

کد مقاله: ۱-۱۳۱

## مدل اصلاح شده میلگرد فولادی برای در نظر گرفتن اثر تماسی بتن - میلگرد

### در مدل‌سازی با المان مدفون در بتن

سید سینا موسوی اجارستانی<sup>۱</sup>، مهدی دهستانی<sup>۲</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد سازه، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل، [seyedsina.m@gmail.com](mailto:seyedsina.m@gmail.com)

۲- عضو هیأت علمی، دانشگاه صنعتی نوشیروانی بابل

### چکیده

در نرم افزارهای اجزای محدود، به طور گسترده از المان مدفون در بتن برای مدل‌سازی آرماتورهای مسلح کننده در سازه بتن آرمه استفاده می‌شود. استفاده از این المان، مدل‌سازی را آسان کرده و حجم عملیات پردازش را به حداقل می‌رساند. اما به دلیل در نظر نگرفتن اثر تماسی بتن و میلگرد در المان مدفون در بتن، دقت و کارایی مدل پایین می‌آید. در روش قید مدفون در بتن، پیوستگی کامل بتن و میلگرد وجود دارد و تاثیر لغزش میلگرد در نظر گرفته نشده است. از این جهت، ارائه مدلی کارا برای مدل‌سازی اثر تماسی بتن و میلگرد در المان مدفون در بتن ضروری می‌باشد. در این مقاله مدلی اصلاح شده برای میلگرد فولادی ارائه می‌شود تا در استفاده از المان مدفون در بتن، اثر اندرکنشی میلگرد و بتن محصورکننده آن لحاظ شود. در این مدل، مشخصات مکانیکی میلگرد فولادی اصلاح شده و مدلی جدید جایگزین می‌شود. برای ارائه این مدل جدید، از حداکثر تنش پیوستگی بین بتن و میلگرد فولادی در تست Splitting استفاده شده است. در این مدل، زمان رسیدن سازه به حداکثر تنش پیوستگی، حداکثر تنش پیوستگی، رابطه تنش پیوستگی بر حسب لغزش میلگرد، کرنش معادل حداکثر تنش پیوستگی و اثر لغزش میلگرد بر کرنش میلگرد فولادی به طور دقیق در نظر گرفته شده است و مشخصات مکانیکی میلگرد فولادی متناسب با این پارامترهای مهم اصلاح شده است. در این مقاله، این مدل اصلاح شده با مدل‌های دیگر مورد مقایسه قرار گرفته و نتایج به طور دقیق بیان شده است. نتایج نشان می‌دهد که مدل ارائه شده در این مقاله کارایی لازم را نسبت به مدل‌های قبلی دارا بوده و درصد خطای آن نسبت به نتایج آزمایشگاهی بسیار کم می‌باشد.

**کلمات کلیدی:** میلگرد فولادی، المان مدفون در بتن، سازه بتنی، اندرکنش بتن و میلگرد، تنش پیوستگی

### ۱- مقدمه

اثر تماسی بین بتن و میلگرد فولادی یکی از مهم‌ترین پارامترهایی می‌باشد که کارایی رفتار مرکب سازه بتن آرمه را کنترل می‌نماید. ارزیابی دقیق اندرکنش میلگرد با بتن محصورکننده آن می‌تواند منجر به ارائه مدلی کارآمد و قابل اطمینان با درصد خطای بسیار کم در مدل‌سازی اجزای محدود شود. تنش پیوستگی بین میلگرد و بتن تابعی از لغزش میلگرد درون بتن می‌باشد. لغزش میلگرد توسط اختلاف کرنش بین بتن و میلگرد فولادی در سطح تماس بیان می‌شود. برای مدل‌سازی دقیق و قابل اعتماد سازه بتنی، یک مدل تحلیلی برای در نظر گرفتن اثر تماسی مورد نیاز می‌باشد. دو روش رایج برای مدل‌سازی رفتار مرکب در نرم افزارهای اجزای محدود موجود می‌باشد. در روش دقیق تر که المان Discrete نامیده

می شود، بتن و میلگرد فولادی به صورت دو المان کاملاً مجزا مدلسازی می شوند. در روش دیگر به نام المان Embedded یا المان مدفون شده، میلگرد فولادی به عنوان جزئی با سختی محوری مانند فیبر سخت کننده به صورت مدفون در المان بتن مدلسازی شده و تغییر مکان های گره ای آن با تغییر مکان گره ای المان بتن برابر می باشد [1]. در این روش فرض می شود هیچ لغزشی بین بتن و میلگرد رخ نمی دهد و پیوستگی کامل بین این دو ماده وجود دارد. اگرچه مدل Discrete از المان مدفون در بتن دقیق تر است و لغزش میلگرد را مدل می کند، اما تعداد مش ها در این روش بیشتر بوده و مدت زمان لازم برای پردازش تحلیل بسیار بیشتر از روش مدفون در بتن می باشد. بنابراین این روش برای سیستم های پیچیده با درجات آزادی بالا مناسب نمی باشد.

تا حالا روش های مختلفی برای اثر دادن اندرکنش بتن و میلگرد در مدلسازی اجزای محدود ارائه شده است. Ngo و Scordelis از مدل bond-link برای اثر تماسی بتن و میلگرد استفاده کرده اند [2]. در مدل آنها یک گره از بتن به یک گره از میلگرد فولادی متصل می شود و المان ارتباط (Link) هیچ بعد فیزیکی ندارد. Degroot و همکارانش سطحی را بین میلگرد و بتن تعریف کرده اند که bond-zone نام دارد. ویژگی های تماسی دو ماده را به این سطح اختصاص داده اند [3]. این روش برای سیستم های پیچیده مناسب نمی باشد زیرا تعداد گره ها را در سطح تماس و در نتیجه درجات آزادی کل سیستم را افزایش داده و مدت زمان همگرایی و پردازش تحلیل بالا می رود. Kim و Kwak مدل اصلاح شده ای را برای میلگرد فولادی ارائه داده اند [4]. روند محاسبه مدل اصلاح شده میلگرد بسیار طولانی بوده و دارای حجم عملیات بالایی می باشد و مدلی کاربردی برای استفاده کاربران نرم افزار های اجزای محدود نمی باشد. Zhou و همکارانش مدلی برای در نظر گرفتن اثر اندرکنش بتن و میلگرد در المان مدفون در بتن ارائه داده اند [5]. در مدل آنها دو صفحه ۴ گره ای در سطح تماس ایجاد شده که اجازه حرکت آزاد میلگرد را در مدل مدفون در بتن می دهد اما با این روند، تعداد گره های مورد نیاز برای تعریف این دو صفحه سبب بالا رفتن مدت زمان پردازش می شود.

در این مقاله با اصلاح مدل فولاد برای میلگرد مسلح کننده بتن، مشخصات مکانیکی آن را تغییر داده و اثر لغزش میلگرد را در نظر می گیریم هم چنین با در نظرگیری روش المان مدفون در بتن و اصلاح آن با تغییر مشخصات مکانیکی میلگرد مسلح کننده، مدلی کارا و با درصد خطای کم و با مدت زمان پردازش بهینه ارائه شده است.

## ۲- مدل اصلاح شده میلگرد فولادی

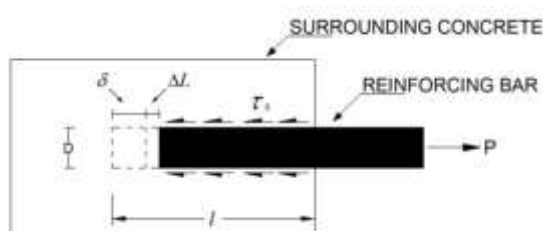
وجود تغییر مکان نسبی بین بتن و میلگرد فولادی می تواند تاثیر مثبتی در رفتار شکل پذیر یک سازه بتنی داشته باشد. در واقع تغییر مکان گسیختگی یک سازه بتنی به نحوی توسط اثر تماسی بین بتن و میلگرد فولادی در زمان مقاومت نهایی و هم چنین گسیختگی کنترل می شود. در این حیطة، Cashell و همکارانش نشان داده اند که یک دال بتنی با مقاومت پیوستگی بالا و لغزش کم میلگرد درون بتن، دارای شکل پذیری کمی بوده و زمان گسیختگی آن و رسیدن آن به مقاومت نهایی بسیار کم می باشد [6]. بنابراین ضروری است که یک مدل کارآمد ارائه شود تا اثر اندرکنش بتن و میلگرد فولادی را در روش المان محدود در نظر بگیرد. رابطه تنش- کرنش میلگرد فولادی معمولاً توسط یک منحنی دو خطی با مقاومت تسلیم مشهود  $f_y^*$  نشان داده می شود. برای میلگرد مدفون در بتن مدل های مختلف رابطه تنش-کرنش بر اساس نتایج آزمایشگاهی ارائه شده است. Belarbi و Hsu رابطه ای دو خطی تنش - کرنش را براساس نتایج آزمایشگاهی ارائه داده اند که مطابق آن مقاومت تسلیم میلگرد مدفون در بتن توسط رابطه (۱) بدست می آید [7].

$$\frac{f_y^*}{f_y} = (0.93 - 2B) \quad (1)$$

که مطابق آن، مقاومت تسلیم اصلاح شده به صورت تابعی از پارامتر  $B$  بیان می شود. این پارامتر از رابطه (۲) بدست می آید.

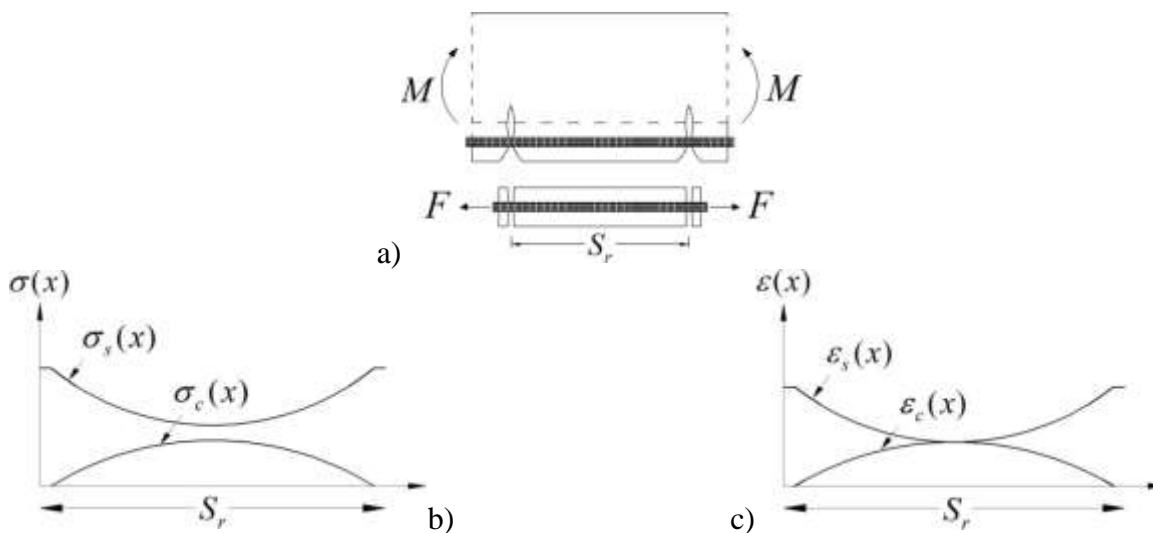
$$B = (f_{cr}/f_y)^{1.5} / r \quad (2)$$

در این رابطه،  $r$  نسبت آرماتور مسلح کننده مقطع و  $f_{cr}$  مقاومت کششی بتن در کرنش ترک خوردگی معادل  $0.00008$  می باشد. برای لحاظ کردن اثر اندرکنش بتن و میلگرد، کرنش معادل لغزش میلگرد به کرنش تسلیم میلگرد فولادی اضافه شده و سختی الاستیک اصلاح شده میلگرد فولادی ارائه می شود. همان طور که در شکل ۱ نشان داده شده است، تغییرشکل کلی میلگرد فولادی از جمع تغییرشکل داخلی آن ناشی از کرنش میلگرد فولادی  $DI$  و تغییرشکل معادل لغزش میلگرد در بتن  $d$  بدست می آید.



شکل ۱: تغییر شکل کلی میلگرد فولادی مدفون در المان بتنی

برای بررسی و ارائه مدل اصلاح شده میلگرد فولادی، المان بتن مسلحی تحت خمش خالص در شکل ۲ نشان داده شده است.



شکل ۲: رفتار یک المان بتن مسلح تحت خمش (a) بخش کششی از المان (b) توزیع تنش در مقطع (c) توزیع کرنش در مقطع

مطابق شکل (a) ۲، فاصله بین دو ترک مجاور هم در عضو خمشی توسط  $S_r$  بیان می شود. بتن موجود در فاصله بین دو ترک در ظرفیت باربری سازه همکاری می کند. اما در مقطع ترک خورده، بتن هیچ نقشی در تحمل بار نداشته و نیروی کششی به طور کامل توسط میلگرد فولادی متحمل می شود. این امر منجر به تمرکز تنش و تمرکز کرنش در آن مقطع میشود که در شکل (b) ۲ و (c) ۲ نشان داده شده است. در واقع در مقطع ترک

خورده هیچ تنش پیوستگی وجود نداشته و تمرکز تنش و کرنش را ناشی می شود. بر مبنای این اصل، مدول الاستیسیته اصلاح شده میلگرد فولادی با در نظرگیری اثر تماسی بتن و میلگرد توسط رابطه (۳) بیان می شود.

$$E_s^* = \frac{f_y^*}{e_s + (d/l)} \quad (۳)$$

که در آن،  $f_y^*$  تنش تسلیم اصلاح شده میلگرد فولادی،  $e_s$  کرنش میلگرد فولادی معادل با تنش تسلیم اصلاح شده  $f_y^*$  و  $d$  لغزش ماکزیمم میلگرد فولادی می باشد. هم چنین در این معادله،  $l$  برابر با طول انتقال تنش پیوستگی بین میلگرد و بتن محصور کننده آن می باشد. Wu و Zhao ماکزیمم لغزش میلگرد را توسط رابطه (۴) ارائه داده اند [8].

$$d = \frac{0.7315 + K}{5.176 + 0.3333K} \quad (۴)$$

که در آن  $K$  برابر است با:

$$K = K_{co} + 33K_{st} \quad (۵)$$

$K_{co}$  و  $K_{st}$  توسط رابطه (۶) و (۷) بیان می شود.

$$K_{co} = \frac{C}{d_b} \quad (۶)$$

$$K_{st} = \frac{A_{st1}}{CS_{st}} \quad (۷)$$

که در این معادلات،  $C$  برابر با حداقل پوشش بتنی میلگرد فولادی،  $d_b$  برابر با قطر میلگرد فولادی،  $A_{st1}$  مساحت یک لنگه خاموت و  $S_{st}$  فاصله خاموت ها می باشند. تغییر مکان نسبی بین میلگرد فولادی و بتن محصور کننده آن توسط رابطه (۸) بیان می شود.

$$d(x) = \int_0^x (e_s \ominus e_c) dx \quad (۸)$$

بنابراین طبق رابطه (۸)، در وسط المان خمشی و بین دو ترک مجاور هم، کرنش در میلگرد فولادی و بتن محصور کننده آن برابر بوده و مطابق شکل (c) لغزش میلگرد در این نقطه برابر با صفر می باشد. بنابراین ماکزیمم لغزش میلگرد  $d$ ، مربوط به نیمی از فاصله بین دو ترک متوالی می باشد و طول انتقال تنش پیوستگی  $l$ ، می تواند توسط رابطه (۹) بدست آید.

$$S_{r(\min)} = 2l \quad (9)$$

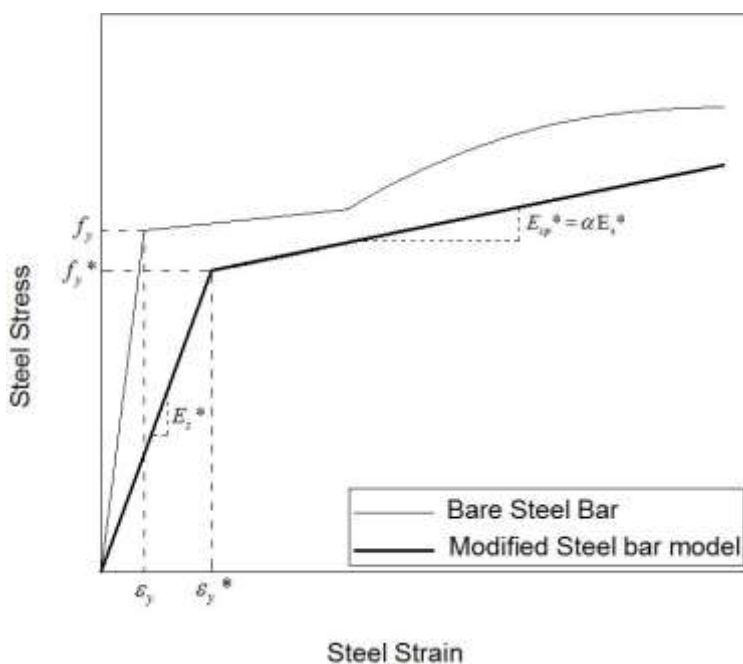
که این طول انتقال برابر با مینیمم فاصله دو ترک مجاور هم در یک عضو خمشی  $S_{r(\min)}$  می باشد. بر طبق تحقیقات Borosnyoi و همکارانش [9]، این طول مینیمم  $0.67$  برابر طول متوسط فاصله ترک در یک عضو خمشی می باشد که آیین نامه CEB [10] رابطه (۱۰) را برای بدست آوردن فاصله متوسط ترک ارائه داده است.

$$S_{rm} = \frac{2}{3} \cdot \frac{d_b}{3.6r_{eff}} \quad (10)$$

با توجه به رابطه (۹) و (۱۰) طول انتقال تنش پیوستگی بین میلگرد فولادی و بتن محصور کننده آن توسط رابطه (۱۱) بدست می آید.

$$l = \frac{0.67}{2} S_{rm} \quad (11)$$

بنابراین مدل اصلاح شده میلگرد فولادی بدست آمده و در شکل ۳ نشان داده شده است.

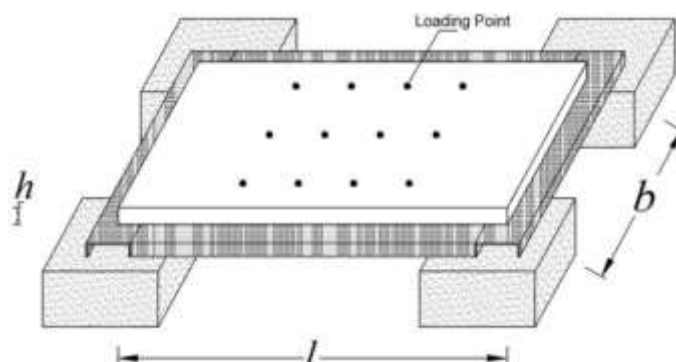


شکل ۳: نمودار تنش - کرنش مدل اصلاح شده میلگرد فولادی در مقایسه با نمودار اولیه آن

### ۳- صحت سنجی روش ارائه شده

برای صحت سنجی روش ارائه شده، از یک نمونه آزمایشگاهی که توسط Cashell و همکارانش [11] صورت گرفته است استفاده می شود. نمونه یک دال بتنی دو طرفه با ابعاد  $1500mm \times 2250mm$  و ارتفاع  $60mm$  می باشد. آرماتور مسلح کننده در قسمت میانی ارتفاع دال قرار

داشته و میلگرد های با طول کمتر در ارتفاع پایین تر نسبت به سرفه میلگرد های با طول بزرگتر قرار دارند. این دال تحت بار یکنواخت استاتیکی قرار دارد و توسط ۱۲ نقطه میانی بارگزاری شده است. شکل شماتیت نمونه آزمایشگاهی در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴: نمونه صحت سنجی شده توسط روش ارائه شده

مشخصات نمونه صحت سنجی شده در جدول ۱ آمده است:

جدول ۱: مشخصات نمونه مورد صحت سنجی قرار گرفته

نمونه	$r$ (%)	$D$ (mm)	$f'_c$ (MPa)	$f_{ct}$ (MPa)	$f_{sy}$ (MPa)	$e_{su}$
R-F60-D6-A	۰/۲۴	۶	۳۲/۰	۲/۱	۵۵۳	۰/۰۴

طول انتقال، تنش تسلیم اصلاح شده و مدول الاستیک اصلاح شده میلگرد فولادی بر مبنای تئوری ارائه شده در جدول ۲ نشان داده شده است.

جدول ۲: طول انتقال، تنش تسلیم اصلاح شده و مدول الاستیسیته اصلاح شده برای نمونه صحت سنجی شده

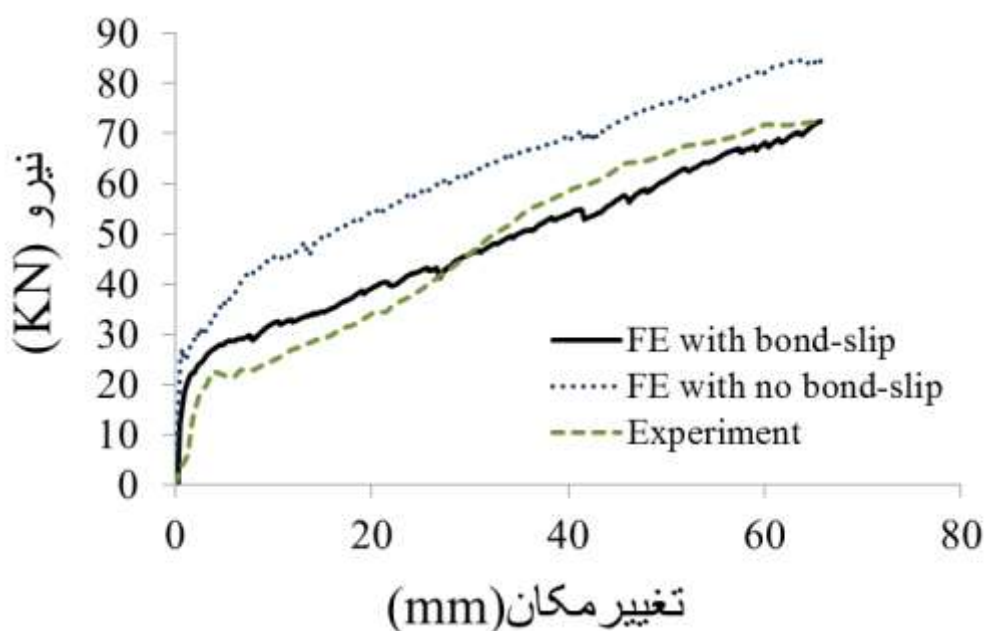
نمونه	طول انتقال $l$ (mm)	تنش تسلیم اصلاح شده $f_y^*$ (MPa)	مدول الاستیک میلگرد $E_s$ (MPa)	مدول الاستیک اصلاح شده $E_s^*$ (MPa)	$b$ (%) $E_s^* = bE_s$
R-F60-D6-A	۳۱۰/۱۷۵	۴۰۴/۳۶	۲۰۰۰۰۰	۱۱۹۷۶۵/۲۰۶	۵۹/۸۸

هم چنین ضریبی به نام  $b$  معرفی شده است که ضریب کاهش مدول الاستیسیته می باشد. نرم افزار اجزای محدود Abaqus برای مدل سازی این نمونه آزمایشگاهی استفاده شده است. برای مدل سازی بتن از مدل بتن آسیب دیده خمیری (CDP) استفاده شده است. پارامترهای لازم برای این مدل بتن در جدول ۳ آمده است.

جدول ۳: پارامتر های مدل آسیب دیده خمیری برای بتن

Dilation angle ( $\gamma$ )	Flow potential eccentricity ( $\epsilon$ )	$s_{b0}/\sigma_{c0}$	$K_c$	Viscosity parameter ( $m$ )
۳۰	۰/۱	۱/۱۶	۰/۶۶۶	۰/۰۰۰۰۱

نتایج صحت سنجی روش ارائه شده در شکل ۵ نشان داده شده است. نتایج نشان می دهد که مدلسازی بدون توجه به اثر لغزش میلگرد در بتن و استفاده از المان مدفون در بتن دارای خطای قابل ملاحظه ای می باشد. اما اصلاح مشخصات میلگرد فولادی و اثر دادن لغزش میلگرد در محاسبات سبب بالابردن دقت نتایج شده و خطای آن را کم کرده است.



شکل ۵: نتایج حاصل از صحت سنجی تئوری ارائه شده

#### ۴- نتیجه گیری

همان طور که در این مقاله ارائه شد، با اصلاح کردن مشخصات مکانیکی میلگرد فولادی و هم چنین استفاده از آن در المان مدفون در بتن می توان ضعف مدل المان مدفون در بتن را از میان برده و اثر تماسی میلگرد فولادی و بتن محصور کننده آن را در المان مدفون در بتن لحاظ کرد. با این امر دیگر نیازی به استفاده از روش های زمان بر با حجم المان های زیاد نبوده و دقت مدلسازی افزایش می یابد. به دلیل سادگی روش ارائه شده در این مقاله میتوان از آن در سازه های پیچیده بتنی استفاده کرد و اثر اندرکنشی مواد را در محاسبات خود در نظر بگیریم.

- [1] Hibbitt, D., B. Karlsson, and P. Sorensen. "ABAQUS analysis user's manual." Pawtucket, USA (2004).
- [2] Ngo, D., and A. C. Scordelis. "Finite element analysis of reinforced concrete beams." *ACI Journal Proceedings*. Vol. 64. No. 3. ACI, (1967).
- [3] Degroot, A. K., G. M. A. Kusters, and Th Monnier. "Concrete mechanics. Part B: Numerical modelling of bond slip behavior." *NASA STI/Recon Technical Report N 82* (1981): 25418.
- [4] Kwak, Hyo-Gyoung, and Jin-Kook Kim. "Implementation of bond-slip effect in analyses of RC frames under cyclic loads using layered section method." *Engineering structures* 28, no. 12 (2006): 1715-1727.
- [5] Zhou, Y. D., C. Y. Cheuk, and L. G. Tham. "An embedded bond-slip model for finite element modelling of soil–nail interaction." *Computers and Geotechnics* 36, no. 6 (2009): 1090-1097.
- [6] Cashell, K. A., A. Y. Elghazouli, and B. A. Izzuddin. "Ultimate behavior of idealized composite floor elements at ambient and elevated temperature." *Fire technology* 46, no. 1 (2010): 67-89.
- [7] Belarbi, Abdeldjelil, and Thomas TC Hsu. "Constitutive laws of concrete in tension and reinforcing bars stiffened by concrete." *ACI structural Journal* 91, no. 4 (1994).
- [8] Wu, Yu-Fei, and Xue-Mei Zhao. "Unified Bond Stress–Slip Model for Reinforced Concrete." *Journal of Structural Engineering* 139, no. 11 (2012): 1951-1962.
- [9] Borosnyói, A., and G. L. Balázs. "Models for flexural cracking in concrete: the state of the art." *Structural Concrete* 6, no. 2 (2005): 53-62.
- [10] Comité euro-international du béton. *CEB-FIP Model Code 1990: Design Code*. No. 213-214. FIB-Féd. Int. du Béton, (1993).
- [11] Cashell, K. A., A. Y. Elghazouli, and B. A. Izzuddin. "Failure assessment of lightly reinforced floor slabs. I: Experimental investigation." *Journal of Structural Engineering* 137, no. 9 (2011): 977-988.