

# رفتار مکانیکی پوشش سیمانی داخل لوله‌های فولادی

محمد تقی کاظمی  
استاد یار

دانشکده مهندسی عمران، دانشگاه صنعتی شریف

## چکیده

ملات مساسه سیمان ماده‌ای تقریباً ترد و با شکل پذیری اندک می‌باشد و در آزمایش‌های فشار و یا کشش ساده دیده می‌شود پس از بار حداکثر، با افزایش تغییر شکل، تنش با شیب زیادی کاهش می‌یابد. در برخی حالات که توزیع بار به صورت گسترده و از طریق پیوستگی و اصطکاک به ملات منتقل می‌گردد، این ماده شکل پذیری بهتری از خود نشان می‌دهد. این شکل پذیری بهتر به علت پخش ترک‌ها و ریزتر شدن آنها است. پوشش محافظ داخل لوله‌های آب تحت فشار در چنین شرایطی قرار دارد. تحلیل ساده اینگونه لوله‌ها نشان می‌دهد که کرنش ایجاد شده در پوشش، کاملاً بیشتر از کرنش نظیر مقاومت حداکثر ملات می‌باشد و براساس نمونه‌های ساده، انتظار ترک خوردگی در آن می‌رود. براساس نتایج مطالعات و تجربیات مربوط به رفتار مکانیکی بتن و ملات مسلح، نمونه ساده‌ای به دست می‌آید که نشان می‌دهد رفتار پس از بار حداکثر پوشش، بستگی به ضخامت آن داشته و با افزایش ضخامت لایه پوشش، شکل پذیری کاهش می‌یابد. روش‌های مناسبی جهت اندازه‌گیری پارامترهای این نمونه پیشنهاد می‌گردد.

## *Mechanical Behaviour of Cement-Mortar Lining for Steel Pipe*

Mohammad Taghi Kazemi

Assistant Professor of Civil Engineering  
Sharif University of Technology

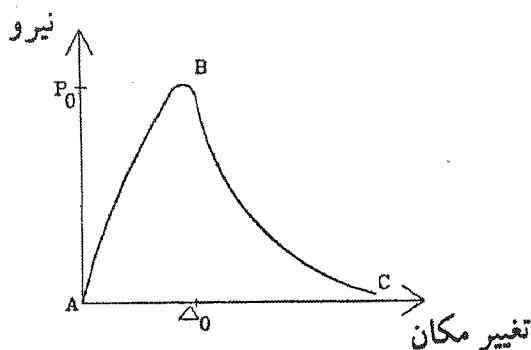
### Abstract

*Cement mortar is a quasi-brittle material with low ductility. In the simple tension or compression test, a gradual reduction in strength is observed in softening region. In some cases, where load is applied in a distributed manner by means of bond or friction, better ductility is appeared. This is due to the distribution of cracks and their refinement. The lining of water pipe under internal pressure is situated in this condition. A simple analysis, shows that the developed strain in the lining is well more than the strain of the peak load, then, from the simple models, cracking is expected. Based on studies related to mechanical behaviour of reinforced concrete and mortar, a simple model is obtained, which shows post peak behaviour of lining depends on the its thickness and by increasing of the thickness, ductility decreases. Some proper tests are proposed to measure parameters of the model.*

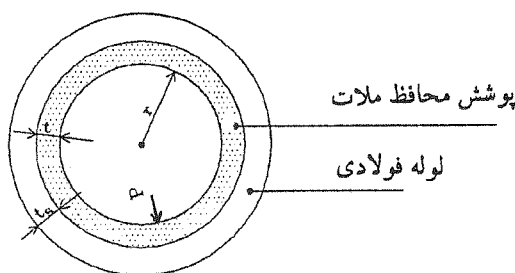
## ۱- مقدمه

بتن و ملات سیمان جزء مواد نیمه ترد بوده و مقاومت کششی آنها به مراتب کمتر از مقاومت فشاری آنها می باشد. در اینگونه مواد، در آزمایش های تک محوری فشاری و یا کششی، پس از رسیدن بار وارده به مقاومت حداکثر، با افزایش تغییر شکل، نیروی مقاومت کاهش می یابد (شکل ۱). همچنین ناحیه فلات پلاستیک (قسمت افقی در شکل ۱) کوچک بوده و شکل منحنی نیرو - تغییر طول، وابستگی شدیدی به اندازه طول نمونه دارد. با افزایش طول نمونه، شیب ناحیه AB کمتر شده B به سمت راست جابجا می شود. از طرفی، محل C تغییر ناچیزی می یابد. بدین ترتیب پیش بینی می شود که با افزایش بیشتر طول نمونه، نقطه نظیر بار حداکثر B در سمت راست نقطه C، که معرف دو تکه شدن نمونه است، قرار گیرد. برای نمونه های طویل انجام آزمایش بسیار دشوارتر خواهد بود و با کنترل تغییر طول نیز تمام مسیر منحنی قابل حصول نخواهد بود. طول بحرانی نمونه طولی است که برای آن، نقطه C در امتداد و پایین نقطه B قرار گیرد و شیب منحنی، پس از بار حداکثر بینهایت باشد. برای نمونه های کوتاه تر از طول بحرانی، اگر چه با روش آزمایش کنترل بار، ناحیه پس از بار حداکثر قابل حصول نمی باشد، ولی تحت آزمایش کنترل تغییر طول، تمام منحنی را می توان به دست آورد.

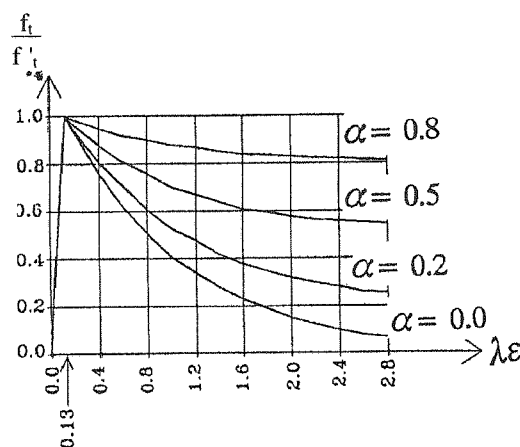
نتایج آزمایش های کشش و یا فشار ساده به تنهایی نمی توانند اطلاعات کافی در مورد برخی حالات بارگذاری ساده را مهیا نمایند. حالاتی وجود دارند که در آنها نیرو به صورت یکنواخت از سازه نمی گذرد، بلکه به صورت گسترده از محیط اعمال می گردد. از آن جمله پوشش ملات ماسه سیمان داخل لوله های تحت فشار آب را می توان نام برد. در اغلب موارد، داخل لوله ها با لایه های محافظ از ملات پوشانیده می شود تا لوله را در مقابل عوامل مخرب محیط مانند خوردگی محافظت نماید. فشار داخل لوله، در جداره آن و از جمله لایه ملات ایجاد کشش زیادی می نماید. وجود لوله فولادی باعث پخش شدن، افزوده شدن تعداد و کوچک تر شدن بازشدگی ترک های پدید آمده در ملات می گردد. در این مطالعه، رفتار مکانیکی این پوشش با جزئیات بیشتری بررسی می شود.



شکل (۱) رابطه نیرو - تغییر مکان برای نمونه بتن و ملات در کشش



شکل (۲) لوله فولادی و پوشش محافظ از ملات داخل آن، تحت فشار درونی P



شکل (۳) رابطه تنش متوسط کششی و کرنش متوسط برای پوشش ملات

## ۲- لایه ملات ماسه سیمان محافظ لوله ها

در لوله های فولادی، جهت جلوگیری از خوردگی، لازم است که داخل و خارج آن توسط لایه ای محافظ پوشانیده شود. یکی از موادی که کاربرد وسیعی برای

متوسط در ملات پوشش نیز در همان حدود کرنش در فولاد خواهد بود. در حقیقت سختی کششی ملات در مقایسه با فولاد خیلی کمتر بوده و در محاسبه کرنش می توان از آن صرفنظر نمود. توزیع تقریباً یکنواخت کرنش به دلیل پایدار شدن و گسترش ترک های خیلی ریز و پخش شده در تمام سطح استوانه ای پوشش ملات می باشد. مشخصات این ترک ها وابستگی قابل توجهی به اندازه ضخامت لایه خواهد داشت. اثرات اندازه بر رفتار مکانیکی مواد نیمه ترد در مراجع مختلفی از جنبه های گوناگون مورد بررسی قرار گرفته است [۴-۷].

در مرجع [۷]، براساس آزمایش های انجام یافته در کشش ساده، برای نمونه ای به طول ۳۰۰ میلیمتر، مقدار تغییر طول نظیر بار حداکثر ( $\Delta_0$  در شکل ۱) در حدود  $0.4 \text{ mm}$  به دست آمده است. در نتیجه کرنش متوسط نظیر نقطه بار حداکثر برابر

$$\epsilon_0 = \frac{0.04}{300} = 0.13 \times 10^{-3} \quad (1)$$

به دست می آید. در مرجع [۷]، همچنین برای محاسبه تنش حداکثر رابطه زیر پیشنهاد شده است.

$$f'_t = 0.45 f'_c{}^{1/2} \text{ (MPa)} \quad (2)$$

که در آنجا  $f'_c$  = مقاومت فشاری ملات و  $f'_t$  مقاومت در کشش می باشند. برای ملات خوب با مقاومت  $f'_c = 30 \text{ MPa}$  مقدار  $f'_t = 2.5 \text{ MPa}$  حاصل می شود. مقایسه مقادیر کرنش متوسط در ملات، در شرایط بارگذاری حداکثر عادی و گذرا (کرنش های  $0.57 \times 10^{-3}$  و  $0.86 \times 10^{-3}$ ) با مقدار  $\epsilon_0$  (رابطه ۱)، نشان می دهد که، چه در حالت عادی و چه در حالت بارگذاری گذرا، کرنش به وجود آمده در ملات پوشش، کاملاً بیشتر از کرنش نقطه تنش حداکثر می باشد.

بدین ترتیب اگر ناحیه پس از نقطه حداکثر (قسمت کاهنده) رابطه  $\sigma - \epsilon$  به نحو درستی در محاسبات منظور نشود، نمی توان کارایی ملات در محافظت لوله از خوردگی را بیان نمود. علاوه بر کرنش های حاصل از فشار در داخل لوله، به علت انقباض نیز کرنش های قابل توجهی در لایه پوشش پدید می آید [۸]، که باید در تحلیل در نظر گرفته شود، ولی در این بحث از این اثرات صرفنظر می گردد.

این منظور دارد، ملات ماسه سیمان می باشد. این لایه های محافظ ممکن است در کارخانه اجرا شوند [۱] و یا اینکه در محل اجرای خط لوله انجام یابند [۲]. در مورد پوشش خارجی، معمولاً آندود ماسه سیمان توسط سیم های فولادی تقویت می گردد. در مرجع [۱]، در مورد پوشش داخلی گفته شده است که نسبت سیمان به ماسه حداقل یک سوم باشد. ضخامت لایه پوشش باید یکنواخت بوده و اندازه آن بستگی به قطر لوله دارد. در مورد روش پوشش در کارخانه، ضخامت پیشنهادی برای قطرهای ۱۰۰ تا ۲۵۰ میلیمتر برابر ۶ میلیمتر، برای قطرهای ۲۸۰ تا ۵۸۰ میلیمتر برابر ۸ میلیمتر، برای قطرهای ۶۰۰ تا ۹۰۰ میلیمتر برابر ۱۰ میلیمتر، و برای قطرهای بیش از ۹۰۰ میلیمتر برابر ۱۳ میلیمتر است. مقاومت فشاری ۲۸ روزه ملات اجرا شده باید حداقل 30MPa باشد. ماسه باید دانه بندی خوبی داشته و از الک نمره ۱۶ گذشته باشد و بیشتر از ۵ درصد آن از الک نمره ۱۰۰ رد نشود.

در حالتی که از روش پوشش در محل استفاده شود، ضخامت پوشش داخلی برای لوله های فولادی به صورت جدول (۱) پیشنهاد شده است. در شکل ۲، مقطع نمونه لوله و پوشش داخلی ملات دیده می شود.

جدول (۱) ضخامت پوشش ملات داخل لوله ها براساس مرجع [۲]

قطر اسمی لوله (mm)	100-300	350-900	1050-1500	1700-2300	>2300
ضخامت پوشش (mm)	4.8	6.4	9.5	11.1	12.7

در راهنمای طرح و اجرای لوله های فولادی [۳]، برای بارگذاری عادی، حد فشار مجاز لوله طوری تعیین شده که تنش حلقوی در فولاد از پنجاه درصد تنش سیلان آن بیشتر نشود. در شرایط بارهای زودگذر تنش حلقوی اجازه دارد تا هفتاد و پنج درصد تنش سیلان فولاد بالا رود.

با توجه به اینکه مدول الاستیسیته فولاد در حدود  $E_s = 2/100/000 \text{ Kg/cm}^2$  و تنش سیلان آن در حدود  $\sigma_y = 2400 \text{ Kg/cm}^2$  می باشد، در حالتی که تنش به پنجاه و هفتاد و پنج درصد تنش سیلان فولاد برسد، کرنش حلقوی در فولاد به ترتیب برابر  $0.57 \times 10^{-3}$  و  $0.86 \times 10^{-3}$  خواهد گردید. با در نظر گرفتن چسبندگی کافی بین ملات و فولاد و رعایت شرط سازگاری، کرنش

$$\frac{f_t}{f_t} = (1 - \alpha) e^{-\lambda(\varepsilon - \varepsilon_0)} + \alpha \quad (3)$$

در رابطه (۳)،  $f_t =$  تنش کششی،  $f_t =$  مقاومت کششی (رابطه ۲)،  $\varepsilon =$  کرنش متوسط،  $\varepsilon_0 =$  کرنش متوسط نظیر  $f_t$  (رابطه ۱) و  $\lambda$  و  $\alpha$  پارامترهایی می باشند که بستگی به مشخصات تسلیح دارند و از آزمایش به دست می آیند. در مورد بتن مسلح به میلگرد، رابطه ای در مرجع [۱۱] پیشنهاد شده است که نیروی متوسط در بتن را متناسب با تنش باند ایجاد شده دانسته و رابطه ای ارائه می دهد که در اینجا با تبدیل هایی به صورت زیر بیان می شود:

$$\alpha = \frac{C b}{A_c} \quad (4)$$

در رابطه (۴)،  $C =$  ضریبی است که براساس آزمایش به دست می آید و واحد طول دارد،  $b =$  عرض محدوده پیوستگی بتن و فولاد در امتداد عمود بر جهت کشش بوده  $AC =$  سطح مقطع مؤثر بتن می باشند. برای لوله فولادی با پوشش داخلی مطابق شکل (۲)، مقدار  $b$  برابر طولی انتخابی از لوله بوده و برای سطح مؤثر بتن از رابطه:

$$A_c = b t \quad (5)$$

می توان استفاده کرد که  $t =$  ضخامت لایه ملات می باشد. بدین ترتیب:

$$\alpha = \frac{C}{t} \quad \text{و} \quad \alpha < 1 \quad (6)$$

خواهد بود. ضریب طولی  $C$  در حدود فاصله ترکهای ریز ایجاد شده در ملات و یا بتن خواهد بود. در مرجع [5] فاصله ترکها در حدود  $2/7$  برابر اندازه دانه های درشت ملات به دست آمده است. ماسه مورد استفاده برای پوشش لوله ها باید از الک نمره ۱۶ بگذرد و دانه درشت ماسه در حدود  $1/5$  میلیمتر خواهد بود. براساس این مقادیر، ضریب  $C$  در حدود چهار میلیمتر برآورد می شود.

باتوجه به رابطه (۶)، که در آن ضریب  $\alpha$  با عکس ضخامت لایه ( $t$ ) متناسب می باشد، نتیجه می شود که با افزایش ضخامت لایه، رفتار آن تردتر خواهد بود. ضریب  $\lambda$  در رابطه (۳) براساس تجربیات به عمل آمده در حدود

از رفتار نمونه های ملات، که توسط میلگردهایی متوازی تسلیح و تحت کشش قرار گرفته، به کمک مفاهیم مکانیک شکست، دیده شده است [۹] که، به جهت وجود آج و چسبندگی، تعداد ترک های ایجاد شده بیشتر از نمونه نظیر غیر مسلح بوده و به نظر می رسد که ملات همکار فولاد شکل پذیری بیشتری دارد. در حالت بتن و ملات غیر مسلح براساس مفاهیم پایداری، آسیب و ترک به تدریج در ناحیه محدودی متمرکز شده و در نهایت نمونه به دو نیم می شود [۱۰] و شکل پذیری اندکی مشاهده می گردد.

در مورد لوله ها نیز، وجود فولاد همراه لایه ملات، باعث انتقال تنش کششی به صورت گسترده به ملات شده و از بازشدگی ترک های ملات جلوگیری می نماید. در عوض تعداد ترک های ایجاد شده خیلی ریز، در پوشش زیاد خواهد بود. این ترک های با بازشدگی بسیار کوچک طوری می باشند که لبه های آن، به صورت کامل از هم جدا نخواهند شد و می توانند به صورت مؤثری مانع رسیدن سیال به فولاد شوند. همچنین تعداد زیاد این ترک های خیلی ریز، به ملات پوشش، به طور ظاهری، شکل پذیری خیلی بیشتری خواهد داد.

### ۳- رفتار مکانیکی لایه محافظ لوله

رفتار مکانیکی بتن و ملات در شرایط مختلف بارگذاری مورد مطالعات وسیعی قرار گرفته، ولی تاکنون مدل جامعی برای آن به دست نیامده است. علت اصلی این امر، ترک خوردن بتن و پیچیده بودن مدل کردن این ترک ها می باشد. مسائل اثرات حاصل از خزش و انقباض و تداخل آنها با مکانیک ترک خوردگی نیز مشکلات مدل کردن رفتار اینگونه مواد را بیشتر می سازد. وابستگی شدید رفتار بتن و ملات به نوع بارگذاری و ترکیب و توزیع مؤلفه های تنش، باعث شده است تا برای حالات جداگانه، مدل های مختلفی ارائه شود. برای حالت تنش کششی اعمال شده به طور گسترده نیز تجربیات مختلفی انجام گرفته و تحلیل های گوناگونی به عمل آمده است [۵، ۹ و ۱۱]. حالت کشش گسترده، بخصوص، برای بتن مسلح و برای بتن اطراف میلگرد بیشتر مورد توجه بوده است. در مرجع [۱۱] براساس نتایج تجربیات جمع آوری شده برای رفتار پس از تنش حداکثر، رابطه ای به صورت زیر پیشنهاد شده است:

۱۰۰۰ فرض می‌شود [۱۱]. ضخامت لایه پوشش داخل لوله های آب، طبق مراجع [۱ و ۲]، از حدود ۵ میلیمتر تا حدود ۱۳ میلیمتر متغیر می‌باشد (جدول ۱). برای محدوده فوق ضریب  $\alpha$  دارای تغییراتی از ۰/۸ تا ۰/۲ خواهد داشت. در شکل (۳)، تغییرات تنش متوسط کششی برحسب کرنش متوسط، برای مقادیر مختلف  $\alpha$ ، رسم شده است. از این شکل، اثر اندازه ضخامت لایه در رفتار پس از بار حداکثر، به خوبی مشهود می‌باشد. با افزایش ضخامت، شکل پذیری کاهش می‌یابد.

با استفاده از روابط بیان شده و یا منحنی های شکل (۳)، محاسبه کرنش و تنش متوسط ایجاد شده در ملات پوشش داخلی لوله امکان پذیر خواهد شد. اگر  $d$  قطر داخلی لوله باشد و ضخامت کل لوله و ملات را در مقایسه با شعاع لوله بتوان کوچک فرض نمود، رابطه تعادل، به طور تقریبی، به صورت زیر خواهد بود:

$$t_s \sigma_s + t_f t = P \frac{d}{2} \quad (7)$$

که در رابطه فوق:  $P$  = فشار سیال داخل لوله،  $\sigma_s$  = تنش متوسط در فولاد و  $t_s$  = ضخامت جداره لوله فولادی می‌باشند. رابطه سازگاری کرنش های متوسط به صورت زیر بیان می‌گردد:

$$\epsilon = \epsilon_s \quad (8)$$

که  $\epsilon_s$  = کرنش متوسط در فولاد و  $\epsilon$  = کرنش متوسط ملات می‌باشد.

مسئله حاصل غیر خطی است، ولی بسادگی قابل حل می‌باشد. در تقریب اول، باتوجه به سهم اندک نیروی مقاوم ملات در مقایسه با نیروی مقاوم فولاد، از رابطه (۷) می‌توان نوشت:

$$\sigma_s = P \frac{d}{2t_s} \quad (9)$$

و در نتیجه کرنش در ملات از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$\epsilon = \frac{\sigma_s}{E_s} = \frac{Pd}{2E_s t_s} \quad (10)$$

در صورتی که کرنش حاصل از رابطه ۱۰ از  $\epsilon_0$  بیشتر باشد، به کمک رابطه (۳)، تنش متوسط در ملات به دست

می‌آید. باتوجه به محدودیت استاندارد AWWA [۳] در تنش فولاد، به طوری که براساس بارگذاری حالت عادی و حالت فوق العاده نباید تنش فولاد به ترتیب از پنجاه درصد و هفتاد و پنج درصد تنش سیلان آن تجاوز نماید، دیده شد که کرنش های نظیر این محدودیتها برابر  $0.57 \times 10^{-2}$  و  $0.86 \times 10^{-2}$  خواهند بود. بنابر این به کمک روابط ۳ و ۶، می‌توان برای مقادیر مختلف  $t$ ، تنش کششی متوسط ملات نظیر حدهای مزبور را محاسبه نمود. از منحنی شکل (۲) دیده می‌شود که برای  $\alpha$  های بزرگتر (لایه های پوشش با ضخامت کمتر)، در محدوده مجاز مورد نظر AWWA، مقاومت ملات افت چندانی نکرده و در عمل آن را می‌توان به صورت پلاستیک مدل نمود. برای  $\alpha$  های کوچکتر (ضخامت پوشش بیشتر) نیز کاهش در مقاومت نسبتاً اندک بوده و در جهت اطمینان می‌توان مقاومت پوشش ملات را برابر  $0.8 f_t$  در نظر گرفته و از فرض رفتار پلاستیک استفاده نمود.

پارامترهای به کار رفته در محاسبات به عمل آمده، براساس آزمایشهایی می‌باشند که به طور کلی بر روی بتن و ملات مسلح، با کاربرد و مشخصات سازه ای: انجام گرفته اند. جهت به دست آوردن مقادیر مناسب تر برای پارامترهای مدل رفتار ملات پوشش داخل لوله، مناسب تر خواهد بود تا آزمایش های ویژه ای طراحی و اجرا گردند. این آزمایش ها باید براساس مقایسه رفتار مکانیکی لوله های بدون اندود و با اندود برنامه ریزی گردند. لازم می‌باشد که تغییر قطر لوله های اندود شده و بدون اندود برحسب افزایش فشار آب اندازه گیری شده و از تفاوت آنها، رفتار اندود شناسایی می‌شود. در آزمایشی دیگر، نمونه کوتاه با ارتفاع حدود سی سانتی متر، از لوله را می‌توان از داخل و خارج اندود نمود و سپس تحت فشار محوری مورد آزمایش قرار داد. از مقایسه منحنی نیرو - تغییر طول حاصل با منحنی نظیر لوله بدون اندود، منحنی رفتاری اندود را می‌توان استخراج نمود. به عنوان آزمایشی با سهولت بیشتر می‌توان ورقه های فولادی بدون اندود و اندود شده از دو طرف با ملات ماسه سیمان را تحت آزمایش کشش ساده قرار داد و منحنی های حاصل را مقایسه نمود و اثر تغییرات پارامترهای مختلف، به ویژه ضخامت ملات را، بر نتایج حاصل مطالعه کرد.

همچنین مقدار مقاومت کششی ملات ( $f_t'$ ) نیز تابع ضخامت لایه می‌باشد، که در آزمایش های مورد نظر باید مورد مطالعه واقع گردد.

لوله های آب روشی به دست آمد که، برحسب ضخامت پوشش، رفتار پس از بار حداکثر آن را ارائه می دهد. از این روش در طراحی پوشش می توان استفاده کرد. دیده می شود که با افزایش ضخامت لایه پوشش، شکل پذیری آن کاهش می یابد. جهت تعیین دقیق تر پارامترهای این مدل احتیاج به انجام آزمایش های مناسب تری می باشد که بدین منظور برخی روش های ممکن پیشنهاد گردید.

رفتار پوشش ملات داخل لوله های تحت فشار، نیاز به تحلیل و تجربه ویژه خود را دارد. در این پوشش، تعداد ترک ها بیشتر، فاصله آنها کمتر و بازشدگی آنها نازکتر بوده و جدایی کامل لبه های ترک دیرتر حاصل می شود و در نتیجه ملات شکل پذیری بیشتری از خود نشان خواهد داد. براساس مطالعات انجام شده در مورد بتن و ملات مسلح، برای رفتار پوشش ملات محافظ

## مراجع

- [1] Cement-mortar protective lining and coating for steel water pipe-4 in. and larger-shope applied., AWWA standard C205-89. AWWA, Denever, Colo., USA, 1989.
- [2] Cement-mortar lining of water pipelines - 4 in. (100 mm) and larger-In place., AWWA Standard C 602-89., AWWA., Denever, Colo., USA, 1989.
- [3] Steel pipe-A guid for design and installation, AWWA Manual Mill, AWWA, Colo., USA, 1985.
- [4] Bazant, Z.P., "Scaling laws in mechanics of failure", J. Engng. Mech., ASCE, V.119, No. 9, pp. 1828 - 44, 1993.
- [5] Bazant, Z.P., and Pijaudier-Cabot, G., "Measurement of characteristic length of nonlocal continuum", J. Engng. Mech., ASCE, V. 115, No. 4, pp. 755-67, 1989.
- [6] Gerstle, W.H., Dey, P.P., Prasad, N.N.V., Rahul-kumar, P., and Xie, M., "Crack growth in flexural members-A fracture mechanics approach", ACI Strucatal Journal, V. 89, No. 6, pp. 617-25, 1992.
- [7] Phillips, D. V., and Binsheng, Z. ., "Direct tension tests on notched and un-notched plain concrete specimens", Magazine of Concrete Research, V. 45, No. 162, pp. 25-35, 1993.
- [8] Zarghamee, M. S., Ojdrovic, R. P., and Dana, W. R., "Coating delamination by radial tension in prestressed concrete pipe, I: Experiments and II: Analysis", Journal of Structural Engineering, V. 119. No.9. pp. 2701-31, 1993.
- [9] Ouyang, C. and Shah, S.P., "Fracture energy approach for predicting cracking of reinforced concrete tensile members", ACI Structural Journal, V. 91, No. 1, 1994.
- [10] Karihaloo, B.L., Carpinteri, A., and Elices, M., "Fracture mechanics of cement mortar and plain concrete", Advanced Cement Based Materials, V. 1, No. 2, pp. 92-105, 1993.
- [11] Stevens, N. J., Uzumeri, S. M., Collins, M. P., and Will, G. T., "Constitutive model for reinforced concrete finite element analysis", ACI Structural Journal, V. 88, No. 1, pp. 49-59 , 1991.