده بود. این لایه در شکل ۱۱ نشان داده شده است. علت بالا بودن جذب آب ۹۰ روزه نسبت به ۲۸ روزه، انباشته شدن آب در زیر این لایه بود که در سن ۹۰ روزه اطلاعی از وجود این لایه نبود، اما به منظور اندازه‌گیری جذب آب در سن ۲۱۰ روز، این آب به صورت کامل خشک و سپس نمونه‌ها توزین شدند.



شکل ۱۰: نمودار جذب آب طرح اختلاطها

## رفتار خمشی تیرها قبل و پس از قرارگیری در محیط خورنده

تیرها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب و همچنین پس از ۶ ماه قرارگیری در محلول کلراید و سیکل تر و خشک تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند که نتایج این آزمایش‌ها در جدول ۴ ارائه شده است. ضمناً بر اساس نمودارهای بار-تغییر مکان، بهترین خط در ناحیه خطی نمودار و گذرنده از مبدا مختصات برآزش شده و شیب خطوط برآزش شده که بیانگر سختی ناحیه الاستیک می‌باشد استخراج و در جدول ۴ جهت مقایسه با یکدیگر ارائه شده است. لازم به ذکر است که با کاهش سختی خمشی تیرهای بتن مسلح تحت بار بهره‌برداری (EI)، خیز الاستیک نیز افزایش می‌یابد و در نتیجه میزان خزش که رابطه مستقیم با خیز الاستیک دارد نیز افزایش می‌یابد. با افزایش خیز عرض ترک تیر تحت بار بهره‌برداری افزایش یافته و در نتیجه نفوذ عوامل مهاجم بیشتر خواهد شد. همچنین جهت بررسی تاثیر نانورس، محیط خورنده و بارهای بهره‌برداری، مقایسه‌های لازم با تیرهای نظیر نیز صورت گرفته و نتایج در جدول ۴ ارائه شده است. در ادامه، بر

اساس جدول ۴ و منحنی‌های بار- تغییر مکان تیرها، تاثیر نانورس، محلول کلراید و سیکل تر و خشک و بارگذاری، بر رفتار خمشی تیرها بررسی شده است.



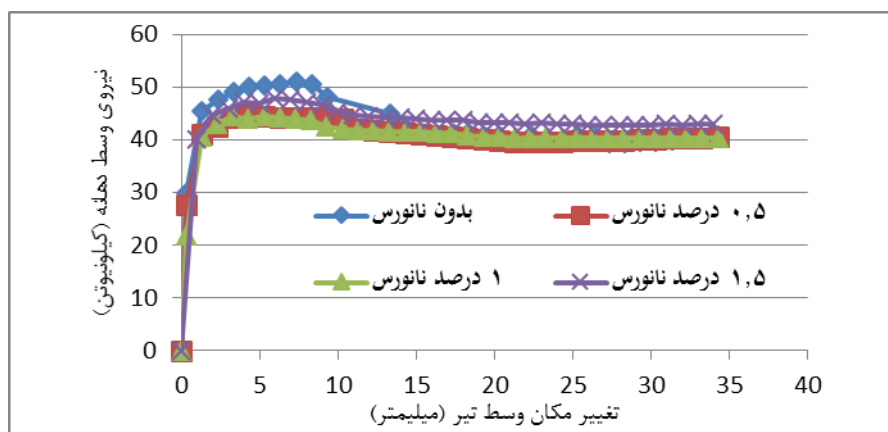
شکل ۱۱: لایه نانورس تشکیل شده بر وجه نمونه مکعبی پس از ۱۸۰ روز عمل‌آوری در نمونه حاوی ۱٪/۵ نانورس

جدول ۴: نتایج آزمایش خمشی تیرها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب و ۶ ماه قرارگیری در محیط خورنده

B12	B11	B10	B9	B8	B7	B6	B5	B4	B3	B2	B1	تیر
۱/۵	۱/۵	۱/۵	۱	۱	۱	۰/۵	۰/۵	۰/۵	۰	۰	۰	نانورس جایگزین سیمان (%)
✓	-	-	✓	-	-	✓	-	-	✓	-	-	اعمال بار بهره‌برداری
✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	✓	✓	-	قرارگیری به مدت ۶ ماه در محلول خورنده و سیکل تر و خشک
۱۶/۲	۱۳/۱	۲۵/۸	۲۱/۳	۱۶/۹	۳۳/۲	۱۲	۱۴/۹	۳۴/۶	۱۴/۵	۱۳/۶	۳۶/۹	شیب ناحیه خطی نمودار (kN/mm)
۵۶/۱	۶۴/۵	۳۰/۰۸	۴۲/۲۷	۵۴/۲	۱۰/۰۳	۶۷/۴۸	۵۹/۶۲	۶/۲۳	۶۰/۷	۶۳/۱۴	-	درصد کاهش شیب نسبت به تیر B1
۳۷/۲	۴۹/۲	-	۳۵/۸	۴۹/۱	-	۶۵/۳	۵۶/۹۳	-	۶۰/۷	۶۳/۱۴	-	درصد کاهش شیب نسبت به تیر ۲۸ روزه نظیر
۴۸/۲	۴۶/۴	۴۶/۷	۴۹/۳۵	۴۶	۴۶/۹	۴۷/۵۵	۴۵/۳۵	۴۷/۴	۴۹/۷۵	۴۴/۹۵	۵۱/۴	حداکثر بار متحمل (kN)
۶/۳۱	۹/۸۱	۹/۲۳	۴/۰۸	۱۰/۵۹	۸/۸۴	۷/۵۸	۱۱/۸۵	۷/۸۷	۳/۳	۱۲/۶۳	-	درصد کاهش حداکثر بار متحمل نسبت به تیر B1
-	۳/۲۲	-	-	۲/۳	-	-	۰/۸۸	-	-	-	۱۴/۴	درصد افزایش بار حداکثر نسبت به تیر B2
-۳/۲	+۰/۶۴	-	-۵/۲۲	+۱/۹۱	-	-۰/۳۱	+۴/۳۲	-	+۳/۳	+۱۲/۶	-	درصد کاهش و یا افزایش حداکثر بار متحمل نسبت به تیر ۲۸ روزه نظیر*
۳/۸۸	-	-	۷/۳	-	-	۱/۴	-	-	۴/۹۶	-	-	درصد افزایش حداکثر بار نسبت به تیر بدون بار نظیر

\* در این سطر، علامت منفی (-) به معنای کاهش و علامت مثبت (+) به معنای افزایش است.

**تاثیر نانورس بر عملکرد خمشی تیرها:** نمودار بار- تغییر مکان تیرهای حاوی درصد‌های مختلف نانورس پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب در شکل ۱۲ نشان داده شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، بتن بدون نانورس به علت مقاومت فشاری ۲۸ روزه بیشتر، مقاومت خمشی بیشتری از خود نشان داده است. قسمت اول نمودارها که به صورت خطی می‌باشد، بیانگر رفتار الاستیک بتن و فولاد می‌باشد. اما نقطه آغاز خمیدگی بیانگر رفتار غیر الاستیک بتن در ناحیه‌ی فشاری می‌باشد. قسمت تقریباً مستقیم بعد از تحمل حداکثر بار نیز بیانگر این است که فولادهای کششی جاری شده و شکل‌پذیری مقطع امکان تحمل تغییر شکل‌های زیاد را فراهم می‌آورد. در جدول ۴ مشاهده می‌شود که بیشترین کاهش ظرفیت خمشی در تیر حاوی ۱/۵ درصد نانورس به میزان ۹/۲٪ می‌باشد. چنانچه در جدول ۴ مشاهده می‌شود، استفاده از نانورس باعث می‌شود که سختی الاستیک در تیرهای حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانورس به ترتیب ۶/۲۳، ۱۰/۰۳ و ۳۰/۰۸ درصد کاهش یابد. علت کاهش سختی الاستیک تیرها، ایجاد مناطق ضعیف در ناحیه انتقال بتن می‌باشد.

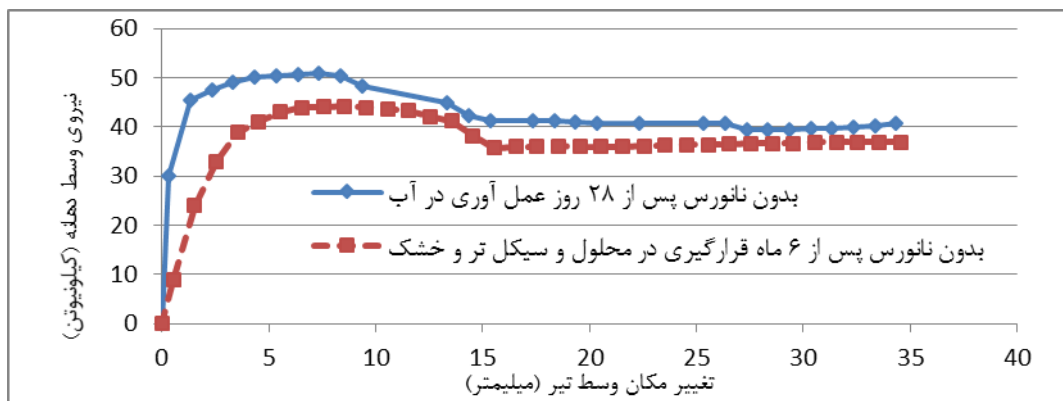


شکل ۱۲: تاثیر نانورس بر عملکرد خمشی تیرها پس از ۲۸ روز عمل آوری در آب

**تاثیر نانورس بر عملکرد خمشی تیرها در محیط خورنده:** چنانچه در جدول ۴ مشاهده می‌شود، حداکثر بار متحمل تیرهای حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانورس قرار گرفته در محلول کلراید و سیکل تر و خشک، به ترتیب به میزان ۰/۸۸، ۲/۳ و ۳/۲۲ درصد نسبت به تیر بدون نانورس افزایش داشته است. نفوذ محلول آب و نمک به بتن با متبلور شدن ذرات نمک به هنگام خشک شدن نمونه‌ها باعث ایجاد ریزترک شده و در نتیجه مقاومت بتن کاهش می‌یابد [۱۷]. اما نفوذ یون کلراید در تیرهای حاوی نانورس با توجه به متورم شدن و وجود بار الکتریکی منفی سطحی ذرات نانورس محدود شده و در نتیجه، کاهش مقاومت فشاری کمتری در این بتن‌ها رخ می‌دهد. همچنین در جدول ۴ مشاهده می‌شود که حداکثر بار متحمل تیرهای حاوی ۰/۵، ۱ و ۱/۵ درصد نانورس قرار گرفته در محلول و سیکل تر و خشک به ترتیب به میزان ۱۱/۸۵، ۱۰/۶ و ۹/۸ درصد نسبت به نمونه شاهد ۲۸ روزه (نمونه B1) کاهش داشته‌اند، اما تیر فاقد نانورس علیرغم دارا بودن مقاومت فشاری حداکثر به میزان ۱۲/۶۳٪ نسبت به نمونه شاهد ۲۸ روزه (نمونه B1) کاهش بار از خود نشان داده است. همچنین محلول کلراید و چرخه تر و خشک باعث کاهش قابل توجه سختی الاستیک تیرها می‌گردد. اما در این حالت، عملکرد تیرهای حاوی ۱٪ نانورس بهتر از تیر فاقد نانورس در شرایط مشابه می‌باشد، به نحوی که کاهش ۶۳/۱ درصدی در تیر فاقد نانورس (نسبت به نمونه B1)، به ۵۴/۲ درصد در تیر با ۱٪ نانورس رسیده است و این در صورتی است که سختی الاستیک تیر حاوی یک درصد نانورس قبل از قرارگیری در محلول، ۱۰٪ کمتر از تیر فاقد نانورس بوده است. همچنین مشاهده می‌شود که تیرهای حاوی نانورس قرار گرفته در محلول کلراید و تحت بار بهره‌برداری و سیکل تر و خشک، حداکثر بار متحمل کمتری نسبت به تیر بدون نانورس نگهداری شده در شرایط مشابه دارند. دلیل این امر این است که اعمال بارگذاری در تیر فاقد نانورس نیز باعث محدود شدن نفوذ یون کلراید در ناحیه فشاری تیرها می‌گردد و در نتیجه اثر مثبت ذرات نانورس کاهش می‌یابد. از نظر سختی الاستیک تیرها نیز چنانچه در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تیرهای حاوی ۱ و ۱/۵ درصد نانورس، پس از قرارگیری در محلول کلراید، سیکل تر و خشک و با بارگذاری، عملکرد بهتری نسبت به تیر بدون نانورس نگهداری شده در

شرایط مشابه از خود نشان می‌دهند، به نحوی که کاهش ۶۰/۷ درصدی سختی الاستیک (نسبت به تیر ۲۸ روزه نظیر) به ۳۵/۸ تا ۳۷/۲ درصد افت می‌نماید. دلیل این امر نیز محدود شدن نفوذ کلراید به بتن توسط نانورس می‌باشد. بنابراین مطابق آنچه ذکر گردید، استفاده از نانورس در محیط خورنده باعث افت کمتر سختی الاستیک تیر بتن مسلح و در نتیجه کاهش خزش و کاهش عرض ترک و نفوذ کمتر عوامل مهاجم خواهد شد.

**تاثیر محلول کلراید و سیکل‌های تر و خشک بر عملکرد خمشی تیرها:** در شکل‌های ۱۳ و ۱۴ به ترتیب نمودار بار-تغییر مکان تیرهای فاقد نانورس و تیرهای حاوی ۰/۵ درصد نانورس قرار گرفته در محلول کلراید و سیکل تر و خشک به مدت ۶ ماه، در کنار نمودار بار-تغییر مکان تیر نظیر ۲۸ روزه نشان داده شده است. به علت رفتار مشابه سایر تیرها از ارائه نمودار آن‌ها خودداری شده است. چنانچه مشاهده می‌شود، قرارگیری کلیه تیرها در محلول کلراید و سیکل تر و خشک، باعث کاهش ظرفیت خمشی و کاهش قابل توجه سختی الاستیک تیرها می‌گردد. در جدول ۴ مشاهده می‌شود، تیرهای بدون بار بهره‌برداری و قرار گرفته در محلول کلراید و سیکل تر و خشک به میزان ۹/۸ تا ۱۲/۶ درصد نسبت به تیر شاهد ۲۸ روزه کاهش بار متحمل شده‌اند. علت این امر، کاهش مقاومت فشاری بتن به علت چرخه‌ی تر و خشک شدن تیرها در محلول کلراید می‌باشد. همچنین تیرهای با بار بهره‌برداری و قرار گرفته در محلول کلراید و سیکل تر و خشک به میزان ۳/۳ تا ۷/۶ درصد نسبت به تیر شاهد ۲۸ روزه کاهش بار متحمل داشته‌اند. علت این امر چنانچه ذکر شد محدود شدن نفوذ یون کلراید در ناحیه فشاری به علت اعمال بارهای بهره‌برداری می‌باشد. همچنین در جدول ۴ مشاهده می‌شود که کلیه تیرهای قرار گرفته در محلول کلراید و سیکل تر و خشک، نسبت به تیر شاهد ۲۸ روزه به میزان ۴۲/۳ تا ۶۷/۵ درصد و نسبت به تیر ۲۸ روزه نظیر خود به میزان ۴۹/۱ تا ۶۵/۳ درصد کاهش سختی الاستیک داشته‌اند. دلیل این امر نیز چنانچه ذکر شد، کاهش مقاومت بتن به علت قرارگیری در محلول کلراید و سیکل تر و خشک می‌باشد.

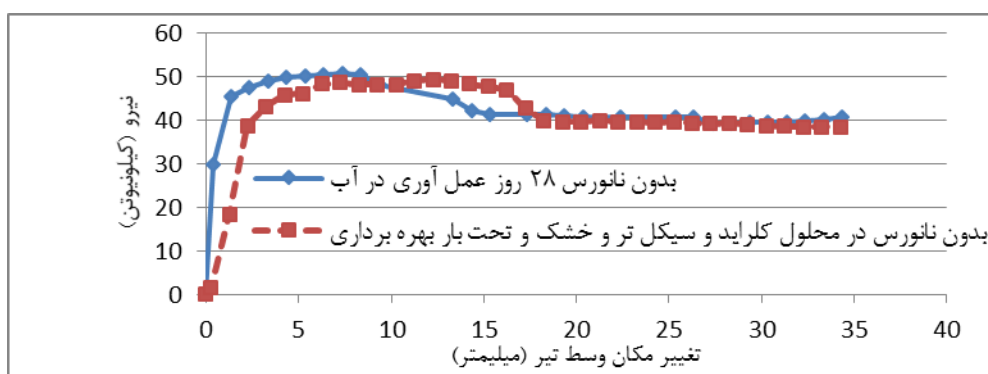


شکل ۱۳: تاثیر سیکل‌های تر و خشک و محلول کلراید بر عملکرد خمشی تیرها

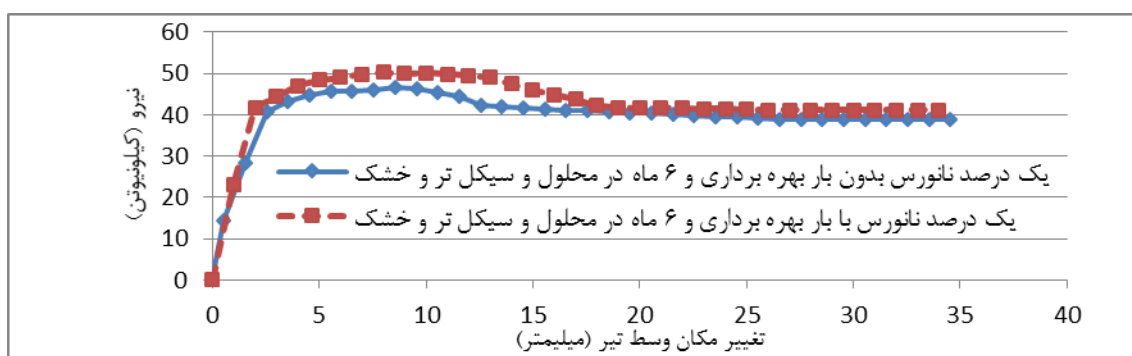


شکل ۱۴: تاثیر سیکل‌های تر و خشک و محلول کلراید بر عملکرد خمشی تیرها

تأثیر بار بهره‌برداری بر عملکرد خمشی تیرها در محلول کلراید و سیکل تر و خشک: تیرهای حاوی درصد‌های مختلف نانورس که با اعمال بار بهره‌برداری ۸۰۰ کیلوگرم به مدت ۶ ماه در محلول کلراید و تحت چرخه‌ی تر و خشک قرار داشتند، تحت آزمایش خمشی سه نقطه‌ای قرار گرفتند. در شکل‌های ۱۵ و ۱۶ به ترتیب نمودار تیرهای فاقد نانورس و تیرهای حاوی یک درصد نانورس با تیرهای نظیر قرارگرفته در محلول کلراید و سیکل تر و خشک مقایسه شده است. با توجه به نمودارهای شکل‌های ۱۵ و ۱۶ و نتایج ارائه شده در جدول ۴، مشخص است که تیرهای قرارگرفته در محلول کلراید و تحت بار بهره‌برداری و سیکل تر و خشک، نسبت به نمونه شاهد ۲۸ روزه دچار کاهش در بار متحمل به میزان  $\frac{3}{3}$  تا  $\frac{7}{6}$  درصد شده‌اند. همچنین مشاهده می‌شود که سختی الاستیک کلیه تیرهای قرارگرفته در محلول کلراید و تحت بار بهره‌برداری و سیکل تر و خشک، نسبت به نمونه شاهد ۲۸ روزه به میزان  $\frac{42}{3}$  تا  $\frac{67}{5}$  درصد کاهش یافته است. علت کاهش در میزان بار متحمل و سختی الاستیک تیرها نسبت به نمونه شاهد ۲۸ روزه، کاهش مقاومت بتن به علت وجود سیکل تر و خشک می‌باشد. در جدول ۴ مشاهده می‌شود که تیرهای قرارگرفته در محلول کلراید و تحت بار بهره‌برداری و سیکل تر و خشک، نسبت به تیرهای قرارگرفته در محلول کلراید و سیکل تر و خشک و بدون بار بهره‌برداری، به میزان  $\frac{1}{4}$  تا  $\frac{7}{3}$  درصد افزایش بار متحمل داشته‌اند و همچنین کاهش سختی الاستیک کمتری نسبت به نمونه شاهد ۲۸ روزه از خود نشان داده‌اند. علت این امر، کاهش نفوذ محلول در بتن به علت وجود تنش فشاری ناشی از بار بهره‌برداری و بسته شدن ریز ترک‌ها می‌باشد.



شکل ۱۵: تأثیر همزمان سیکل‌های تر و خشک، محلول کلراید و بار بهره‌برداری بر عملکرد خمشی تیرها



شکل ۱۶: تأثیر همزمان سیکل‌های تر و خشک، محلول کلراید و بار بهره‌برداری بر عملکرد خمشی تیرها

## ۶- نتیجه‌گیری تحقیق

در این تحقیق با استفاده از نانورس، نمونه‌های مکعبی و تیرهای بتن مسلح ساخته و نمونه‌های مکعبی در سنین مختلف تحت آزمایش مقاومت فشاری و جذب آب قرار گرفته و تیرها نیز پس از ۲۸ روز عمل‌آوری در آب، به سه گروه تقسیم شدند. در گروه اول تیرها پس از ۲۸ روز عمل‌آوری، تحت آزمایش خمشی قرار گرفته و در گروه دوم و سوم تیرها پس از ۶ ماه قرارگیری در محلول کلراید و سیکل

تر و خشک تحت آزمایش خمشی قرار گرفتند با این تفاوت که در تیرهای گروه سوم بار بهره‌برداری نیز اعمال شده بود. نتایج حاکی از این بود که استفاده از نانورس حتی به میزان اندک علی‌رغم کاهش قابل توجه مقاومت فشاری و افزایش قابل توجه درصد جذب آب میزان نفوذ یونهای کلراید را به علت ایجاد نیروهای دافعه کاهش داده و عملکرد بهتری را در برابر تهاجم یون کلراید از خود نشان می‌دهد. بر این اساس میتوان گفت که مقاومت فشاری و درصد جذب آب معیار مناسبی برای تعیین مقاومت بتن در برابر تهاجم یون کلراید نمی‌باشد. علاوه بر این امر سایر نتایج با جزئیات بیشتر در ادامه بیان شده‌اند:

- ۱ - افزودن نانورس مونت موریلونیت تا ۱/۵ درصد وزنی سیمان به بتن، باعث کاهش مقاومت فشاری می‌شود. حداکثر کاهش مقاومت فشاری به میزان ۳۲/۹ درصد در نمونه‌ی حاوی ۱/۵ درصد نانورس در سن ۹۰ روز مشاهده شد.
- ۲ - افزودن نانورس به بتن باعث کاهش جذب آب نیم ساعته و افزایش جذب آب ۲۴ ساعته می‌شود.
- ۳ - افزودن نانورس باعث کاهش ظرفیت باربری خمشی تیرها می‌گردد. بیشترین کاهش ظرفیت خمشی در تیر حاوی ۱/۵ درصد نانورس به میزان ۹/۲۳٪ مشاهده شد. این میزان در مقایسه با افت مقاومت فشاری ۲۳/۶۷٪ بهبود یافته است.
- ۴ - عملکرد خمشی تیرهای حاوی نانورس در محلول کلراید و سیکل تر و خشک بهتر از تیر بدون نانورس می‌باشد.
- ۵ - سختی الاستیک تیرها به علت قرارگیری در محلول کلراید و سیکل تر و خشک کاهش می‌یابد، اما کاهش سختی در تیرهای حاوی ۱ و ۱/۵ درصد نانورس بسیار کمتر از تیر فاقد نانورس می‌باشد.
- ۶ - اعمال بار بهره‌برداری بر روی تیرها، باعث بهبود عملکرد خمشی در محلول کلراید و سیکل تر و خشک می‌گردد. در این صورت نیز استفاده از نانورس به میزان ۱ تا ۱/۵ درصد، باعث بهبود بیشتر رفتار خمشی می‌گردد.
- ۷ - مشاهدات بصری نشان داد که زمان ۶ ماه جهت بررسی عملکرد خمشی تیرهای بتن مسلح در محلول کلراید ۵٪ و سیکل تر و خشک حتی با اعمال بارهای بهره‌برداری با ایجاد ترکی به عرض ۰/۱۵ میلیمتر مدت کمی می‌باشد.
- ۸ - استفاده از نانورس کاهش سختی الاستیک تیر بتن مسلح را در محیط کلرایدی کاهش داده و در نتیجه می‌تواند میزان خزش و عرض ترک ناشی از بارهای بهره‌برداری را کاهش دهد.

## مراجع

- [1] Shekarchizadeh, M., Doosti, A. and Mardani, F. (2008), Effect of chloride binding on the reduction of bars corrosion in the reinforced concrete structures, *4<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering*, University of Tehran, Tehran (In Persian).
- [2] Shekarchizadeh, M., Chini, M. and Moradian, M. (2012), Assessment of rebars corrosion in the high performance concrete under Persian Gulf region, case study, *4<sup>th</sup> National Congress of Concrete*, Iranian Concrete Institute, Tehran (In Persian).
- [3] Shekarchizadeh, M., Valipour, M. and Pargar, F. (2010), Effect of Silica Fume, Metakaolin, Zeolite and Polypropylene Fiber on Chloride Diffusion in Concrete, *Journal of Civil Engineering (Ferdowsi University of Mashhad)*, Vol. 22 (1), 83-96 (In Persian).
- [4] Ramezani pour, A. A. and Pourkhorshidi, A. R. (2006), Assessment of durability of marine concrete structures with different cements and pozzolans in Persian Gulf Environment, *7<sup>th</sup> International Conference on Coasts, ports and Marine Structures*, Port and Maritime Organization, Tehran.
- [5] Ganjian, E. and Sadeghipouya, H. (2009), The effect of Persian Gulf tidal zone exposure on durability of mixes containing silica fume and blast furnace slag, *Construction and Building Materials*, Vol. 23 (2), 644-652.
- [6] Gruber, K. A., Ramlochan, T., Boddy, A., Hooton, R. D. and Thomas, M. D. A. (2001), Increasing concrete durability with high-reactivity metakaolin, *Cement and Concrete Research*, Vol. 23 (6), 479-484.
- [7] Faraji, H. K. and Afshin, H. (2005), Durability of reinforced Concrete containing different pozzolanas in Urmia lake region, *2<sup>nd</sup> National Congress on Civil Engineering*, Iran University of Science and Technology, Tehran, Iran (In Persian).
- [8] Bai, J. and Wild, S. (2002), Investigation of the temperature change and heat evolution of mortar incorporating PFA and metakaolin, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 24 (2), 201-209.
- [9] Chehkandi, S., Miri, M. and Givechi, M. (2011), Durability of self-compacting concrete containing nano-silica under sea water and tidal conditions, *6<sup>th</sup> National Congress on Civil Engineering*, Semnan University, Semnan (In Persian).
- [10] Tasnimi, A. and Khorami, M. (2005), Effect of reinforcement corrosion on the flexural strength of reinforced concrete structures under cyclic vertical loads, *2<sup>nd</sup> International Conference on Concrete and Development*, Road, Housing and Urban development Research Center, Tehran.

- [11] Pourbehi, P. and Behfarnia, K. (2006), Long term effect of reinforcement's corrosion on the load bearing capacity of concrete elements under seawater region, *7<sup>th</sup> International Congress on Civil Engineering*, Tarbiat Modares University, Tehran.
- [12] Vidal, T., Castel, A. and François, R. (2007), Corrosion process and structural performance of a 17 year old reinforced concrete beam stored in chloride environment, *Cement and Concrete Research*, Vol. 37 (11), 1551-1561.
- [13] Building National Regulations Office, (2012), 9<sup>th</sup> part of building national regulations, *Design and construction of reinforced concrete structures*, Tehran, Toseae Nasre Iran.
- [14] Neville, A. M. and Brooks, J. J. (2010), *Concrete Technology*, Prentice Hall, New Jersey, 409-414.
- [15] Al-Tayyib, A. J. and Shamim K. M. (1991) Effect of sulfate ions on the corrosion of rebars embedded in concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 13 (2), 123-127.
- [16] Dillshad, K. H. A. (2011), Degree of Hydration and Strength Development of Low Water-to-Cement Ratios in Silica Fume Cement System, *International Journal of Civil & Environmental Engineering IJCEE-IJENS*, Vol. 11(5), 10-15.
- [17] Mahmoodi, A., Afshin, H., Hakimzadeh, H. and Jalali D. (2009) Investigation of the reinforced concrete durability in severe corrosive marine environment according to its position with respect to sea level, *Journal of Marine Engineering*, Vol. 5 (10), 77-87.