

تشکیل تراز و آشکارسازی ترک های معمولی در عناصر و سازه های بتن مسلح

حسین پورسلحشوری^۱. آرمان ختار^۲

۱- دانشجو کارشناسی مهندسی عمران

۲- استادیار

آدرس پست الکترونیک: hossein.logan.skyboy@gmail.com

چکیده

این مقاله به بررسی قوانین اصلی شکل‌گیری سطح ترک‌های معمولی در عناصر و سازه‌های بتن مسلح اختصاص دارد. یک تحلیل انتقادی از آخرین انتشارات مرتبط با موضوع این مطالعات انجام شده است. ویژگی‌های اصلی نمونه‌های اولیه، شرایط ساخت و ذخیره‌سازی آنها آورده شده است. بر اساس نتایج مطالعات تجربی، مشخص شده است که در طراحی واقعی خمش عناصر بتن مسلح، هنگام محاسبه ترک آنها مقاومت، می‌تواند خود را تنها به دو سطح ترک معمولی محدود کند. مرحله تشکیل ترک ارتباط مستقیمی با قوانین و پارامترهای اساسی آرماتور به چسبندگی بتن دارد.

۱. مقدمه

به طور کلی، مشخص است که فرآیندهای تشکیل و توسعه ترک‌ها، از جمله موارد عادی، به طور قابل توجهی بر خواص عملیاتی عناصر و سازه‌های بتن مسلح تأثیر می‌گذارد. بنابراین کاملاً بدیهی است که بحث مقاومت در برابر ترک آنها همواره یکی از موضوعات اصلی نظریه تغییر شکل در بتن مسلح باقی خواهد ماند. با معرفی روش‌های تغییر شکل برای محاسبه عناصر و سازه‌های بتن مسلح در طراحی مدرن، وزن و اهمیت بیشتری پیدا می‌کنند. در واقع، با استفاده از مدل‌های تغییر شکل، امکان بازتولید دقیق‌تر حالت تنش-کرنش واقعی عناصر و سازه‌های بتن مسلح در فرآیند تغییر شکل آن‌ها فراهم می‌شود. در عین حال، نتایج مطالعات تجربی نشان می‌دهد که تشکیل و توسعه ترک‌ها در عناصر بتن مسلح چند سطحی است و منجر به اختلال تدریجی آرماتور با اندرکنش بتن کششی می‌شود. در چنین شرایطی، توصیه می‌شود که یک روش کلی برای محاسبه تشکیل و باز شدن ترک‌های معمولی بر اساس تقویت‌کننده به چسبندگی بتن که قوانین دخالت مستقیم را تعریف می‌کند، ساخته شود. در غیر این صورت، محاسبه عرض نرمال باز شدن ترک‌ها طبق فرضیه توماس (۱۹۳۶) عمدتاً به صورت اعلامی باقی خواهد ماند. این به دلیل این واقعیت است که انجام این محاسبه از نقطه نظر تجمع متوالی جابجایی‌های متقابل بتن و آرماتور بسیار دشوار است. از آنجایی که وابستگی واقعی آرماتور و جابجایی متقابل بتن بسیار پیچیده است و نمی‌توان آن را با یک تابع توصیف کرد، یکپارچگی مستقیم آن در اکثر موارد عملاً غیرممکن است.

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

با این حال، در صورتی که گام ترک و عرض باز شدن آنها مستقیماً با آرماتور به نیروهای چسبندگی بتن مرتبط باشد و در نظر بگیرید که فرآیند ترک چند سطحی است، محاسبه عرض باز شدن ترک‌های معمولی را می‌توان به طور قابل توجهی ساده کرد. بنابراین، امکان و مصلحت چنین رویکردی در محاسبه پارامترهای اصلی عناصر و سازه های بتن آرمه مقاومت ترک مستلزم مطالعات خاصی است.

نامگذاری

M	لنگر خمیدگی
Nct	نیروها در بتن کششی
Nbd	نیروهای چسبندگی آرماتور به بتن
τ_b	تنش های چسبندگی آرماتورها با بتن
fct	مقاومت بتن کششی
σ_s	تنش های تقویتی
ϵ_s	تغییر شکل های تقویتی
sr	مرحله ترک خوردن
W	عرض ترک باز شده

۲. تجزیه و تحلیل تحقیقات اساسی و انتشارات

معمولاً بررسی مقاومت ترک خوردگی عناصر و سازه های بتن مسلح به کارهای زیادی توسط دانشمندان داخلی و حتی بیشتر خارجی اختصاص دارد. با این حال، تنها تعداد کمی از آنها با هدف شناسایی عمومی بودند. الگوهای ترک های معمولی تشکیل و توسعه سطح واقعی و تقویت چسبندگی بتن در نظر گرفته شد. آنها را می‌توان به طور مشروط به ۴ جهت زیر تقسیم کرد::

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

در کارهای جهت اول، اثر چسبندگی آرماتور به بتن بر روی تشکیل و توالی توسعه ترک های معمولی با ادغام مستقیم نمودارهای جابجایی متقابل بتن و آرماتور مدل سازی شده است (آلوارز (۱۹۹۸)، فرناندز رویز و همکاران (۲۰۰۵) و رودنی. (۲۰۱۵)). با این حال، اجرای این روش در محاسبات عملی بسیار دشوار است، زیرا شکل این نمودارها در فرآیند تغییر شکل عناصر بتن مسلح به طور مداوم در حال تغییر است (شیما و همکاران (۱۹۸۷) و حراجلی و همکاران (۱۹۹۵)) و (الیگاوزن و همکاران (۱۹۸۳)). که ادغام مستقیم آنها را عملاً غیرممکن می کند. بنابراین، آثار جهت دوم عمدتاً با هدف روش های عددی برای محاسبه تشکیل چندسطحی و باز شدن ترک های عادی هستند. اجرای آنها تنها با روش های اجزا محدود با استفاده از سیستم های نرم افزاری خاص امکان پذیر است (کارپنکو (۱۹۹۶)، (وسلوف (۲۰۰۰)، (بنین و همکاران (۲۰۱۳)، (شارداکوف و همکاران (۲۰۱۶)).

اغلب اوقات، این منجر به این واقعیت می شود که دید مهندسی و ماهیت فیزیکی فرآیندهای تقویت به چسبندگی بتن و ترک خوردگی در یک عنصر بتن مسلح تا حدی از بین می رود یا تراز می شود. در مطالعات جهت سوم از المان ویژه «دو کنسول» استفاده می شود (کولچونوف و یاکوونکو (۲۰۰۹)، (یاکوونکو (۲۰۱۸)). تکنیکی که با کمک آن ساخته شده است، به طور کلی، امکان شبیه سازی شکل گیری سطح ترک های طبیعی را فراهم می کند.

اما امروزه اجرای آن در محاسبات عملی به دلیل مشکلات بزرگ مربوط به "انزوا" یا تشکیل خود عنصر "دو کنسول" هنوز بسیار دشوار است و بنابراین فقط با کمک برنامه های کامپیوتری خاص امکان پذیر است. در کارهای جهت چهارم، روش های محاسبه تشکیل تراز ترک های نرمال با استفاده از تابع کلی تنش های متوسط آرماتور به چسبندگی بتن ساخته شده است.

اجرای آنها در محاسبات عملی بسیار ساده است. با این حال، این سوال در مورد اعتبار فرم اتصال (خطی یا غیرخطی) بین مقادیر متوسط آرماتور با تنش های چسبندگی بتن و مقادیر متوسط تنش های نرمال در خود آرماتور در تمام مراحل تغییر شکل عنصر بتن مسلح باقی می ماند (کوچکارف (۲۰۱۸)، (روماشکو (۲۰۱۸)).

۳. هدف و اهداف تحقیق

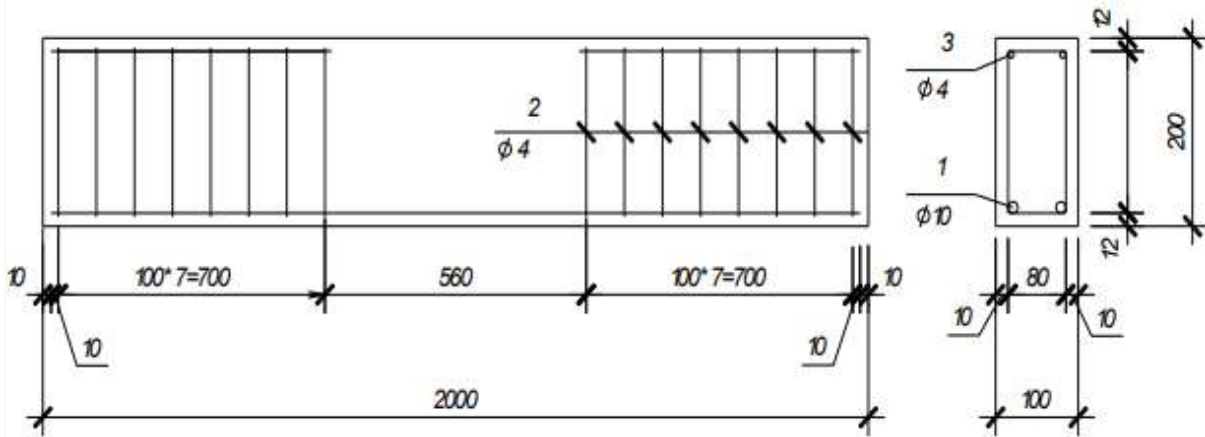
این مطالعات با هدف اثبات تجربی و نظری شکل اتصال (خطی یا غیرخطی) بین مقادیر متوسط آرماتور با تنش های چسبندگی بتن و مقادیر متوسط تنش های نرمال در خود آرماتور انجام شد. برای دستیابی به این هدف، وظایف بررسی منظم بودن سطح تشکیل ترک ها و باز شدن در عناصر خمشی با آزمایش تیرهای بتن آرمه، محاسبه با روش های مختلف عرض باز شدن نرمال ترک ها در طول سطح شکل گیری، برای انجام مقایسه های آماری مربوط به نتایج محاسباتی به دست آمده با داده های تجربی تعیین شد.

۴. نتایج تحقیق

برای رفع مشکلات فوق تصمیم گرفته شد که سه تیر بتن آرمه به طول ۲۰۰۰ میلیمتر با ابعاد مقطع 200x100 میلیمتر ساخته و آزمایش شود. در ناحیه تحت کشش تیرها با دو میله طولی به قطر ۱۰ میلی متر کلاس A500C تقویت شدند. میله های عرضی با قطر ۴ میلی متر ساخته شده از آرماتور کلاس B500 به شکل گیره های بسته خم شده بر روی بخش های پشتیبانی، خارج از منطقه خمشی خالص نصب شد. آنها با یک پله ۱۰۰ میلی متری قرار گرفتند. میله های سازه بالایی

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

در این ناحیه نیز ۴ میلی متر از آرماتور کلاس B500 قطر داشتند (شکل ۱). پوشش بتنی آرماتور بالا و پایین یکسان و ۱۲ میلی متر بود.



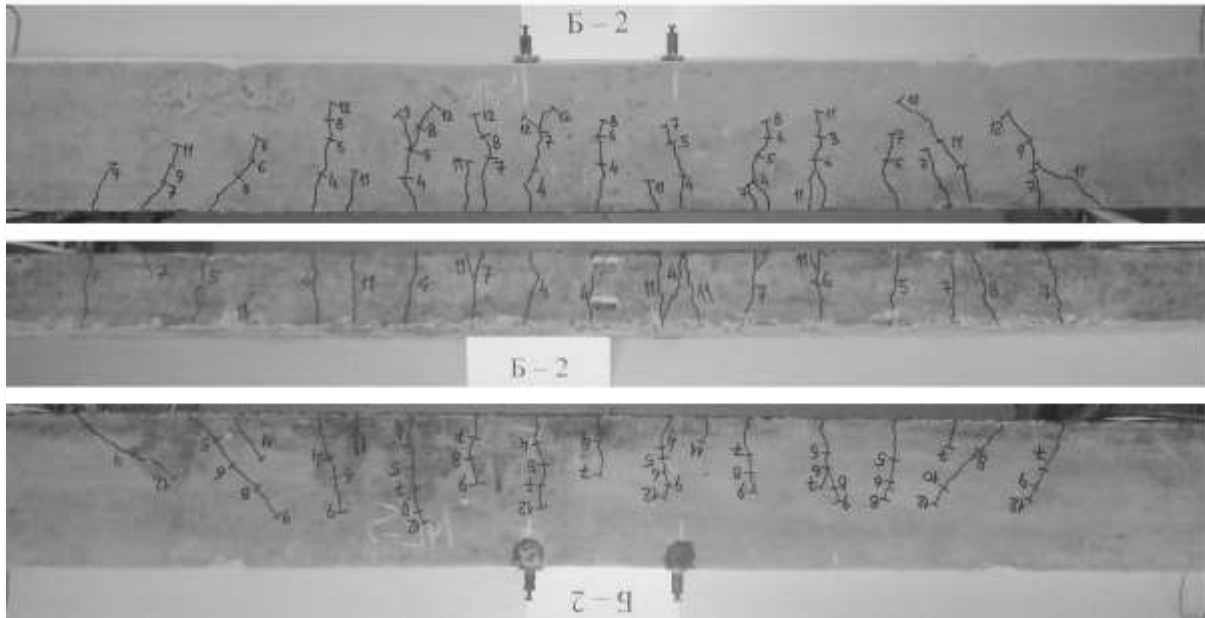
شکل ۱. طرح طراحی و تقویت تیرهای بتن مسلح.

کلیه تیرها از بتن سنگین کلاس C20 / 25 ساخته شده است. آماده سازی مخلوط بتن و تشکیل نمونه های اولیه در شرایط آزمایشگاهی انجام شد. بتن ریزی آنها در قالب های فلزی مخصوص به صورت افقی انجام شد. مخلوط بتن روی یک سکوی ارتعاشی خاص متراکم شد. سخت شدن بتن در شرایط محیطی معمولی در آزمایشگاه علمی گروه صنایع، مهندسی عمران و سازه های مهندسی انجام شد. آماده سازی تمام نمونه های اولیه برای آزمایش زمانی آغاز شد که به سن ۲۸ روزگی رسیدند. آزمایش تیرها در یک نصب قاب ویژه طبق طرح تیرهای تک دهانه لولا شده روی تکیه گاه ها با دهانه ۱۸۰۰ میلی متر انجام شد.

برای ایجاد یک منطقه خمشی خالص، آنها با دو نیروی متمرکز در یک سوم میانی دهانه محاسبه شده از طریق یک تراورس فلزی توزیع بارگذاری شدند. بار با استفاده از جک هیدرولیک ۱۵ تنی و ایستگاه پمپاژ دستی ایجاد شد و توسط دینامومتر حلقه ای مدرج کنترل می شد. انحراف تیر و نشست آن بر روی تکیه گاه ها با استفاده از انحراف سنج ۶ PAO کنترل شد. تغییر شکل های بتن فشرده با استفاده از نشانگرهای ۱ MIG که با پایه اندازه گیری ۲۰۰ میلی متر در قسمت میانی تیر نصب شده بود اندازه گیری شد. تغییر شکل های تقویت کننده پایین با استفاده از کنترل شد، کرنش سنج های معمولی هوگنبرگر که در وسط دهانه تیر بر روی هر یک از میله های کششی نصب شده اند. شروع و توسعه طبیعی ترک در تیرها به صورت بصری ثبت شد، عرض دهانه آنها با استفاده از میکروسکوپ MPB-3 با تقسیم مقیاس ۰,۰۲ میلی متر مورد بررسی قرار گرفت. تیرها در مراحل برابر با حدود ۱۰/۱ ظرفیت باربری نظری (Mu) بارگذاری شدند. به منظور رفع تشکیل ترک اول، مقدار ۴ مرحله بارگذاری اولیه به ۲۰/۱ (Mu) کاهش یافت. برای تثبیت ممان افت مقاومت باربری تیرها، دو مرحله نهایی بارگذاری آنها به صورت یکسان انجام شد. نتایج تجربی به دست آمده توسط (Romashko-Maistruk (2021) تأیید کرده اند که فرآیند تشکیل ترک های معمولی در تیرهای بتن مسلح در واقع یک فرآیند چند سطحی است (شکل ۲).

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

اولین ترک ها در تیرها در مراحل بارگذاری سوم یا چهارم در ممان های خمشی $Mu (0.125...0.17)$ ~ Mw.1 ایجاد شد. گام آنها برابر با $(20.5...80)$ میلی متر و عرض دهانه $(0.05...0.02)$ میلی متر بود. ترک های سطح دوم در پله های بارگذاری ششم یا هفتم در لحظات خمشی $Mu (0.33...0.5)$ ~ Mw.2 ظاهر شد. پله بین آنها قبلاً $(60 ... 105)$ میلی متر بود و عرض باز شدن ترک های اصلی به $(0.09 ... 0.13)$ میلی متر رسید. اشاره شد که با ایجاد ترک های سطح دوم، شدت باز شدن آنها ابتدا اندکی کاهش یافته و سپس دوباره افزایش یافته است. ترک های سطح ۳ در مراحل بارگذاری نهم تا دوازدهم در لحظات خمشی $Mu (0.78...0.95)$ ~ Mw.3، یعنی اندکی قبل یا در طول جریان تقویت کننده شروع به ظاهر شدن کردند. فاصله بین ترک های معمولی به $(30...70)$ میلی متر کاهش یافت. و عرض دهانه آنها به $(0.17...0.22)$ میلی متر افزایش یافت.



شکل ۲. اسکن تشکیل و ایجاد ترک در تیر B-2.

با در نظر گرفتن نتایج مطالعات تجربی، مقادیر نظری عرض باز شدن ترک های نرمال اصلی در تیرها بر اساس طرح یک سازند دو سطحی (Romashko and Romashko (2019)) با توجه به وابستگی محاسبه شد:

$$W_k = S_{r1}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{ctm}) - S_{r2}(\varepsilon_{sm} - \varepsilon_{sm,cr2} - \varepsilon_{ctm}), \quad (1)$$

S_{r1} و S_{r2} پله بین ترک های مجاور در سطوح ۱ و ۲ تشکیل آنها است. ε_{sm} - مقدار متوسط کرنش های آرماتور کششی در ناحیه بین ترک های معمولی مجاور. ε_{ctm} - تغییر شکل متوسط بتن کششی در همان منطقه؛ $\varepsilon_{sm,cr2}$ - تغییر شکل متوسط آرماتور کششی در بیشترین تنش بین ترک های مجاور در لحظه ظهور ترک های سطح دوم. همه تغییر شکل های فوق با توجه به مدل نیروی تغییر شکل (Romashko and Romashko (2019)) با توجه به حل ساده ترین سیستم روابط شناخته شده در مکانیک یک جامد تغییر شکل پذیر (MDS) تعیین شدند:

استاتیک

$$M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s), \quad N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s);$$

هندسی

(2)

$$M = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s), \quad N = f(\varepsilon_c, \varepsilon_{ct}, \varepsilon_s);$$

فیزیکی (وضعیت مواد)

$$\sigma_c = f(\varepsilon_c), \quad \sigma_{ct} = f(\varepsilon_{ct}), \quad \sigma_s = f(\varepsilon_s).$$

فاصله بین ترک های سطح مربوطه توسط تعادل حداکثر نیروهای ممکن در بتن کششی $N_{ct,cr} = f(\varepsilon_{ctu})$ و نیروهای تقویت کننده به چسبندگی فعال بتن $N_{bd,cr}$ ، در ناحیه بین ترک های نشان داده شده ((Romashko and (2018)) تعیین شد. به بیان:

$$s_{ri} = \frac{\phi_s}{4 \cdot \tau_{bmi} \cdot \rho_{l,t}}, \quad (3)$$

که ϕ_s قطر میلگردهای تقویت کننده کار. - τ_{bmi} مقدار متوسط آرماتور با تنش های چسبندگی بتن در ناحیه بین ترک های مجاور سطح مربوطه؛ ضریب تقویت ناحیه کشیده شده یک عنصر بتن مسلح است: $(\rho_{l,t} = A_s / A_{ct,cr})$.

میانگین آرماتورها با تنش های چسبندگی بتن با توجه به تابع غیرخطی تعمیم یافته نویسندگان Romashko و (2018) Romashko گرفته شد:

$$\tau_{bmi} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} \cdot (\sigma_{si} / f_{yk})^{1-1/\eta_1} \quad (4)$$

و توسط تابع خطی کوچکارف (۲۰۱۸):

$$\tau_{m,i} = f_{ctm} \cdot \left(\frac{\eta_1 \cdot \eta_2 - \alpha_0}{f_{yd}} \cdot \sigma_{si} + \alpha_0 \right), \quad (5)$$

که در آن η_1 ضریب با در نظر گرفتن پروفیل تقویت کننده با توجه به شاخص چسبندگی است، بر اساس Romashko- (2021) Maistruk گرفته شده است. η_2 - ضریب با در نظر گرفتن قطر آرماتور میباشد.

f_{ctk} and f_{ctm} - مشخصه و مقدار متوسط مقاومت بتن تحت کشش محوری. σ_{si} - حداکثر تنش های نرمال در آرماتور در ناحیه چسبندگی فعال آن به بتن کششی است.

که در آن ترک های یک سطح مشخص ظاهر می شوند - $(\sigma_{si} = \sigma_{s,cr}); \sigma_{si} = \sigma_{s,cr}$ حداکثر تنش های ممکن در آرماتور کششی در ناحیه چسبندگی فعال آن به بتن کششی (نمی تواند از مقادیر حدی f_{yk} تجاوز کند). - α_0 ضریب تناسب بین تنش های اولیه آرماتور به چسبندگی بتن و تنش ها در بتن کششی می باشد.

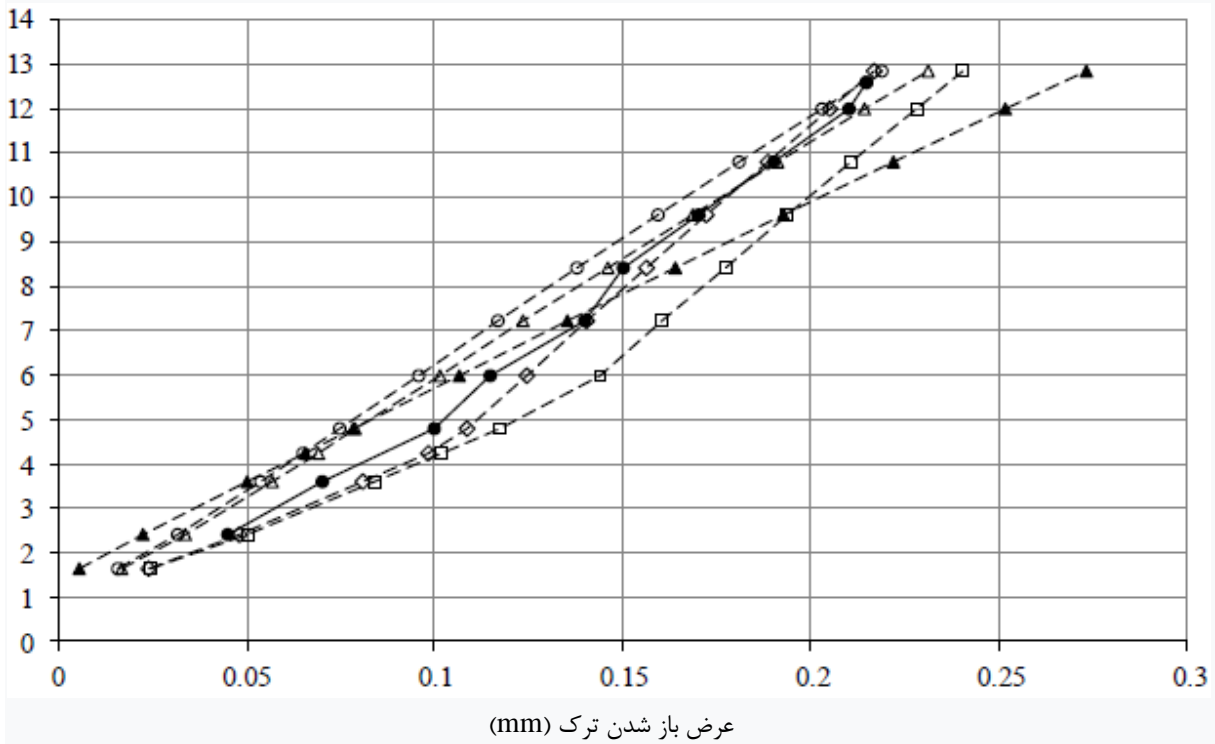
علاوه بر این، محاسبات بر اساس طرح های سنتی تشکیل ترک های معمولی "یک سطح" مطابق با هنجارهای فعلی DSTU (2011) B V.2.6-156:2010، EN 1992-1-1 (2004) و قوانین ساختمان SP 63.13330.2012 (2013)،

و همچنین بر اساس روش ساده شده روماشکو و روماشکو (۲۰۱۸) که در آن به جای تابع غیرخطی (۴) از مقادیر متوسط ثابت از تنش های متوسط آرماتور به چسبندگی بتن استفاده شده است. آنها با استفاده از یک عبارت نسبتاً ساده محاسبه شدند:

شانزدهمین کنفرانس ملی شهرسازی، معماری، عمران و محیط زیست

$$\tau_{bm} = \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot f_{ctk} / 2. \quad (6)$$

نمودارهای مقادیر تجربی و نظری عرض دهانه ترک محاسبه شده با استفاده از روش های فوق در شکل ۳ نشان داده شده است. و مشخصات آماری اصلی مقایسه آنها در جدول ۱ آمده است. بنابراین، نتایج مطالعات فوق به وضوح نشان می دهد که در طراحی واقعی سازه ها و سازه های بتن مسلح، آن دسته از روش هایی که تشکیل سطح ترک های معمولی را در نظر می گیرند، دارای مزیت هستند.



شکل ۳. وابستگی عرض باز شدن ترک (wm) به لنگرهای خمشی (M) در تیر B-3: - تجربی. نظری بر اساس روش شناسی: Δ - \square ، \blacktriangle - SP 63.13330.2012 (2013)، (EN 1-1-1992 (2004) و (DSTU B V.2.6-156:2010 (2011) - Kochkarev (2018),

(Romashko and Romashko (2018)- \circ ، (Romashko-Maistruk (2021- \diamond

روش محاسبه

انحراف از داده های تجربی

ضریب تغییر $v_w, \%$ ریشه میانگین مربع $\sigma_w, \%$ میانگین حسابی $\Delta_w, \%$

DSTU B V.2.6-156:2010 (2011) and EN 1992-1-1 (2004)	7.62	10.74	11.58
SP 63.13330.2012 (2013)	3.0	23.14	23.87
Kochkarev (2018)	16.04	5.17	4.46
Romashko-Maistruk (2021)	5.0	6.6	6.29
Romashko and Romashko (2018)	12.93	9.57	10.99

جدول ۱. ارزیابی آماری روشهای محاسبه عرض باز شدن ترکهای نرمال در تیرهای B-1 ... B-3

۵. نتیجه گیری

در طراحی واقعی عناصر و سازه های بتن آرمه خمشی، هنگام محاسبه مقاومت در برابر ترک، کافی است تنها به ۲ سطح ترک معمولی محدود شود. روش های محاسبه مقاومت در برابر ترک، که با استفاده از قوانین اساسی چسبندگی آرماتور به بتن ساخته شده اند، امکان باز تولید دقیق تر فرآیند واقعی شکل گیری و باز شدن ترک های معمولی در عناصر بتن مسلح را فراهم می کنند.

فرآیند تشکیل سطح ترک های معمولی در عناصر بتن مسلح را می توان به راحتی با استفاده از تابع تنش باند متوسط بین آرماتور و بتن کنترل کرد. تابع غیرخطی متوسط تنش های چسبندگی بین آرماتور و بتن به فرد اجازه می دهد تا پارامترهای اصلی تشکیل و باز شدن ترک های معمولی را با دقت بیشتری در مقایسه با خطی تعیین کند. در آینده، بررسی تأثیر پیش تنیدگی بر روند تشکیل و باز شدن سطح ترک های معمولی توصیه می شود.

منابع

Alvarez, M., 1998. Einfluss des Verbundverhaltens auf das Verformungsvermögen von Stahlbeton: Abhandlung zur Erlangung des Titels Doktor der Technischen Wissenschaften. Eidgenössischen Technischen Hochschule, Zürich, pp. 189.

Benin, A.V., Semenov, A.S., Semenov, S.G., Melnikov, B.E., 2013. Mathematical modeling of the process of destruction of the bond between reinforcement and concrete. Part 1. Models taking into account the discontinuity of the connection. Engineering and construction journal 5(40), 86-99.

DSTU B V.2.6-156:2010, 2011. Betonni ta zalizobetonni konstruksii z vazhkohto betonu. Pravyla proektuvannia [Concrete and reinforced concrete structures made of heavy concrete. Design rules]. Ministry of Regional Development of Ukraine, Kyiv, pp. 123.

Eligehausen, R., Popov, E.P. and Bertero, V.V., 1983. Local bond stress-slip relationships of deformed bars under generalized excitations: Report No. UCB/EERC-83/23. Earthquake Engineering Research Center of California University, Berkeley, pp. 169.

EN 1992-1-1, 2004. Eurocode 2: Design of Concrete Structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. CEN, Brussels, pp. 225.

Fernández Ruiz, M., Hars, E., Muttoni, A., 2005. Bond mechanics in structural concrete (theoretical model and experimental results). Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, pp. 75.

Harajli, M.H., Hout, M.A., Jalkh, W., 1995. Local bond stress-slip behavior of reinforced bars embedded in plain and fiber concrete. ACI Materials Journal 92(4), 343-353.

Karpenko, N.I., 1996. Obschie modeli mehaniki jelezobetona [General models of reinforced concrete mechanics]. Stroyizdat, Moscow, pp. 416.

Kochkarev, D.V., 2018. Nonlinear resistance of reinforced concrete elements and structures to force influences: DS dissertation thesis. Poltava National Technical University, pp. 467.

Kolchunov, V.I., Yakovenko, I.A., 2009. Development of a two-console element of fracture mechanics for calculating the width of crack opening in reinforced concrete structures. Bulletin of civil engineers St-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering 4(21), 160-163.

Romashko-Maistruk, O.V., 2021. Opir zalizobetonnykh elementiv bahatorivnevomu utvorenniu normalnykh trishchyn: PhD dissertation thesis. National University of Water Management and Environmental Engineering, Rivne, pp. 217.

Romashko, O., Romashko, V., 2018. Evaluation of bond between reinforcement and concrete. MATEC Web of Conf. 230, 02027.

Romashko, V., Romashko, O., 2018. Calculation of the crack resistance of reinforced concrete elements with allowance for the levels of normal crack formation. MATEC Web of Conf. 230, 02028.

Romashko, O. V. and Romashko, V. M., 2019. Model of multilevel formation of normal cracks in reinforced concrete elements and structures. IOP Conf. Ser.: Materials Science and Engineering, 708, 012069.

Rudny, I.A., 2015. Crack resistance of stretched and bent reinforced concrete elements with areas of broken adhesion: PhD dissertation thesis. St-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, pp. 153.

Shardakov, I.N., Bykov, A.A., Shestakov, A.P., Glot, I.O., 2016. Process of cracking in reinforced concrete beams (simulation and experiment). Frattura ed Integrità Strutturale 38, 339-350.

Shima, H., Chou, L.-L., Okamura, H., 1987. Micro and macro models for bond in reinforced concrete. Journal of the Engineering Faculty of Tokyo University XXXIX (2), 133-194.

SP 63.13330.2012, 2013. Concrete and reinforced concrete structures. Basic provisions. Ministry of Regional Development of Russia, Moscow, pp. 162.

Thomas, F.G., 1936. Cracking in Reinforced Concrete. The Structural Engineer 14(7), 298-320.

Veselov, A.A., 2000. Nonlinear theory of coupling of reinforcement with concrete and its applications: DS dissertation thesis. St-Petersburg State University of Architecture and Civil Engineering, pp. 320.

Yakovenko, I.A., 2018. Models of deformation of reinforced concrete on the basis of fracture mechanics: DS dissertation thesis. Poltava National Technical University, pp. 409.