



Numerical study on Ultra High-Performance Fiber Reinforced concrete for application in shear walls with boundary elements

Zeinab Nouri, Siamak Epackachi* 

Department of Civil Engineering, Amirkabir University of Technology, Tehran, Iran

ABSTRACT: The negative issues of concrete structures include the large dimensions of concrete members due to the low resistance of concrete compared to steel structures, the high density of reinforcements in some parts, and the brittle behavior of concrete due to weakness in tension. The use of fine aggregate and a lower water-to-cement ratio increases the strength, adding fibers to high-strength UHPC concrete increases the softness and tensile strength of concrete, which is called high-strength concrete with UHPFRC fibers with a compressive strength up to 200 MPa and a tensile strength of up to 14 Mpa. In this research, a technique for the numerical modeling of UHPC concrete is proposed using the LS-DYNA finite element software and modifying the tensile part of a normal concrete material model and the available test data. The validated LS-DYNA model is used to study this concrete on the cyclic behavior of short and thin shear walls. The use of this concrete in the boundary element of the walls has a significant effect in improving their seismic behavior. In this research, the effects of different parameters were investigated. It will be shown that an increment in the percentage of fibers up to 3%, the wall's lateral resistance and initial stiffness increase significantly.

Review History:

Received: Mar. 24, 2024

Revised: Jun. 01, 2024

Accepted: Sep. 14, 2024

Available Online: Oct. 03, 2024

Keywords:

Ultra High-Performance Concrete

Ultra High-Performance Fiber Reinforced Concrete

Finite Element Analysis

LS-DYNA

Cyclic Behavior

1- Introduction

Concrete is widely used in construction, but it has limitations, particularly its brittleness and poor performance under tensile loads [1]. Conventional reinforced concrete structures, especially shear walls, are critical for resisting lateral forces such as those caused by earthquakes. However, challenges like reinforcement congestion and inadequate crack control make traditional concrete less ideal for seismic applications.

Ultra High-Performance Fiber-Reinforced Concrete (UHPFRC) addresses these issues by offering compressive strength up to 200 MPa and tensile strength up to 14 MPa. The addition of steel fibers improves the tensile capacity, crack control, and ductility of the concrete [2]. This makes UHPFRC a promising material for use in critical structural elements such as the boundary elements of shear walls, where tensile and compressive forces are concentrated during seismic events.

This study focuses on developing a numerical model using LS-DYNA software to simulate UHPFRC behavior in shear walls and investigate how this material affects the walls' seismic performance, specifically in terms of lateral resistance and energy absorption.

2- Methodology

This research employed finite element analysis (FEA) to simulate the behavior of UHPFRC in shear walls. LS-DYNA, a powerful software tool for advanced dynamic and static analysis, was used to carry out these simulations. The concrete material model used in LS-DYNA, known as the Winfrith model, was adapted to incorporate the tensile characteristics of UHPFRC, particularly its ability to carry tensile loads and resist crack propagation. This was achieved by adjusting key parameters of the material model [3], including tensile strength, post-cracking behavior, and energy absorption properties.

The numerical model was built using brick elements to represent the concrete and beam elements to model the steel reinforcements. The walls were subjected to cyclic loading to replicate the conditions experienced during seismic events. The cyclic loading protocol applied horizontal forces that simulated the lateral loads experienced by shear walls during an earthquake.

The study also conducted a parametric analysis to explore the effects of varying fiber content in UHPFRC and the amount of steel reinforcement in the boundary elements. Three different fiber content levels were considered: 1.5%,

*Corresponding author's email: epackachis@aut.ac.ir



2%, and 3%. The reinforcement ratio in the boundary elements was also varied to assess the potential for reducing steel reinforcement without compromising the performance of the walls.

3- Results and Discussion

- The numerical simulations produced several key findings related to the seismic performance of shear walls with UHPFRC boundary elements:

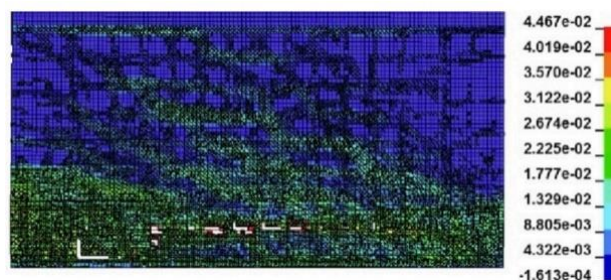
- Increased Lateral Strength:** Shear walls with UHPFRC in their boundary elements demonstrated a significant increase in lateral strength compared to those constructed with normal concrete. Specifically, the walls showed a 79% increase in lateral strength when the fiber content was increased to 3%. This improvement is attributed to the high tensile strength of UHPFRC, which enables it to resist the tensile forces that typically cause cracking in conventional concrete.

- Crack Control and Ductility:** UHPFRC proved to be highly effective in controlling crack propagation. The walls that incorporated UHPFRC experienced fewer and narrower cracks under cyclic loading compared to those made from traditional concrete. This enhanced crack control not only improved the overall structural integrity of the walls but also reduced the likelihood of failure under seismic loading conditions. Moreover, the walls exhibited increased ductility, allowing them to deform more before reaching failure, which is a critical characteristic for structures in seismic zones. The cracking pattern and principal strain contour for wall W1 can be seen in Fig. 1.

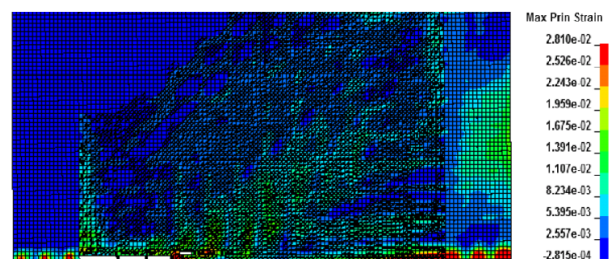
- Energy Absorption and Reduced Stiffness Degradation:** UHPFRC's ability to absorb energy was another significant finding. The walls with UHPFRC showed better energy absorption, meaning they could withstand more cyclic loading without suffering major stiffness degradation. This is crucial for earthquake-resistant structures, as it allows them to maintain their integrity over the course of multiple load cycles, reducing the likelihood of sudden failure.

- Reduction in Steel Reinforcement:** One of the most notable outcomes of this study was the potential for reducing steel reinforcement in boundary elements when using UHPFRC. The results indicated that with UHPFRC, the steel reinforcement in the boundary elements could be reduced by up to 75%, while still maintaining or improving the overall performance of the walls. This is particularly beneficial from a construction standpoint, as it reduces reinforcement congestion, making the construction process more efficient and cost-effective.

- Parametric Study Results:** The parametric analysis revealed that as the fiber content in UHPFRC increased, so did the lateral strength and ductility of the walls. For example, increasing the fiber content from 1.5% to 3% resulted in a substantial improvement in the seismic performance of the walls. Additionally, the reduction in steel reinforcement was more pronounced in walls with higher fiber content, as the UHPFRC compensated for the reduced steel content through its enhanced tensile and energy absorption properties.



a) Wall with normal concrete



b) Wall with UHPFRC concrete with 3% fiber

Fig. 1. Cracking pattern and maximum principal strain fringe of W1 at 1.5% drift ratio

4- Conclusion

The findings of this study demonstrate that UHPFRC offers significant advantages for the seismic design of shear walls, particularly when used in boundary elements. The use of UHPFRC in these critical areas of the walls results in several key benefits:

- Enhanced Seismic Performance:** UHPFRC significantly improves the lateral strength, ductility, and energy absorption of shear walls, making them more resilient to the forces experienced during earthquakes.

- Crack Control:** The superior crack control provided by UHPFRC reduces the spread and severity of cracks, which in turn enhances the durability and long-term performance of the walls.

- Reduction in Steel Reinforcement:** The ability to reduce the amount of steel reinforcement in boundary elements without sacrificing performance is a major advantage of UHPFRC. This not only simplifies the construction process but also lowers material costs and reduces reinforcement congestion, which can be a challenge in complex structural designs.

- Energy Absorption:** The increased energy absorption capacity of UHPFRC enables the walls to withstand repeated cycles of seismic loading without significant stiffness degradation, which is critical for the safety and performance of buildings in earthquake-prone regions.

References

- [1] H. Marzouk, Z. Chen, Fracture energy and tension properties of high-strength concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(2) (1995) 108-116.
- [2] S.P. Shah, B.V. Rangan, Fiber reinforced concrete properties, in: *Journal Proceedings*, 1971, pp. 126-137.
- [3] K. Wille, S. El-Tawil, A.E. Naaman, Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, *Cement and Concrete Composites*, 48 (2014) 53-66.



مطالعه عددی بر روی استفاده از بتن پرمقاومت مسلح شده با الیاف در دیوارهای برشی با المان‌های مرزی

زینب نوری، سیامک ایپکچی*

دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تهران، ایران.

تاریخچه داوری:

دریافت: ۱۴۰۳/۰۱/۰۵

بازنگری: ۱۴۰۳/۰۳/۱۲

پذیرش: ۱۴۰۳/۰۶/۲۴

ارائه آنلاین: ۱۴۰۳/۰۷/۱۲

کلمات کلیدی:

بتن پرمقاومت

بتن پرمقاومت مسلح شده با الیاف

تحلیل اجزا محدود

LS-DYNA

رفتار چرخه ای

خلاصه: از جمله موارد منفی موجود در سازه های بتنی می توان به ابعاد بزرگ اعضای بتنی، تراکم زیاد آرماتورها در بعضی مقاطع و رفتار ترد بتن اشاره کرد. استفاده از سنگدانه ریز و نسبت آب به سیمان کم تر سبب افزایش مقاومت می شود، افزودن الیاف به بتن پرمقاومت UHPC باعث افزایش نرمی و مقاومت کششی بتن می شود که با عنوان بتن پرمقاومت با الیاف UHPFRC مطرح می شود و می توان به مقاومت فشاری تا حدود ۲۰۰ مگاپاسکال و مقاومت کششی تا حدود ۱۴ مگاپاسکال دست پیدا کرد. در این مقاله ابتدا تکنیکی برای مدلسازی عددی این بتن به کمک نرم افزار اجزای محدود LS-DYNA پیشنهاد شده است. در این تکنیک با اصلاح بخش کشش، یک مدل ماده ی بتن معمولی به وسیله ی روابط حاصل از مطالعات تجربی، امکان مدلسازی عددی بتن UHFRC فراهم شده است. پس از راستی آزمایی مدل ماده بتن اصلاح شده در نرم افزار LS-DYNA، اثرات استفاده از این بتن در رفتار چرخه ای دیوارهای برشی کوتاه و لاغر به کمک مدلسازی عددی بررسی شده است. استفاده از این بتن در اعضای مرزی دیوارها تاثیر بسزایی در بهبود رفتار لرزه ای آن ها دارد. در این تحقیق اثرات پارامترهای مختلف بررسی شده و مشاهده شد با افزایش درصد الیاف تا سه درصد، مقاومت جانبی دیوار تا ۷۹٪ افزایش می یابد.

۱- مقدمه

بتن پرمقاومت تقویت شده با الیاف (UHPFRC^۱) یک نوع خاص بتن تولید شده با سیمان پرتلند، مواد افزودنی واکنش پذیر، سنگدانه ریز، مواد افزودنی بی اثر، مواد افزودنی سوپرپلاستیسزرها (superplasticizers) و الیاف فولادی می باشد. انواع الیاف فولادی بلحاظ هندسی در شکل ۱ مشاهده می شود. بهینه سازی درجه بندی مخلوط مواد تشکیل دهنده، چگالی تراکم بالایی را برای کامپوزیت سخت شده فراهم می کند و در نتیجه آن مقاومت، انعطاف پذیری و دوام فوق العاده بالایی به دست می آید. مخلوط های مبتنی بر سیمان با مقاومت بالا، بعد از اولین ترک شکست ناگهانی دارند. افزودن فایبر باعث به تأخیر افتادن اتصال سریع بین میکرو ترک های سنن پایین می شود و همچنین، مکانیسم های سفت شدن بین فایبر و ملات را فعال می کند. با توجه به این دلایل، UHPFRC یک رفتار سخت شدگی کرنش کاذب^۲ بعد از ترک خوردگی اولیه نشان می دهد. سپس تمرکز کرنش در

حداکثر بار اتفاق می افتد و ظرفیت برشی کاهش پیدا می کند تا به گسیختگی برسد. سایر پدیده های غیرارتجاعی شامل ترک خوردگی ملات و جداسازی و لغزش الیاف، شکل پذیری و جذب انرژی قابل توجه برای مواد بر پایه ی سیمان فراهم می کند.

۲- مبانی مدل عددی بتن UHPFRC

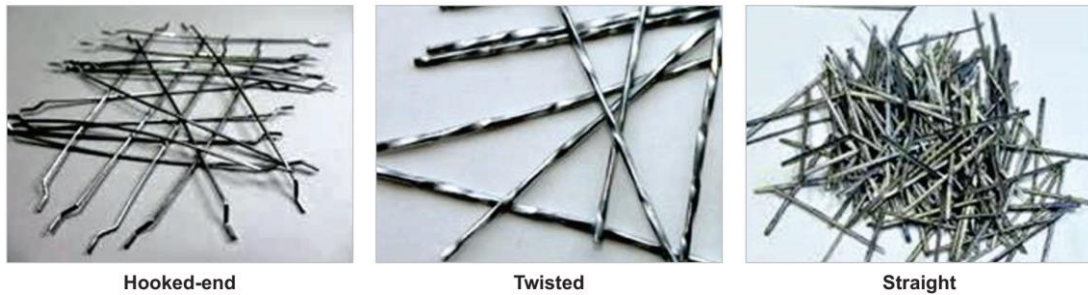
۲-۱- رفتار شناسی بتن UHPFRC

بتن به عنوان یک ماده ترد، با مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی پایین شناخته می شود. مقاومت کششی بتن بسیار کمتر از مقاومت فشاری آن است، که بزرگ ترین دلیل آن این است که ترک ها می توانند به سرعت تحت بار کششی گسترش یابند. اگرچه استحکام کششی معمولاً به طور مستقیم در طراحی در نظر گرفته نمی شود (معمولاً برابر با صفر فرض می شود)، به هر حال در نظر گرفتن همین مقدار ناچیز مقاومت در رفتار عضو تأثیرگذار است، زیرا ترک خوردگی در بتن وابسته به مقاومت کششی است. بر اساس یافته های Chen و Marzouk [۱] بتن را می توان یک ماده شکننده در نظر گرفت و استحکام کششی یک ماده شکننده به دلیل انتشار سریع یک

- 1 Ultra High Performance Fiber Reinforced Concrete
- 2 pseudo-strain hardening behavior

* نویسنده عهده دار مکاتبات: epackachis@aut.ac.ir





شکل ۱. انواع الیاف فولادی

Fig. 1. Steel fibers used in concrete structures

تعریف می‌شود یک مقایسه از پاسخ کششی بتن پر مقاومت مسلح شده با الیاف (UHPFRC) در مقایسه با بتن معمولی (NC) و بتن مسلح شده با الیاف (FRC) در شکل ۲ نشان داده شده است [۶].

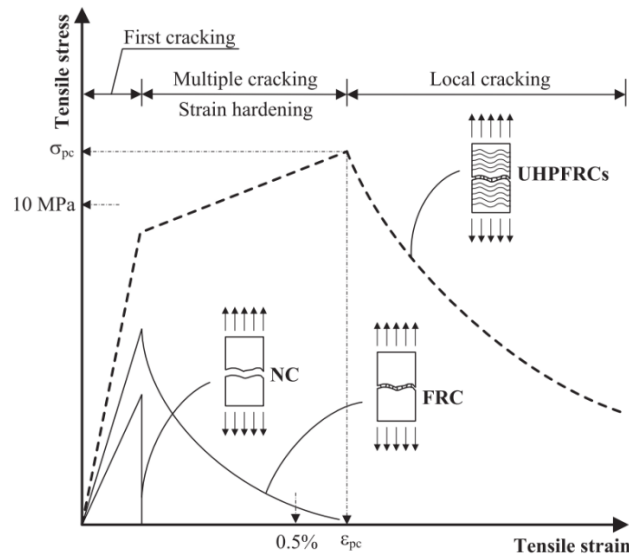
Habel [۸]، Richard و Cheyrezy [۹] و Charron [۱۰] دریافتند که حذف سنگ‌دانه‌های درشت به همراه بهینه‌سازی دانه‌بندی مخلوط در UHPFRC امکان دستیابی به ملات سیمانی همگن و بسیار متراکم را فراهم می‌کند که استحکام فوق‌العاده بالایی را ارائه می‌دهد، (مقاومت فشاری $150 \text{ Mpa} <$ مقاومت کششی $10 \text{ Mpa} <$). با توجه به خصوصیات کششی Rossi [۱۱] دریافت که الیاف در UHPFRC نقش مهمی در رفتار شکل‌پذیر سازه تا شکست خمشی ایفا می‌کند و ظرفیت کرنش کششی نهایی را تا 5×10^{-3} گزارش داده است. Wuest [۱۲] یک مدل meso-mechanical برای پیش‌بینی پاسخ کششی UHPFRC به صورت تابعی از حجم، نسبت ابعاد، توزیع و جهت الیاف و مشخصات مکانیکی ملات ارائه کرده است.

۲-۲- روابط تنش-کرنش

Wille [۱۳] در تحقیق خود نمونه‌های بتن پر مقاومت مسلح با سه نوع مختلف الیاف را تحت آزمایش کشش مستقیم بررسی و با برآزش خطوط مناسب در نمودارهای حاصل از آزمایش، روابط مناسب برای توصیف رفتار این بتن را استخراج کرد. در این تحقیق روابط تنش کرنش براساس کارهای آزمایشگاهی Wille [۱۳] و روابط استخراج شده متناظر آن‌ها می‌باشد.

نتایج آزمایش‌های Wille [۱۳] نشان داد مقاومت متوسط کششی کامپوزیت بسیار وابسته به درصد الیاف می‌باشد:

نقص یا میکرو ترک است [۲]. نقش توزیع الیاف به صورت تصادفی در داخل یک نمونه بتنی، عبور از ترک‌هایی است که باعث شکل‌پذیری بعد از ترک‌خوردگی می‌شوند. استفاده از الیاف فولادی در بتن مسلح در درجه اول باعث بهبود پاسخ کششی و در درجه بعدی باعث کنترل گسترش ترک می‌شود [۳]. مفهوم اصلی استفاده از SFRC^۱ ساده است. بتن در کشش ضعیف است و آرماتورها فقط در راستاهای خاص امتداد دارند، از این رو پاسخ کششی بتن مسلح متداول تنها در راستای آرماتورها بهبود می‌یابد. در بتن الیافی، از سوی دیگر الیاف فولادی به صورت تصادفی و در راستاهای مختلف در بتن پخش می‌شوند. در نتیجه این پخش تصادفی الیاف در داخل نمونه بتنی، در هر راستایی به وسیله الیاف پل‌هایی در راستای عمود بر ترک‌ها ایجاد شود و انتقال تنش را در تمام ترک‌ها بهبود می‌بخشد. همچنین مقاومت برشی و خمشی پس از ترک نیز افزایش می‌یابد [۴]. علاوه بر این، اتصال پل مانند الیاف امکان کنترل بازشدگی ترک‌ها را فراهم کرده و از ایجاد ترک‌های بیشتر جلوگیری می‌کند. این موضوع به نوبه خود باعث کاهش عرض ترک، فاصله ترک و افزایش شکل‌پذیری و ظرفیت جذب انرژی پس از ترک‌خوردگی می‌شود [۵]. اگر الیاف به اندازه کافی قوی باشند و پیوند آن‌ها با بتن به صورت مناسب برقرار باشد، SFRC را قادر می‌سازد فشارهای بیشتری را با توجه به ظرفیت کرنش نسبتاً بزرگ آن در مرحله پس از ترک‌خوردگی تحمل کند. البته روش‌های دیگری (و احتمالاً ارزان‌تر) برای افزایش مقاومت بتن وجود دارد. سهم واقعی الیاف در افزایش مقاومت در واقع به صورت تابعی از سطح زیر نمودار بار-تغییر شکل تحت هر نوع بارگذاری



شکل ۲. پاسخ کششی بتن پر مقاومت مسلح شده با الیاف (UHPFRC) در مقایسه با بتن معمولی (NC) و بتن مسلح شده با الیاف (FRC) [۷].

Fig. 2. Tensile response of UHPFRCs in comparison to normal concrete (NC) and fiber-reinforced concrete (FRC)

۲-۳-۱- مشخصات المانهای مدل

برای مدل سازی بتن در نرم افزار اجزا محدود LS-DYNA از المانهای آجری (مکعبی) استفاده شده است. شکل هندسه ای این المانها از ۸ گره تشکیل شده است. در المانهای آجری روشهای کامل و تقلیل یافته به ترتیب ۸ و یک نقطه ای انتگرال گیری دارند [۱۴]. در این تحقیق از انتگرال گیری کاهش یافته با فرمول بندی constant stress solid element که فرمول بندی شماره یک و حالت پیش فرض در نرم افزار LS DYNA است، استفاده شده است.

برای مدل سازی میلگردها در نرم افزار اجزا محدود LS-DYNA از المانهای یک بعدی Beam استفاده شده است. استحکام خمشی میلگردهای فولادی نادیده گرفته می شود و فرض می شود که آنها فقط نیروهای محوری را منتقل می کنند.

در نرم افزار LS-DYNA نه الگوریتم متفاوت برای پایاسازی مدهای ساعت شنی وجود دارد. با توجه به اینکه نحوه بارگذاری در بیشتر مدل سازی های این تحقیق به صورت چرخه ای می باشد، فرم ۵ سختی فلانگان-بلیتسچکو با روش های سختی و روش انتگرال گیری حجم ثابت استفاده می شود. ضریب فرم برابر با ۰/۰۵ در نظر گرفته شده است.

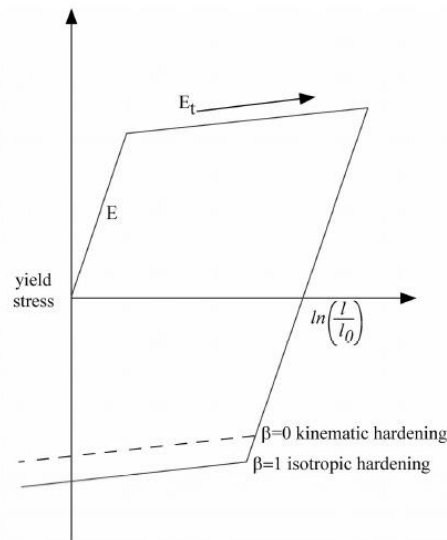
$$\sigma_{pc} = -0.9V_f^2 + 9V_f \quad (1)$$

G_f انرژی شکست است، که به عنوان مقدار کار مورد نیاز برای تولید ترک واحد با دو سطح ترک کاملاً جدا شده تعریف می شود. نتایج آزمایش های Wille [۱۳] نشان داد که G_f عمدتاً تحت تأثیر کسر حجم الیاف است و می تواند با معادله تجربی زیر نشان داده شود:

$$G_f [kJ / m^2] = -1.4V_f^2 + 13V_f \quad (2)$$

۲-۳-۲- معرفی روش مدلسازی عددی بتن UHPFRC

در این تحقیق از نرم افزار اجزا محدود LS-DYNA استفاده شده است. این نرم افزار انجام تحلیل های پیشرفته استاتیکی و دینامیکی با در نظر گرفتن پارامترهای متفاوت را فراهم می کند. کلیدهای مراحل پیش پردازش از جمله مدل سازی و اعمال شرایط آزمایشگاهی و همچنین پس پردازش شامل بررسی مدهای شکست و تحلیل نتایج توسط نرم افزار LS-PrePost انجام می شود. در این تحقیق به دلیل رفتار غیرخطی مدل های موجود از حل گر صریح استفاده شده است.



شکل ۳. رفتار مدل فولاد (MAT_PLASTIC_KINEMATIC) [۱۴]

Fig. 3. Behaviour of steel model (MAT_PLASTIC_KINEMATIC)

۲-۳-۲- مدل فولاد

دو مدل متعارف در نرم افزار LS-DYNA برای شبیه سازی رفتار فولاد گنجانده شده است:

- (PIECEWISE_LINEAR_PLASTICITY (MAT_024
- (MAT_PLASTIC_KINEMATIC (MAT_003

برای مدل سازی فولاد از مدل MAT_PLASTIC_KINEMAT- (IC (MAT_003 استفاده شده است. این مدل یکی از پرکاربردترین مدل های موجود برای شبیه سازی رفتار فولاد می باشد. این مدل رفتار فولاد را به شکل الاستوپلاستیک شبیه سازی کرده و با استفاده از کرنش پلاستیک، شکست فولاد را شبیه سازی می کند. در این مدل امکان اعمال اثر شدت بارگذاری و نرخ کرنش میسر بوده و شبیه سازی رفتار کینماتیک و ایزوتروحداکثر فولاد در آن امکان پذیر است [۱۵]. حداکثر شرط تسلیم در این مدل از رابطه (۳) به دست می آید.

$$\phi = \frac{1}{2} \xi_{ij} \xi_{ij} - \frac{\sigma_y^2}{3} = 0 \quad (3)$$

در رابطه (۳)، پارامترهای موجود از روابط زیر حاصل می گردند:

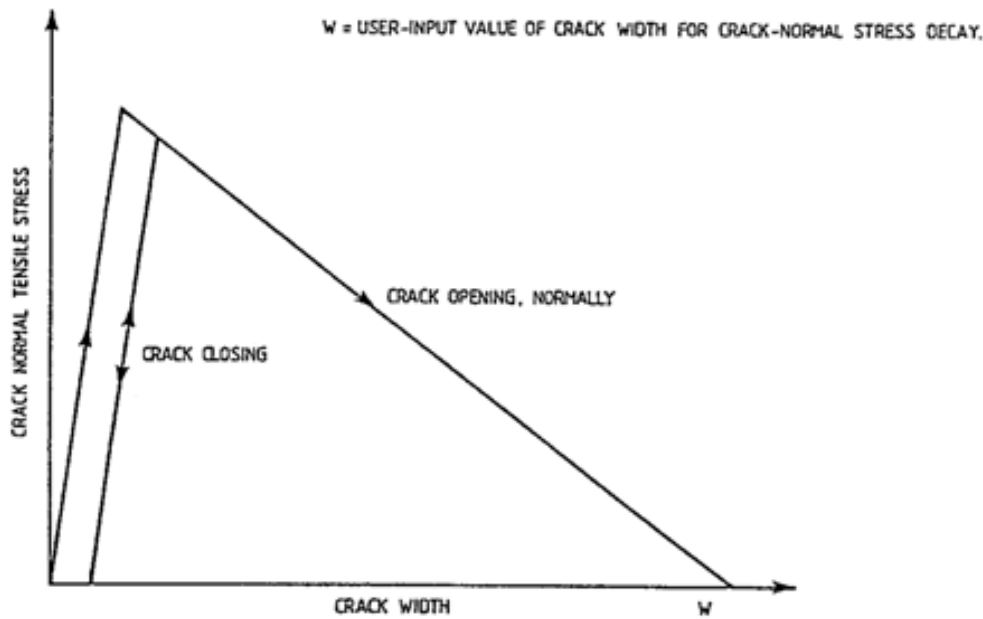
$$\xi_{ij} = s_{ij} - \alpha_{ij} \quad (4)$$

$$\sigma_y = \sigma_0 + \beta E_p \varepsilon_{eff}^p \quad (5)$$

پارامتر رفتار فولاد را بر اساس مقدار در بازه تعیین می کند. با تغییر این پارامتر از صفر تا یک، رفتار فولاد از کینماتیک تا ایزوتروحداکثر تغییر می کند. رفتار کلی این مدل در شکل ۳ به تصویر کشیده شده است. در این شکل، پارامترهای و به ترتیب طول اولیه و تغییر شکل یافته المان در کشش می باشد.

شعاع سطح شکست از رابطه (۵) به دست می آید. به عبارت دیگر، در این مدل شعاع سطح شکست برابر است با مجموع سطح شکست اولیه و مقدار. در این رابطه برابری با مدول سختی پلاستیک و از رابطه (۶) محاسبه می شود.

$$E_p = \frac{E_t E}{E - E_t} \quad (6)$$



شکل ۴. منحنی کاهش تنش کششی عمود بر ترک [۱۶]

Fig. 4. Crack-normal tensile stress decay routes

با مدل ارائه شده در این تحقیق کاملاً همخوانی دارد. تنها نیاز است برای وارد کردن ورودی‌های این مدل از روابط بخش ۲-۲ برای ورودی‌های قسمت کششی استفاده شود. در بخش بعد نحوه وارد کردن این ورودی‌ها و اصلاح این مدل ماده شرح داده می‌شود.

در مدل ماده بتن Winfrith در فشار، به صورت الاستیک-پلاستیک کامل می‌باشد، اما در پاسخ به تنش‌های اصلی کششی می‌تواند حداکثر سه ترک متعامد ایجاد شود. پس از ترک اولیه، تنش در راستای عمود بر ترک مجاز است که به صورت تابعی خطی از توسعه ترک عمودی، کاهش یابد (شکل ۴). نیروی برشی منتقل شده از طریق در هم قفل‌شدگی سنگدانه‌ها در سطح بازشدگی ترک به وسیله کاهش تنش برشی محاسبه شده موازی با ترک مدل می‌شود. این کاهش به صورت تابعی درجه دو براساس اندازه سنگدانه در شکل ۵ نشان داده شده است. هر دو این توابع کاهش تنش‌ها از یک عرض ترک استفاده می‌کنند، که از محصول کرنش عمود بر ترک و یک طول مشخصه براساس ریشه‌ی سوم حجم المان محاسبه می‌شود [۱۶]. بخش پلاستیک مدل بتن Winfrith بر اساس سطح خرابی برش پیشنهاد شده توسط Ottosen به صورت زیر است:

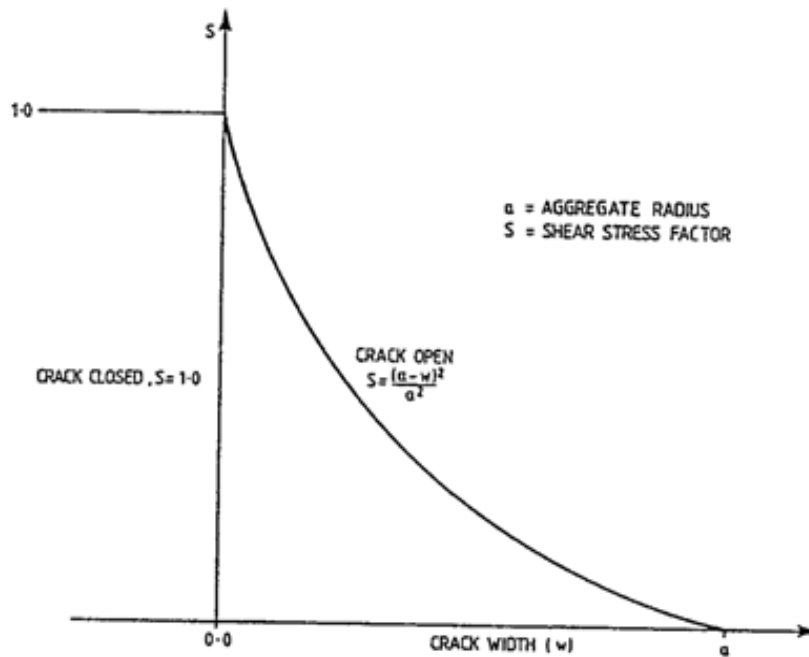
در رابطه فوق، مدول مماسی در قسمت دوم نمودار (شیب ثانویه‌ی نمودار) است که در شکل ۴ به تصویر کشیده شده است. همچنین پارامتر برابر با کرنش موثر پلاستیک بوده و از رابطه‌ی (۷) محاسبه می‌گردد.

$$\varepsilon_{eff}^p = \int_0^t \left(\frac{2}{3} \varepsilon_{ij}^p \varepsilon_{ij}^p \right)^{0.5} dt \quad (7)$$

۲-۳-۳- مدل بتن

در این تحقیق از مدل‌های متفاوتی که در کتابخانه‌ی LS-DYNA برای مدل‌سازی رفتار بتن وجود دارد، از مدل بتنی Winfrith که با نام MAT084 و MAT085 شناخته می‌شود، استفاده شده است. مدل Winfrith یک مدل ترک گسترده است که براساس یک سطح شکست چهار پارامتری ارائه شده توسط Ottosen پایه ریزی شده است. این سطح شکست از نظر ثابت‌های تانسور تنش و در فضای تنش‌های اصلی دارای شکل متمایل به سهموی در محور هیدرواستاتیک است.

مدل ماده بتن Winfrith از نظر سطح شکست و روش مدل‌سازی ترک



شکل ۵. منحنی تغییرات تنش برشی موازی با ترک [۱۶]

Fig. 5. Crack-parallel shear stress decay factor

مدل Winfrith سه ثابت بدون بعد را به صورت زیر معرفی می‌کند:

$$\begin{aligned} \alpha &= 1.16 \\ \beta &= 0.59 \\ \gamma &= -0.61 \end{aligned} \quad (9)$$

از این ثابت‌ها در محاسبه‌ی پارامترهای شکل مردیان استفاده می‌شود:

$$\begin{aligned} b &= \frac{1 + R\alpha \frac{\gamma}{3} - \alpha^2 \frac{\gamma}{3} - \frac{\alpha}{R}}{\alpha^2 \frac{\beta}{3} - 3\alpha - R\alpha \frac{\beta}{3}} \\ a &= \beta b + \gamma \end{aligned} \quad (10)$$

که $R = f_t' / f_c' < 1$ نسبت مقاومت غیرمحصور شده کششی به

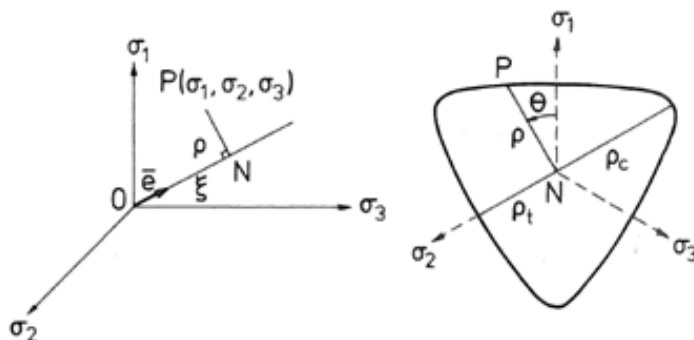
فشاری است [۱۷].

اعمال اثر نرخ کرنش در مدل Winfrith با دستور RATE قابل

$$\begin{aligned} F(I_1, J_2, \cos 3\theta) = \\ a \frac{J_2}{(f_c')^2} + \lambda \frac{\sqrt{J_2}}{f_c'} + b \frac{I_1}{f_c'} - 1 \end{aligned} \quad (8)$$

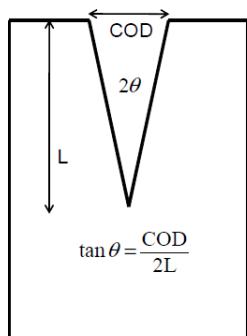
در مدل بتن Winfrith، کاربر اجازه‌ی تعیین پارامترهای a و b را نداشته و مقادیر این پارامترها به صورت داخلی محاسبه می‌شود. پارامترهای a و b تعیین کننده‌ی شکل مریدیان^۱ سطح شکست بوده و مقدار شکل مقطع سطح شکست در صفحه‌ی ۲ را مشخص می‌کند. شکل ۶ رفتار شبیه‌سازی شده‌ی بتن توسط سطح شکست اتوسن را به تصویر می‌کشد. از آنجایی که و در هر خط مریدیان (ثابت) منحنی تسلیم درجه ۲ می‌باشد. بر این اساس، مشابه با رفتار مواد شکننده، مقطع سطح تسلیم در تنش‌های پایین مثلثی و در تنش‌های بالا انحنا خواهد داشت. این موضوع در شکل ۶ به خوبی قابل تشخیص می‌باشد. پارامترهای ، ، و با کمک آزمایشات تک‌محوری فشاری ، تک‌محوری کششی ، دومحوری فشاری و سه محوری به دست می‌آیند .

-
- 1 Meridian
 - 2 Plane



شکل ۶. مدل رفتاری Ottosen [۱۸]

Fig. 6. Ottosen failure criterion



شکل ۷. شکل شماتیک از پارامترهای COD و COA [۱۷]

Fig. 7. Schematic Fig. of COA & COD parameters

عرض ترک که برابر با انرژی شکست G_F است، با استفاده از معادله (۱۱) بدست آورد. مفهوم انرژی شکست به این صورت تعریف می‌شود که در یک ماده شکننده، با افزایش جابجایی باز شدن ترک، طول ترک افزایش می‌یابد و از کار انجام شده در انتشار ترک برای ایجاد سطح ترک جدید استفاده می‌شود، بنابراین مفهوم انرژی شکست در هر سطح توسط G_F بیان می‌شود. از آنجا که بارگذاری‌های استفاده شده در این تحقیق بارگذاری شبه استاتیکی می‌باشد، نیازی به مدل‌سازی رفتار دینامیکی نبوده، بنابراین اثرات نرخ کرنش در مدل‌های اجزای محدود عددی غیرفعال می‌شود.

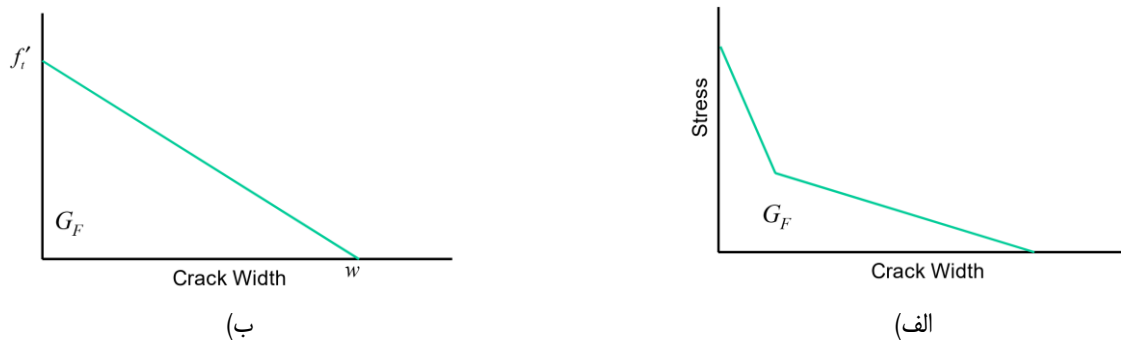
$$w = \frac{2G_F}{f'_t} \quad (11)$$

انجام می‌باشد. مقدار RATE علاوه بر شرایط بارگذاری بر پارامتر FE نیز تاثیرگذار می‌باشد. پارامتر FE در مدل Winfrith تعیین‌کننده‌ی شرایط ترک‌خوردگی بتن در کشش می‌باشد. در حالت RATE=0، پارامتر FE به عنوان مقدار انرژی آزاد شده بر اثر ایجاد ترک (انرژی شکست) تعریف خواهد شد. این مقدار به کمک معیار شکست گریفیت^۱ بر اساس واحدهای نیرو در واحد طول و یا انرژی در واحد سطح تعیین می‌گردد.

در صورتی که پارامتر RATE برابر با ۱ (یا ۲) تعریف شود، پارامتر FE برابر با عرض ترکی که در آن تنش کششی صفر خواهد شد، تعریف می‌گردد. با پخش شدن ترک در یک محیط پیوسته، تغییرمکان در المان ایجاد می‌شود. به این تغییرمکان عموماً با پارامترهای تغییرمکان ترک^۲ یا زاویه‌ی بازشدگی ترک^۳ اشاره می‌شود. مفهوم فیزیکی این پارامترها در شکل ۷ به تصویر کشیده‌است. در مواد شکننده، با افزایش تغییرمکان ترک، طول ترک افزایش یافته و بر اساس مقدار کار انجام شده در انتشار ترک، ترک‌های جدیدتر پدیدار می‌شوند. این موضوع ایده‌ی اصلی انرژی بر واحد سطح در معیار گریفیت می‌باشد.

در مدل بتن Winfrith در صورت نادیده گرفتن اثرات نرخ کرنش، قسمت پس از نقطه حداکثر، المان بتنی تحت کشش به صورت خطی مشابه شکل ۸ ب می‌باشد یا اگر اثرات نرخ کرنش در نظر گرفته شود، قسمت پس از حداکثر به صورت دو خطی شکل ۸ الف است. عرض ترک را می‌توان با در نظر گرفتن مساحت زیر نمودار تنش کششی تک محوری در برابر منحنی

- 1 Griffith Fracture Criterion
- 2 Crack Opening Displacement (COD)
- 3 Crack Opening Angle (COA)



شکل ۸. انواع پاسخ نرم‌شوندگی مدل ماده‌ی Winfrith [۱۷]. الف) پاسخ دو خطی نرم‌شوندگی کرنش با در نظر گرفتن اثرات نرخ کرنش، ب) پاسخ خطی نرم‌شوندگی کرنش بدون نرخ کرنش

Fig. 8. Strain softening responses for Winfrith

Winfrith برای درصد‌های الیاف در محدوده ۱٪ تا ۳٪ معتبر می‌باشد. روابط (۱۲) تا (۱۴) برای هر سه نوع الیاف معرفی شده در این تحقیق که در شکل ۱ قابل مشاهده می‌باشد، قابل استفاده است. سایر پارامترهای ورودی مدل ماده‌ی Winfrith بر اساس مشخصات بتن استفاده شده در آزمایش شامل چگالی جرمی، مدول مماسی، ضریب پواسون، مقاومت فشاری تک محوره و حداکثر قطر سنگدانه وارد می‌شوند.

۳- صحت‌سنجی مدل ارائه شده

۳-۱- صحت‌سنجی تک المان

به منظور صحت‌سنجی مدل ارائه شده، نتایج تست کششی انجام شده توسط Hassan [۱۹] با نتایج تحلیل نرم‌افزار برای یک تک المان مقایسه شد. او در تحقیق خود بتن UHPFRC با ۲٪ الیاف را به صورت نمونه‌هایی بدون شکاف به شکل دمبلی شکل تحت کشش مستقیم آزمایش کرد که در این تحقیق از نتایج آن استفاده شد. برای هر آزمایش کشش، حداقل سه نمونه از مخلوط بتن مورد آزمایش قرار گرفت و مقدار متوسط به عنوان نتایج آزمایش در اینجا ارائه شده است. در جدول ۱ نحوه‌ی اصلاح ورودی‌های مدل ماده‌ی Winfrith قابل مشاهده می‌باشد.

یک تک المان مکعبی به ابعاد $50.8 \times 50.8 \times 50.8$ میلی‌متر مدلسازی سازی شده که جابجایی ۴ گره‌ی المان از زیر در جهت X, Y و Z بسته شد و جابجایی کششی به گره‌های وجه مقابل المان وارد شد. همان‌طور که در شکل ۹ نتایج صحت‌سنجی کشش مشاهده می‌شود، نتایج آنالیز عددی با مدل ارائه شده هم‌خوانی قابل قبولی با نتایج آزمایشگاهی دارد.

۲-۳-۴ اصلاح مدل Winfrith برای مدلسازی بتن UHPFRC
 برای استفاده از مدل ماده‌ی Winfrith برای مدلسازی بتن UHP-FRC با توجه به مدل ارائه شده در بخش قبل، لازم است که قسمت کششی این مدل ماده با استفاده از فرمول‌های ارائه شده اصلاح شود. به این منظور ورودی‌های قسمت کشش مدل ماده‌ی Winfrith باید مجدد توسط کاربر محاسبه شده و به نرم‌افزار داده شود. مقدار ورودی UTS که همان مقاومت کششی تک محوره بتن می‌باشد، با توجه به فرمول‌های ارائه شده در بخش ۲-۲ به صورت زیر محاسبه می‌شود:

$$\sigma_{pc} = -0.9V_f^2 + 9V_f \quad (12)$$

با در نظر گرفتن پارامتر RATE برابر با ۱، مقدار ورودی FE برابر عرض ترک w ، از رابطه زیر براساس انرژی شکست که مقدار آن از روابط بخش ۲-۲ محاسبه می‌شود، بدست می‌آید.

$$G_f [kJ/m^2] = -1.4V_f^2 + 13V_f \quad (13)$$

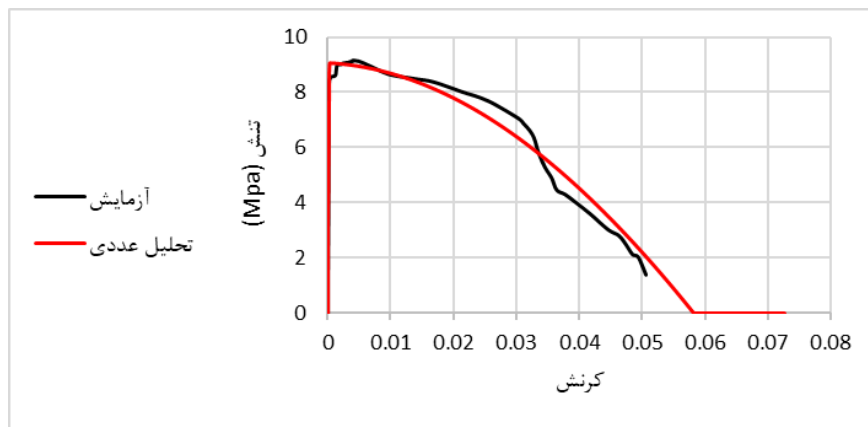
$$w = \frac{2G_f}{f'_t} \quad (14)$$

روابط ارائه شده برای اصلاح ورودی‌های قسمت کشش مدل ماده‌ی

جدول ۱. پارامترهای ورودی Winfrith

Table 1. Input parameters of Winfrith

تعاریف	اندیس	فرمول	مقادیر بتن UHPFRC با ۲٪ الیاف
مدول الاستیسیته	E	بر اساس مشخصات مصالح بتن	۴۵/۵۵(GPa)
مقاومت کششی پس از ترک خوردگی	f'_t	$\sigma_{pc} = -0.9V_f^2 + 9V_f$	۱۴/۴(MPa)
انرژی شکست	G_F	$G_f [kJ / m^2] = -1.4V_f^2 + 13V_f$	۲۰/۴ (kJ / m ²)
عرض ترک	w	$w = \frac{2G_F}{f'_t}$	۴/۵(mm)
مقاومت فشاری	f'_c	بر اساس مشخصات مصالح بتن	۱۵۰/۵۶(MPa)
ضریب پواسون	ν	بر اساس مشخصات مصالح بتن	۰/۲
حداکثر قطر سنگدانه	A	بر اساس مشخصات مصالح بتن	۸(mm)



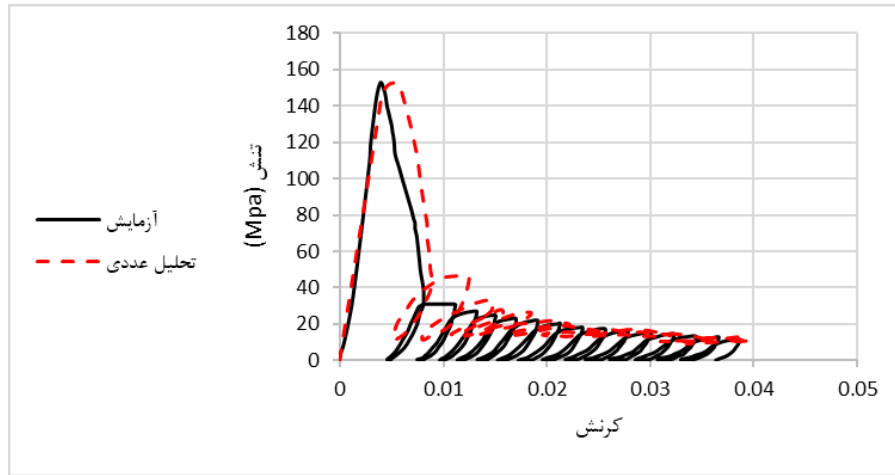
شکل ۹. نتایج صحت‌سنجی کشش

Fig. 9. Tensile validation results

۳-۲- صحت‌سنجی اعضای سازه‌ای

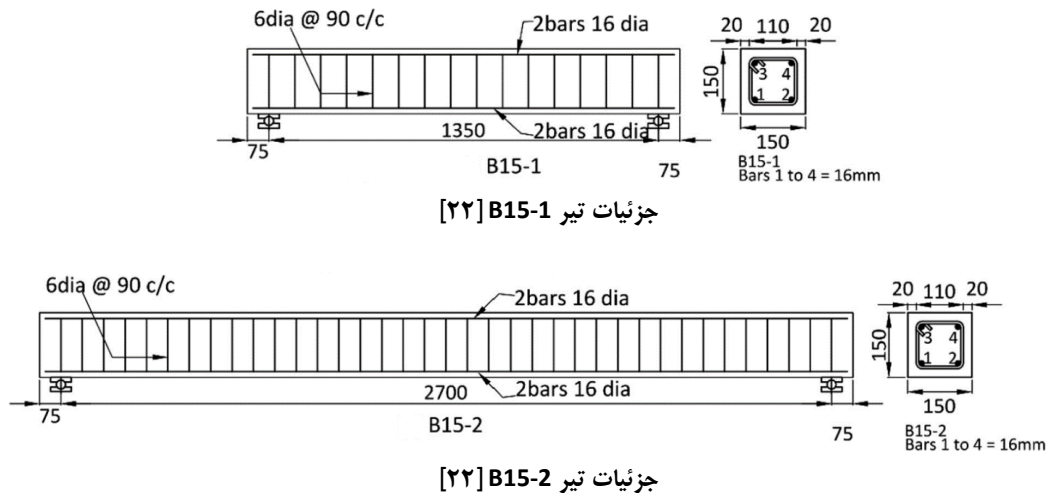
به منظور صحت‌سنجی مدل ارائه شده در سطح اعضای سازه‌ای دو نمونه تیر در مقیاس بزرگ مطابق آزمایش‌های [۲۱] انتخاب شدند. هر دو تیر B15-1 و B15-2 با سطح مقطع یکسان ۱۵۰ mm × ۱۵۰ mm و طول متفاوت ۱۵۰۰ mm و ۲۸۵۰ mm تحت آزمایش خمش سه نقطه و چهار نقطه قرار گرفتند. در هر دو تیر از آرماتورهای طولی با قطر ۱۶ mm خاموت با قطر ۶ mm با فاصله مرکز به مرکز ۹۰ mm استفاده شده است. تیر B15-1 روی دو تکیه‌گاه ساده به فاصله ۱۳۵۰ mm قرار دارد و بار

برای بررسی رفتار مدل ارائه شده تحت بارهای چرخه‌ای، آزمایش فشاری با بار چرخه‌ای برای بتن UHPFRC با الیاف ۲ درصد موجود در ادبیات فنی [۲۰] با روش پیشنهاد شده در این مقاله برای مدلسازی عددی، صحت‌سنجی شد. همان‌طور که در شکل ۱۰ مشاهده می‌شود نتایج آنالیز همخوانی مناسبی با نتایج آزمایش دارد و به دلیل فرض یکپارچه و بدون نقص بودن ملات بتن در مدلسازی عددی میزان تنش پسماند در مدلسازی عددی بیشتر از آزمایش می‌باشد. به علت عدم وجود آزمایش کشش مستقیم با بار چرخه‌ای، این بررسی فقط برای بار چرخه‌ای فشاری انجام شد.



شکل ۱۰. نتایج صحت‌سنجی بار چرخه‌ای

Fig. 10. Cyclic load validation results



شکل ۱۱. جزئیات تیر B15-2 و B15-1 [۲۳]

Fig. 11. Reinforcement detail of B15-1 and B15-2 beam

مدلسازی با توجه به درصد الیاف و سایر مشخصات بتن استفاده شده در آزمایش، در جدول ۳ قابل مشاهده می‌باشد. بر اساس نتایج تحلیل‌های حساسیت سنجی اندازه مش، در هر دو مدل از اندازه مش $۱۲/۷ \times ۱۲/۷ \times ۱۲/۷$ mm استفاده می‌شود. مدلسازی آرماتورهای طولی و عرضی با استفاده از مدل Mat_Plastic_Kine- (matic (Mat_003 در LS-DYNA انجام می‌شود. سختی خمشی میلگردهای فولادی نادیده گرفته می‌شود و فرض می‌شود که آن‌ها فقط نیروهای محوری را منتقل می‌کنند. رابطه تنش-کرنش تک محوری برای

به یک نقطه در وسط تیر وارد می‌شود. تیر B15-2 روی دو تکیه‌گاه ساده به فاصله‌ی ۲۷۰۰ mm قرار دارد و بار به دو نقطه به فاصله ۳۰۰ mm در وسط تیر وارد می‌شود. جزئیات هندسی و آرماتورگذاری نمونه‌های ساخته شده در آزمایشگاه در شکل ۱۱ همچنین جزئیات آزمایش تیرها در جدول ۲ قابل مشاهده می‌باشد. بتن استفاده شده در این آزمایش UHPFRC با طرح اختلاط ارائه شده توسط Sobuz و همکاران [۲۲] که شامل ۲/۲۵ درصد الیاف می‌باشد تهیه شده است. مشخصات مدل ماده Winfrith برای بتن استفاده شده در این

جدول ۲. جزئیات آزمایش تیرها

Table 2. Test beam details

شرایط بارگذاری	طول دهانه تیر (mm)	قطر آرماتور (mm)	سطح مقطع B × D(mm)	نامگذاری تیر
سه نقطه	۱۳۵۰	۱۶-۲	۱۵۰ × ۱۵۰	B15-1
چهار نقطه	۲۷۰۰	۱۶-۲	۱۵۰ × ۱۵۰	B15-2

جدول ۳. پارامترهای ورودی Winfrith برای تیر

Table 3. Input parameters of Winfrith for beam

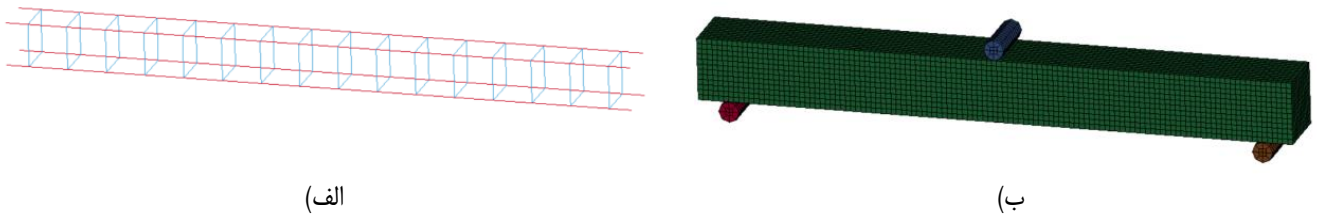
مقادیر	فرمول	اندیس	تعاریف
۵۹۴۸۰ (Mpa)		E_c	مدول الاستیسیته
۱۵/۶ (Mpa)	$\sigma_{pc} = -0.9V_f^2 + 9V_f$	f_t'	مقاومت کششی پس از ترک خوردگی
۲۲/۱۶ (kJ / m^2)	$G_f [kJ / m^2] = -1.4V_f^2 + 13V_f$	G_F	انرژی شکست
۷/۶ (mm)	$w = \frac{2G_F}{f_t'}$	w	عرض ترک
۱۴۴ (Mpa)		f_c'	مقاومت فشاری
۰/۲		ν	ضریب پواسون
۴/۷۵ (mm)		A	حداکثر قطر سنگدانه

شده اند. الگوی ترک خوردگی و کرنش اصلی حداکثر تیرها در شکل ۱۵ مشاهده می شود.

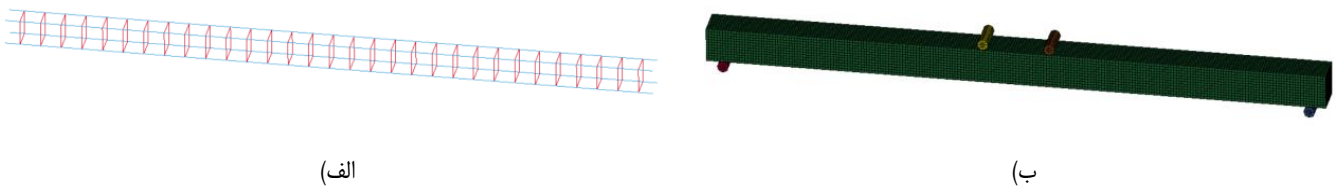
۴- کاربرد بتن UHPFRC در اعضای مرزی دیوارهای برشی

یکی از پرکاربردترین سیستم‌های باربرجانبی در سازه های بتنی، دیواربرشی بتن مسلح می باشد. در چند دهه گذشته، با پیشرفت‌های انجام گرفته در زمینه ترکیب مواد بتنی، بمنظور افزایش مقاومت و سختی جانبی دیوارهای برشی، مصالح بتنی با مقاومت فشاری بالا در نواحی با تقاضای بالا دیوار جایگزین بتن معمولی شده اند. در این تحقیق نیز به بررسی اثرات جایگزین هدفمند UHPFRC در اجزای مرزی دیوار بر عملکرد دیوارها پرداخته شده است. در این بخش از دیوارهای موجود در مقاله عسگرپور [۲۳] استفاده شده است. برای اطلاعات از جزئیات هندسی و مشخصات مصالح این دیوارها می توان به این مقاله مراجعه کرد. با جایگزین نمودن UHPFRC

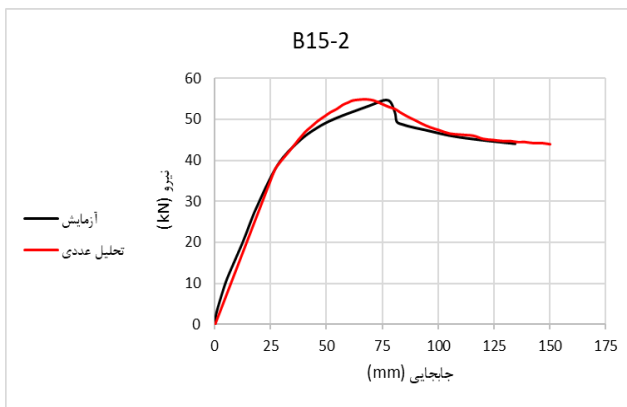
المان‌های فولاد با استفاده از مقاطع Beam یک بعدی با اندازه مش ۱۲/۷ mm در نظر گرفته شده است. گره‌های المان دقیقاً با گره‌های المان مکعبی بتنی هم‌پوشانی دارند و با هم ادغام می‌شوند. در این تحلیل‌ها از لغزش آرماتورها از داخل بتن صرف‌نظر شده و در نتیجه گره های المانهای آرماتور و المانهای بتنی با هم ادغام شده اند. مدل‌های اجزای محدود ساخته شده در LS-DYNA در شکل‌های ۱۲ و ۱۳ قابل مشاهده می‌باشد. بارگذاری به صورت اعمال تغییر مکان از طریق اعضای سیلندری شکل صلب وارد شد. تکیه گاه‌های سیلندری نیز بصورت صلب در نظر گرفته شده اند. تماس بین تیر و سیلندرها به صورت AUTOMATIC_SURFACE_TO_SURFACE اعمال شد. نمودار نیرو-جابجایی تجربی و عددی نمونه‌ها در شکل ۱۴ ارائه شده اند. همان طور که در شکل مشاهده می‌شود نتایج حاصل از تحلیل عددی هم‌خوانی مناسبی با نتایج آزمایش دارند. پارامترهای کلیدی نمودارهای نیرو-جابجایی از جمله سختی اولیه و مقاومت حداکثر در جدول ۴ گزارش



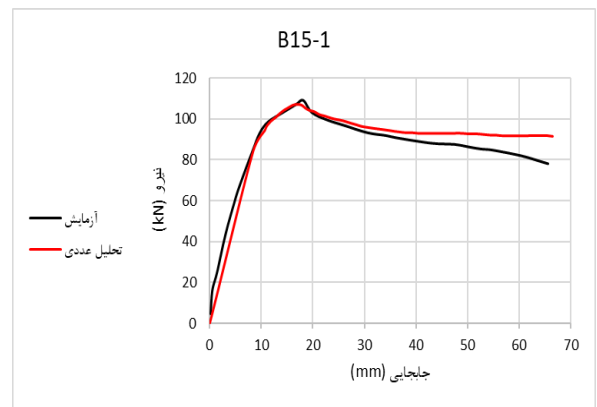
شکل ۱۲. مدل اجرامحدود تیر B15-1
 Fig. 12. FE model of B15-1 beam



شکل ۱۳. مدل اجرامحدود تیر B15-2
 Fig. 13. FE model of B15-2 beam



مقایسه نتایج تحلیل و آزمایش برای تیر B15-2



مقایسه نتایج تحلیل و آزمایش برای تیر B15-1

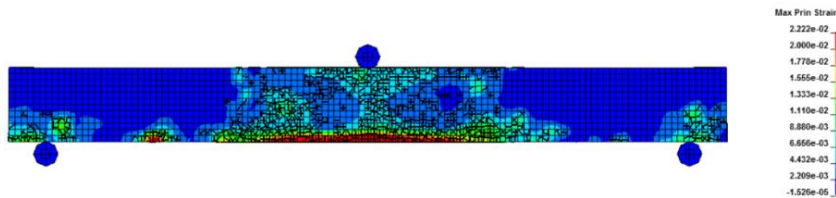
شکل ۱۴. مقایسه نتایج تحلیل و آزمایش برای تیرها

Fig. 14. Comparison of the numerical and experimental results for beams

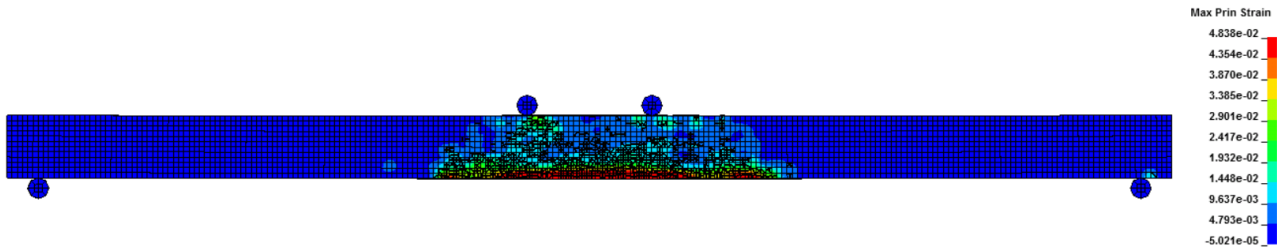
جدول ۴. پارامترهای اصلی نمودار نیرو-جابجایی تیرها

Table 4. The main parameters of the beam force-displacement diagram

حداکثر مقاومت (kN)			سختی اولیه (kN/mm)			نام تیر
نسبت نتایج آزمایش به نتایج تحلیل	آزمایش	LS-DYNA	نسبت نتایج آزمایش به نتایج تحلیل	آزمایش	LS-DYNA	
۱/۰۱	۱۰۹	۱۰۷/۰۵	۱/۳۹	۱۴/۰۲	۱۰/۰۴	B15-1
۰/۹۹	۵۴/۶۰	۵۴/۸۰	۱/۴۴	۲/۰۲	۱/۴۰	B15-2



الگوی ترک خوردگی و کرنش اصلی حداکثر تیر B15-1



الگوی ترک خوردگی و کرنش اصلی حداکثر تیر B15-2

شکل ۱۵. الگوی ترک خوردگی و کرنش اصلی حداکثر تیر B15-2 و B15-1

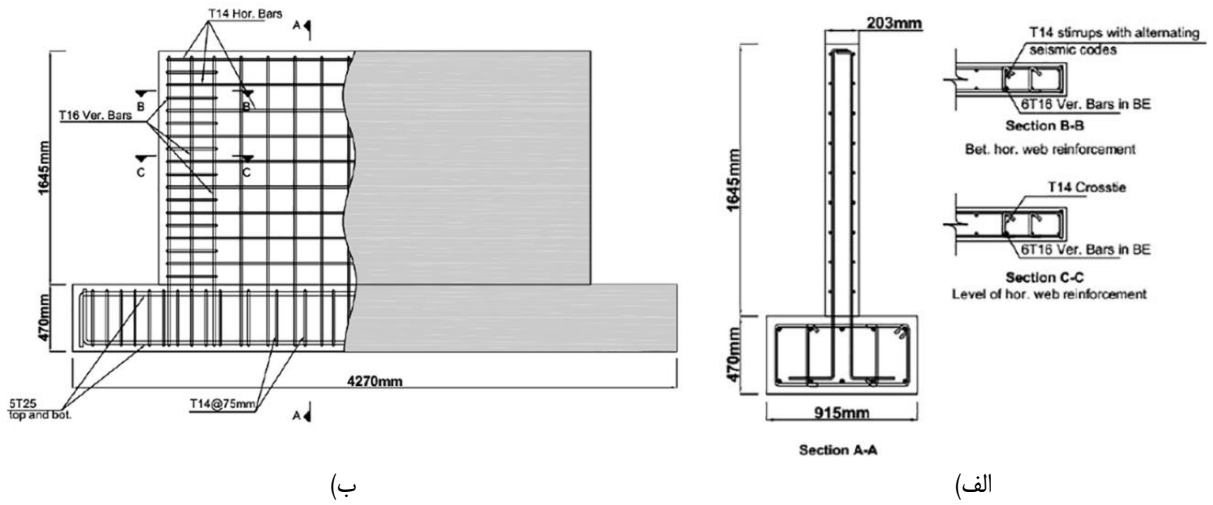
Fig. 15. Cracking pattern and maximum principal strain of beam B15-1 and B15-2

آزمایش شامل درصد آرماتورهای طولی و عرضی در جان و عضو مرزی ($\rho_t^w, \rho_l^w, \rho_t^b, \rho_l^b$) و مقاومت تسلیم و گسیختگی میلگردها (F_y و F_u) در جدول ۵ و جدول ۶ قابل مشاهده می‌باشند. جزئیات دیوار W1 در شکل ۱۶ و دیوار W2 در شکل ۱۷ مشاهده می‌شود. بارهای جانبی به دیوارها از طرفین با استفاده از دو جک با قدرت بالا که به صورت افقی نسبت به محور طولی دیوارها ۹ درجه متمایل شده بودند، اعمال شد. ستاپ آزمایش در شکل ۱۸ قابل مشاهده می‌باشد. دو دیوار W3 و W4 دیوارهای برشی لاغر براساس آزمایش‌های

اجزای مرزی چهار نمونه دیوار برشی عسگریور [۲۳] عملکرد دیوارهای جدید با دیوارهای اولیه مقایسه می‌شود.

۴-۱- معرفی مطالعات آزمایشگاهی

دیوارهای سازه‌ای با نسبت ابعاد کم (نسبت ارتفاع به طول دو یا کمتر) به طور گسترده در سازه‌های هسته‌ای برای مقاومت در برابر بارهای جانبی استفاده می‌شوند. در آزمایش‌های Luna و همکاران [۲۴] طول و ضخامت نمونه‌های آزمایش به ترتیب ۳ متر و ۲۰ سانتیمتر بود. سایر مشخصات

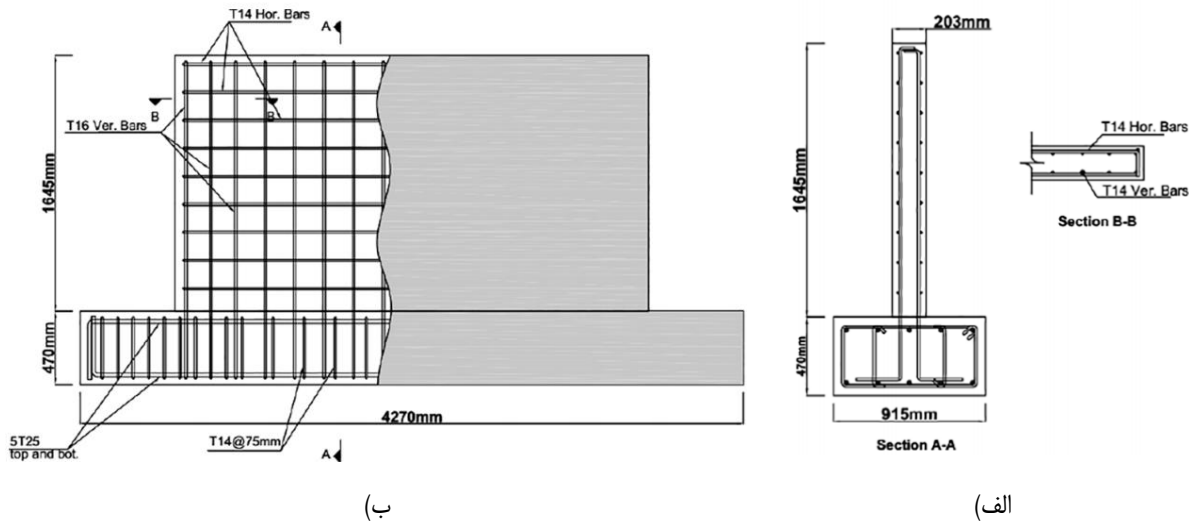


(ب)

(ف)

شکل ۱۶. جزئیات دیوار W1 [۲۴]

Fig. 16. Wall W1 reinforcement detail

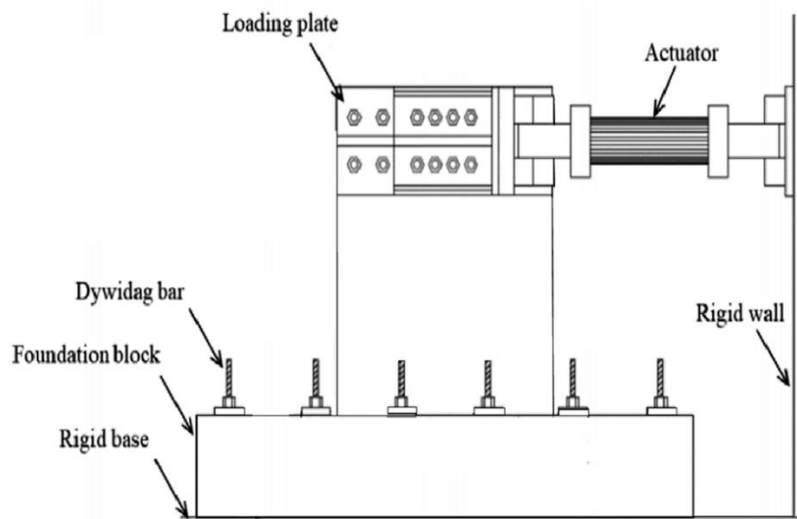


(ب)

(ف)

شکل ۱۷. جزئیات دیوار W2 [۲۴]

Fig. 17. Wall W2 reinforcement detail



شکل ۱۸. جزئیات ستاپ آزمایش برای دیوارهای W1 و W2 [۲۴]

Fig. 18. Test setups for W1 and W2

صفحه بارگذاری و برای دیوارهای W3 و W4 جابجایی به گروهی از گره‌ها در وسط تیر بارگذاری اعمال شد. برای اطلاعات بیشتر می‌توان به مقاله عسگری [۲۳] مراجعه کرد.

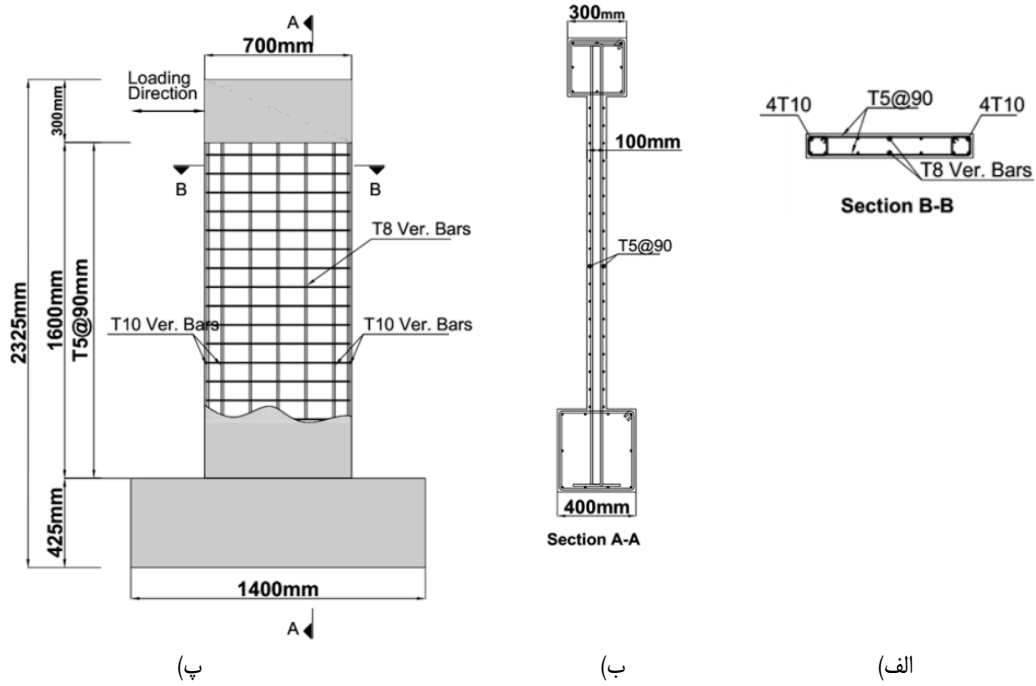
۴-۳- بکارگیری UHPFRC در اجزای مرزی دیوار

در این بخش با تغییر دادن مدل ماده در المان‌های مرزی دیوارهای برشی، اثرات جایگزینی بتن UHPFRC در اجزای مرزی دیوار بر عملکرد دیوارها را بررسی می‌شود. به این منظور در مدلسازی هر یک از دیوارها، المان‌های مرزی دیوار برشی انتخاب و مدل ماده Winfrith جدیدی که با توجه به توضیحات بخش‌های قبل در خصوص اصلاح مدل ماده Winfrith برای مدلسازی UHPFRC بیان شد، تعریف می‌شود. در این بخش از UHPFRC با ۲ درصد الیاف استفاده می‌شود. لازم به ذکر است با توجه به استفاده از دو مصالح بتنی متفاوت در جان و المانهای مرزی دیوار، بتن‌های این دو ناحیه با یکدیگر اتصال مقید نداشته و درمدل عددی بین جان و المانهای مرزی درز سرد در نظر گرفته شده است که در ادامه با جزئیات بیشتر توضیح داده خواهد شد (تعریف قابلیت تماس برای جلوگیری از فرورفتن المانهای این دو ناحیه در فشار). مشخصات ورودی مدل ماده استفاده شده در این مدلسازی با توجه به درصد الیاف و سایر مشخصات بتن، در جدول ۷ قابل مشاهده می‌باشد. مدل‌های اجزای محدود ساخته شده در LS-DYNA در شکل ۲۲ قابل

Hube و همکاران [۲۵] می‌باشند که در این بخش مدلسازی شدند. اگر نسبت ابعاد دیوار (ارتفاع به طول) برابر یا بیشتر از ۳ باشد، دیوار لاغر در نظر گرفته می‌شود. در آزمایش‌های Hube و همکاران [۲۵] دیوارهای با مقیاس $\frac{1}{2}$ با استفاده از یک پروتکل جابجایی جانبی چرخه‌ای با بار متقارن با بار محوری ثابت $0.15f'_cA_g$ ساخته و آزمایش شده است. جزئیات دیوارهای W3 و W4 در شکل‌های ۱۹ و ۲۰ قابل مشاهده می‌باشند.

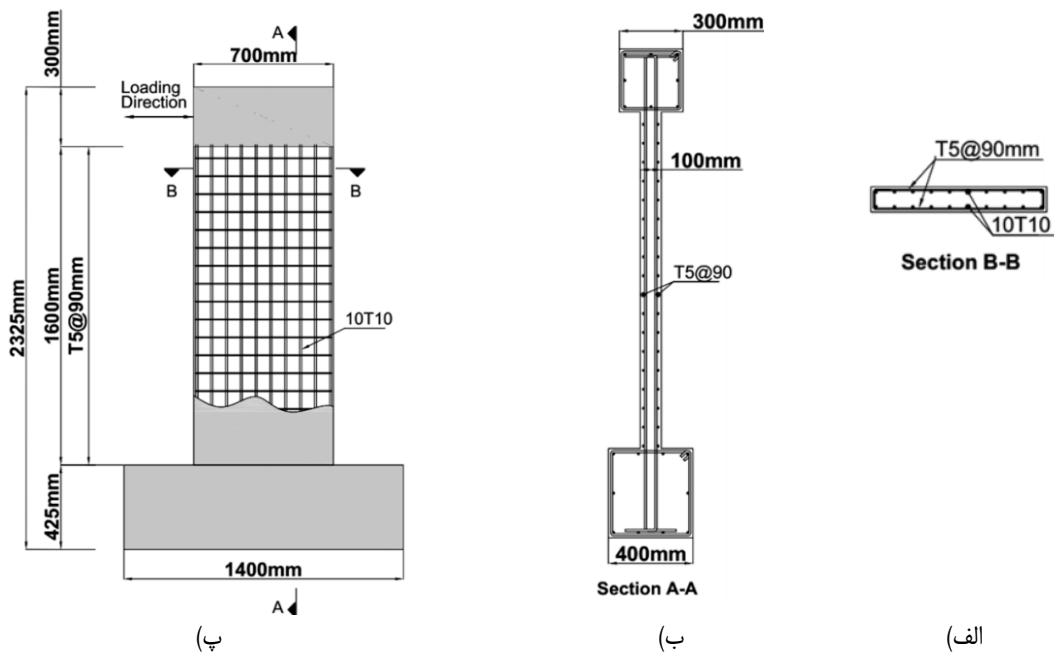
۴-۲- فرضیات کلی مدل عددی دیوارها

روش مدلسازی و نوع المان‌ها در این بخش کاملاً مشابه بخش ۳ در مدلسازی تیرها می‌باشد. بر اساس نتایج حاصل از تحلیل‌های حساسیت سنجی اندازه مش، در همه‌ی مدل‌ها از اندازه مش $25/4 \times 25/4 \times 25/4$ میلی‌متر استفاده شده است. رابطه تنش-کرنش تک محوری برای المان‌های فولاد با استفاده از مقاطع Beam یک بعدی با اندازه مش $25/4$ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. گره‌های المان دقیقاً با گره‌های المان مکعب بتنی هم‌پوشانی دارند و با هم ادغام می‌شوند. در این مدل‌ها نیز از لغزش آرماتور داخل بتن صرف‌نظر شده است. برای اعمال شرایط مرزی دیوارها، گره‌های پایین فونداسیون در تمام جهات بسته شد. بارگذاری به صورت تغییر مکان به یک گروه از گره‌ها براساس پروتکل بارگذاری موجود در آزمایش اعمال شد. برای دیوارهای W1 و W2 جابجایی به گروهی از گره‌ها در وسط



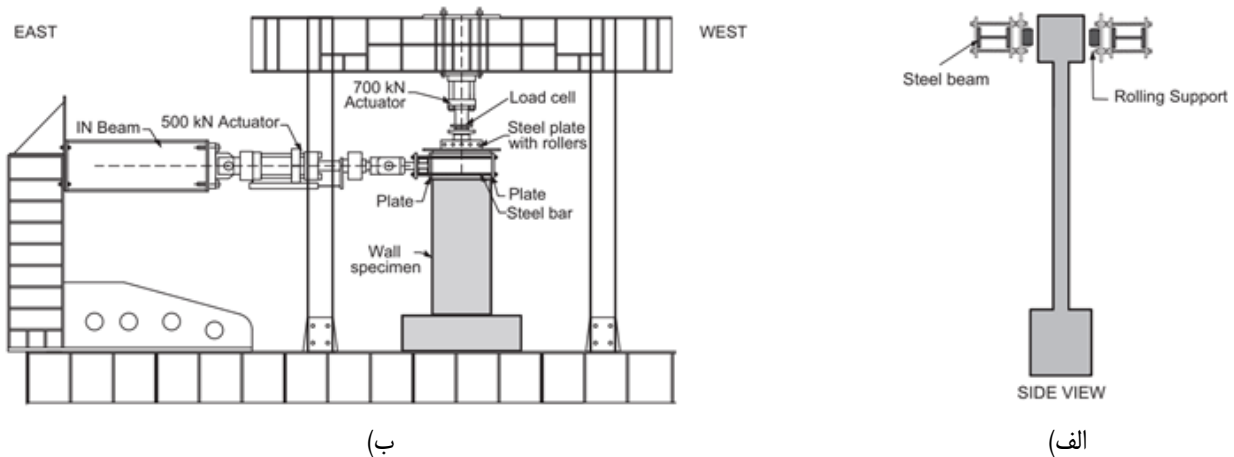
شکل ۱۹. جزئیات دیوار W3 [۲۵]. الف) مقطع عرضی دیوار، ب) مقطع طولی دیوار، پ) نمای از روبروی دیوار

Fig. 19. Wall W3 reinforcement detail



شکل ۲۰. جزئیات دیوار W4 [۲۵]. الف) مقطع عرضی دیوار، ب) مقطع طولی دیوار، پ) نمای از روبروی دیوار

Fig. 20. Wall W4 reinforcement detail



شکل ۲۱. ستاپ آزمایش برای دیوارهای W3 و W4 [۲۵]. الف) نمای از پهلو ستاپ آزمایش، ب) نمای از روبروی ستاپ آزمایش

Fig. 21. Test setups for W3 and W4

جدول ۵. مشخصات نمونه‌های دیوار برشی

Table 5. Properties of the shear wall specimens

محقق	نوع دیوار	نام دیوار	ضخامت دیوار (mm)	ارتفاع دیوار (mm)	طول دیوار (mm)	h/l	حداکثر قطر سنگدانه (mm)	f'_c (Mpa)	$\frac{P}{A_g f'_c}$
Luna et al. [۲۴]	Squat	W1	۲۰۳	۱۶۴۵	۳۰۴۸	۰/۵۴	۱۹	۳۴/۵	۰
Hube et al. [۲۵]	Slender	W3	۱۰۰	۱۶۰۰	۷۰۰	۲/۲۸	۱۳	۲۷/۴	۰/۱۴۵
	Slender	W4	۱۰۰	۱۶۰۰	۷۰۰	۲/۲۸	۱۳	۲۷/۴	۰/۱۴۵

جدول ۶. مشخصات نمونه‌های دیوار برشی

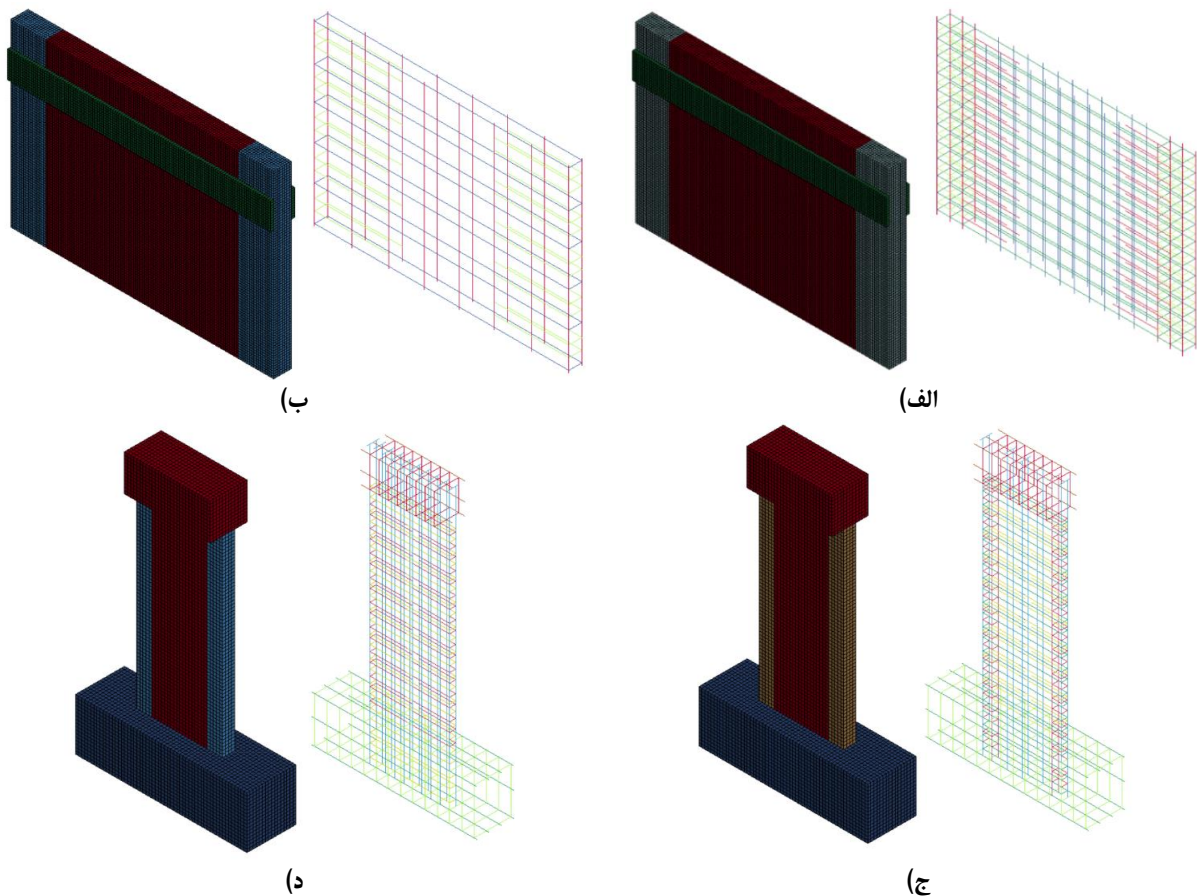
Table 6. Properties of the shear wall specimens

نام دیوار	جان ρ_t^w (%)	عضو مرزی ρ_l^w (%)	میلگرد طولی ρ_l^b (%)	میلگرد عرضی F_y (Mpa)	میلگرد عرضی F_u (Mpa)
W1	۰/۶۷	۰/۶۷	۱/۵	۴۶۲	۷۰۳
W2	۰/۳۳	۰/۳۳	-	۴۶۲	۷۰۳
W3	۰/۶۲	۰/۷۲	۰/۴۵	۴۵۵	۶۲۰
W4	۰/۴۴	۱/۳۴	-	۴۴۵/۴	۵۹۸/۹

جدول ۷. پارامترهای ورودی Winfrith برای مدل‌سازی UHPFRC با ۲ درصد الیاف

Table 7. Input parameters of Winfrith for UHPFRC with 2% fiber volume fraction

مقادیر	فرمول	اندیس	تعاریف
۵۹۴۸۰ (MPa)		E_c	مدول الاستیسیته
۱۴/۴ (MPa)	$\sigma_{pc} = -0.9V_f^2 + 9V_f$	f'_t	مقاومت کششی پس از ترک خوردگی
۲۰/۴ (kJ / m^2)	$G_f [kJ / m^2] = -1.4V_f^2 + 13V_f$	G_F	انرژی شکست
۲/۸۳ (mm)	$w = \frac{2G_F}{f'_t}$	w	عرض ترک
۱۴۴ (Mpa)		f'_c	مقاومت فشاری
۰/۲		ν	ضریب پواسون
۴/۷۵ (mm)		A	حداکثر قطر سنگدانه



شکل ۲۲. مدل اجزای محدود دیوارها. الف) مدل اجزای محدود دیوار برشی WU1، ب) مدل اجزای محدود دیوار برشی WU2، ج) مدل اجزای محدود دیوار برشی WU3، د) مدل اجزای محدود دیوار برشی WU4

Fig. 22. FE models of walls

تا انتهای تحلیل چرخه ای در محدوده‌ی الاستیک باقی بماند. برای پیدا کردن نیروی طراحی آرماتورهای دوخت، نیاز به تحقیق جداگانه‌ای می‌باشد که نیروی افقی بین جان دیوار و اعضای مرزی محاسبه شود و روابطی برای طراحی آرماتورهای دوخت محاسبه شود که خارج از موضوع این پژوهش می‌باشد.

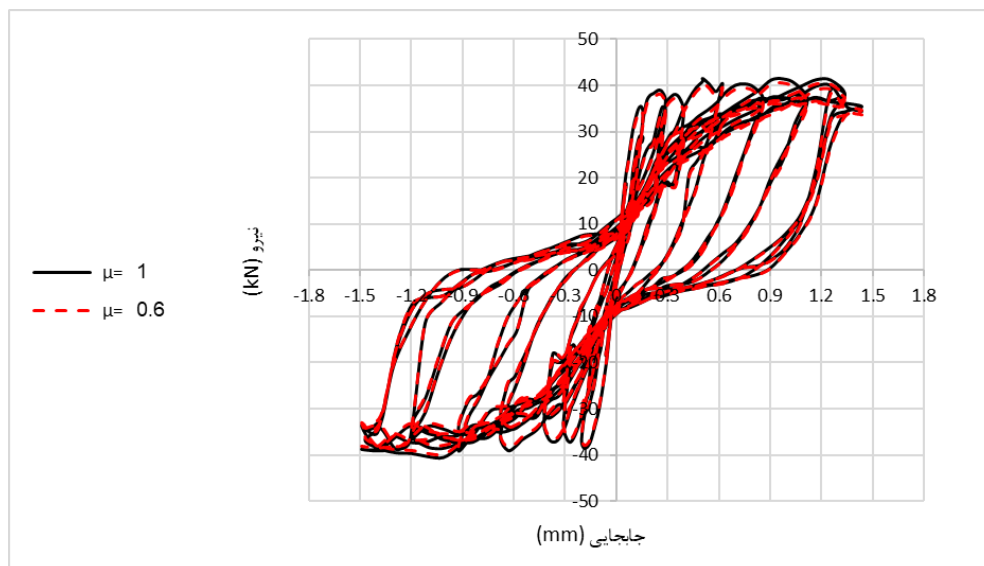
۴-۳-۱- اتصال سرد در دیوارها

بتن UHPFRC در دیوارها فقط در عناصر مرزی در کنار بتن معمولی در جان قرار داده شده است. در عمل، هر چند که آرماتورهای افقی در هر دو عنصر مرزی UHPFRC و بتن معمولی جان پیوسته باشد، بتن ریزی دو بتن متفاوت عملاً منجر به اتصال سرد بین جان و المان مرزی دیوار می‌شود. به منظور در نظر گرفتن تماس اصطکاکی در امتداد عناصر مرزی UHPFRC و بتن معمولی جان مقادیر حد بالا و پایین ضریب اصطکاک، μ (به ترتیب ۱ و ۰/۶)، بر اساس جدول 4.2.22.9 ACI 318-14 [۲۶] تعریف شد. به این منظور گزینه CONTACT-AUTOMATIC-SURFACE-TO-SURFACE که در نرم‌افزار LS-DYNA از روش پنالتی برای جلوگیری از نفوذ گره به سطح اصلی استفاده می‌کند، به کار گرفته شد [۲۷]. نمودارهای نیرو - تغییر مکان برای یکی از دیوارها مطابق شکل ۲۳ نشان داد که رفتار دیوار برای دو حد بالا و پایین ضریب اصطکاک یعنی $\mu = 1$ و $\mu = 0.6$ مشابه می‌باشند.

مشاهده می‌باشد. در مدل‌های اولیه تحلیل شده مشاهده شد که آرماتورهای افقی موجود در دیوار که عملاً عامل اتصال جان و المانهای مرزی دیوار را در کشش فراهم می‌آورند، قابلیت ایجاد اتصال کافی بین جان و اعضای مرزی را نداشته و در سیکلهای اولیه بین جان دیوار و المانهای مرزی جداسازی اتفاق می‌افتاد. همین عامل موجب شد که امکان تحلیل دیوارها برای بارهای چرخه‌ای وجود نداشته و تحلیلها دچار واگرایی می‌شد. برای جلوگیری از این اتفاق و ایجاد اتصال مناسب بین اجزای مرزی و جان دیوار، آرماتورهای دوخت براساس جدول 25.4.2.3 در آیین نامه ACI 318-14 [۲۶] طراحی شدند.

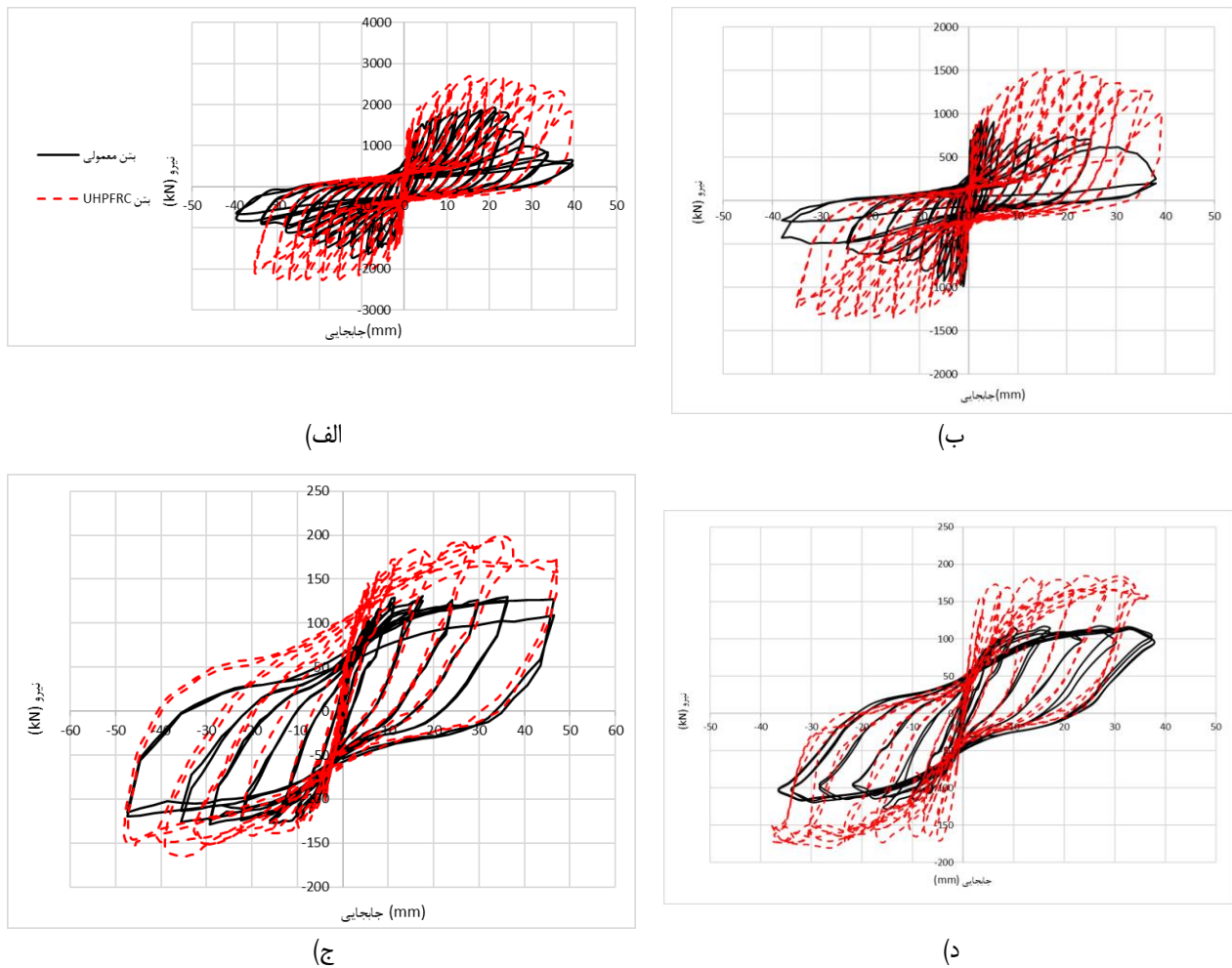
طول آرماتورهای دوخت جان و المانهای مرزی دیوار براساس تامین طول مهارتی این آرماتورها در کشش در هر سمت درز بین دو قسمت دیوار، برای هر دیوار متناسب با مقاومت بتن و فولاد آرماتورهای دیوار محاسبه شده است.

بر اساس نتایج بدست آمده از تحلیلهای عددی، مشاهده شد با در نظر گرفتن فاصله بین آرماتورهای دوخت برابر فاصله آرماتورهای افقی دیوار، اتصال مناسبی بین اعضای مرزی و جان دیوارها ایجاد شده و تا انتهای تحلیل چرخه ای دیوار هیچگونه جدایش و واگرایی در تحلیل برای دیوارها اتفاق نیفتاد. برای محاسبه‌ی دقیق فاصله بین آرماتورهای دوخت در محل درز بین جان و اجزای مرزی دیوارهای برشی، باید مقدار آرماتور دوخت بگونه ای تنظیم شود که رفتار آرماتورهای دوخت و آرماتورهای افقی دیوار



شکل ۲۳. مقایسه نتایج مدل عددی برای حد بالا و پایین ضریب اصطکاک در دیوار w4 با UHPFRC با ۲٪ الیاف

Fig. 23. Comparing the results of the numerical model for the upper and lower limit of the friction coefficient in the wall w4 for UHPFRC with 2% fiber volume fraction



شکل ۲۴. نتایج نیرو-تغییر مکان برای دیوارها. الف) نتایج نیرو-تغییر مکان برای دیوار W1 و W1، ب) نتایج نیرو-تغییر مکان برای دیوار W2 و W2، ج) نتایج نیرو-تغییر مکان برای دیوار W3 و W3، د) نتایج نیرو-تغییر مکان برای دیوار W4 و W4

Fig. 24. Force-displacement results for walls

جانبی حداکثر ۴۱٪ و سختی اولیه به مقدار خیلی زیادی در حدود ۴۰٪ افزایش پیدا کرده و نقاط حداکثر چرخه‌های پس از مقاومت جانبی حداکثر، افت کمتری نسبت به دیوار با بتن معمولی نشان می‌دهد. افت مقاومت پس از نقطه حداکثر در دیوارهای W1 و W2 با استفاده از بتن UHPFRC نسبت به دیوار با بتن معمولی بسیار کمتر می‌باشد. اساساً از آنجاییکه حداکثر جابجایی دیوار برای محاسبات شکل‌پذیری نقطه‌ای است که دیوار ۲۰٪ افت مقاومت نشان بدهد و با توجه به اینکه افت مقاومت در دیوارها با بتن UHPFRC کمتر می‌باشد، رفتار دیوارهای با المان مرزی UHPFRC شامل بتن معمولی

نمودار روابط نیرو-جابجایی نمونه‌های دیوار با بتن معمولی W و همان دیوار با بتن UHPFRC در المان‌های مرزی آن WU در شکل ۲۴ ارائه شده است. پارامترهای کلیدی نمودارهای چرخه‌ای از جمله سختی اولیه و مقاومت حداکثر در

جدول ۸ گزارش شده است. همان طور که در نمودارهای شکل ۲۴ قابل مشاهده می‌باشد، استفاده از بتن UHPFRC در المان‌های مرزی دیوارها باعث افزایش مقاومت جانبی حداکثر و در برخی از دیوارها سختی اولیه شده، همچنین باعث کم شدن کاهش سختی در چرخه‌های بارگذاری می‌شود. در دیوار W1 با استفاده از بتن UHPFRC در المان‌های مرزی مقاومت

جدول ۸. پارامترهای اصلی در نمودار چرخه‌ای

Table 8. Main parameters in hysteresis diagram

نام دیوار	W1	WU1	درصد افزایش	W2	WU2	درصد افزایش
حداکثر مقاومت (kN)	۱۸۸۲	۲۶۶۴	۴۱	۹۵۰	۱۳۰۵	۳۷
سختی اولیه (kN/mm)	۳۲۹	۱۶۵۲	۴۰۱	۵۸۵	۷۹۹	۳۶
نام دیوار	W3	WU3	درصد افزایش	W4	WU4	درصد افزایش
حداکثر مقاومت (kN)	۱۲۸	۱۹۹	۵۲	۱۱۵	۱۸۲	۵۷
سختی اولیه (kN/mm)	۶/۴۶	۲۶/۵۲	۵۵۷	۶/۸	۵۲/۷	۷۷۵

از خود نشان می‌دهد. با توجه به اینکه مقاومت جانبی دیوار با استفاده از بتن UHPFRC افزایش یافته است، سطح زیر نمودار و ظرفیت جذب انرژی دیوار نیز به مقدار قابل توجهی افزایش می‌یابد.

۵- مطالعات پارامتریک برای در نظر گرفتن درصد الیاف و درصد آرماتورهای طولی المان مرزی بر روی رفتار کلی دیوار

پارامترهایی که در این بخش به عنوان متغیرهای اصلی طراحی در نظر گرفته می‌شوند، درصد الیاف و درصد آرماتورهای طولی اعضای مرزی می‌باشد. رفتار چرخه‌ای چهار دیوار با سه درصد مختلف الیاف در بخش اول بررسی می‌شود. در بخش دوم با کم کردن درصد آرماتور اعضای مرزی و استفاده از بتن UHPFRC عملکرد دیوار بررسی می‌شود.

۵-۱- تأثیر درصد الیاف در اعضای مرزی بر رفتار دیوار

در این بخش، رفتار هر چهار دیوار W1، W2، W3 و W4 در نظر گرفتن درصدهای مختلف الیاف در المان مرزی دیوار برابر با ۱/۵٪، ۲٪ و ۳٪ بررسی می‌شود. پارامترهای ورودی مدل ماده Winfrith برای این سه درصد الیاف بر اساس مدل رفتاری ارائه شده در بخش ۲-۳-۴ اصلاح و محاسبه شده است. نمودار روابط نیرو-جابجایی نمونه‌های دیوارها با بتن معمولی و درصد الیاف ۱/۵٪، ۲٪ و ۳٪ در شکل ۲۵ مشاهده می‌شود.

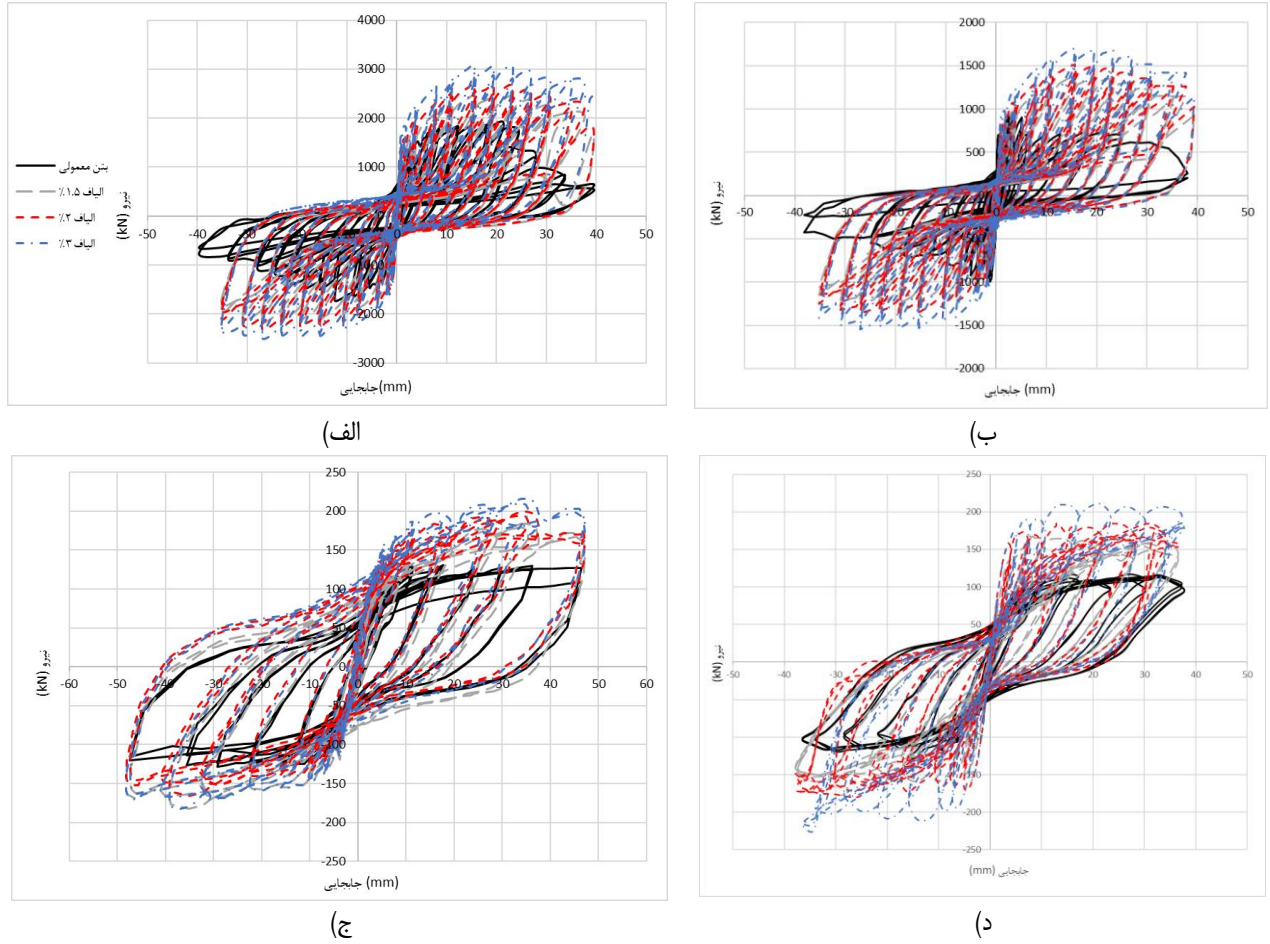
مقادیر حداکثر مقاومت جانبی برای دیوارهای W1، W2، W3 و W4 با سه درصد مختلف الیاف ۱/۵٪، ۲٪ و ۳٪ در شکل ۲۶ نشان داده شده است. استفاده از بتن UHPFRC در اعضای مرزی به دلیل بیشتر بودن مدول الاستیک UHPFRC نسبت به بتن معمولی باعث افزایش سختی اولیه

دیوارها می‌شود. ظرفیت خمشی دیوارها نیز به دلیل بیشتر بودن مقاومت کششی این بتن نسبت به بتن معمولی افزایش می‌یابد. همان طور که در نمودارها مشاهده می‌شود با افزایش درصد الیاف، حداکثر مقاومت جانبی دیوار افزایش یافته و این افزایش در دیوارهای لاغر W3 و W4 نسبت به دیوارهای کوتاه W1 و W2 بیشتر می‌باشد. با توجه به اینکه افزودن الیاف به بتن تأثیر بسزایی در افزایش شکل‌پذیری بتن دارد و در دیوارهای کوتاه نسبت به دیوارهای لاغر، تقاضا برای تغییر شکل پایین‌تر است پس افزودن الیاف، مقاومت جانبی را در دیوارهای لاغر نسبت به دیوارهای کوتاه بیشتر افزایش می‌دهد. درصد افزایش حداکثر مقاومت جانبی برای هر دیوار و با درصدهای الیاف مختلف در شکل ۲۷ نشان داده شده است.

الگوی ترک‌خوردگی و کانتور کرنش اصلی برای دیوار W1 در شکل ۲۸ قابل مشاهده می‌باشند. استفاده از بتن UHPFRC در اعضای مرزی، توسعه ترک‌ها در جان دیوارها را کنترل کرده و تقریباً در اعضای مرزی ترکی دیده نمی‌شود. با افزایش درصد الیاف میزان ترک‌ها و حداکثر کرنش اصلی در جان دیوار نیز کاهش یافته است. همانطور که در شکلها مشخص است، میزان گسترش خرابی در پای دیوار با بتن UHPFRC نسبت به دیوار با بتن معمولی محدودتر می‌باشد و با افزایش درصد الیاف میزان خرابی و المان‌های از بین رفته کمتر شده است.

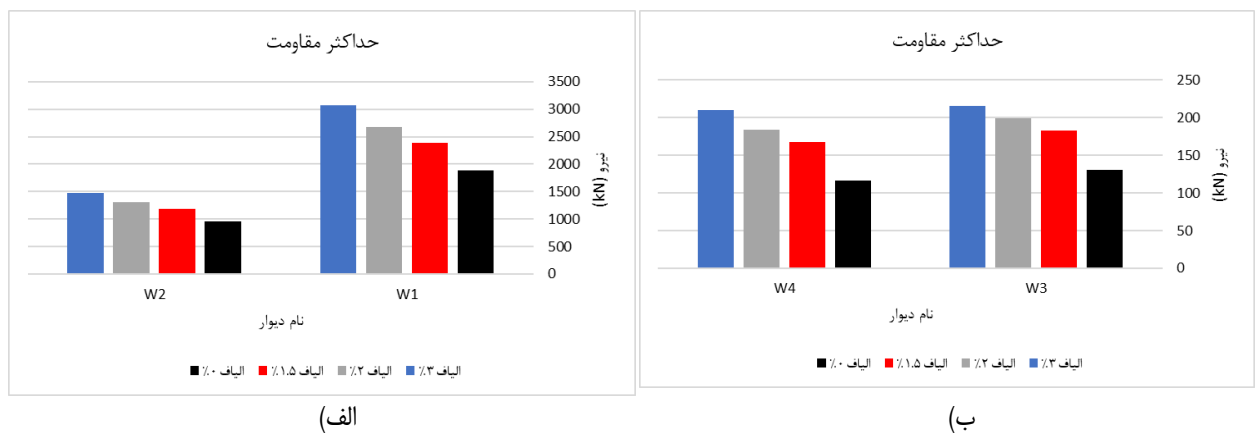
۵-۲- تأثیر درصد آرماتورهای طولی اعضای مرزی

از چهار دیوار استفاده شده در این تحقیق، دو دیوار W1 و W3 دارای عضو مرزی بود. از آنجا که استفاده از بتن UHPFRC در اعضای مرزی ظرفیت خمشی دیوار را افزایش می‌دهد، می‌توان از این افزایش ظرفیت



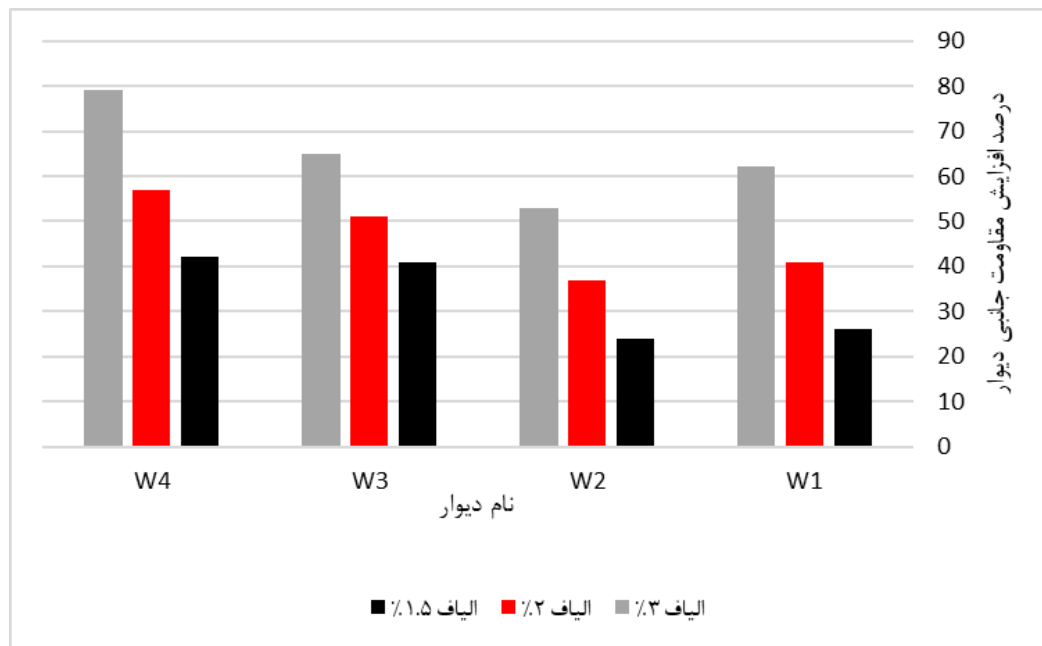
شکل ۲۵. نتایج نیرو-تغییر مکان دیوارها برای درصدهای مختلف الیاف. الف) نتایج نیرو-تغییر مکان برای دیوار W1 و WU1، ب) نتایج نیرو-تغییر مکان برای دیوار W2 و WU2، ج) نتایج نیرو-تغییر مکان برای دیوار W3 و WU3، د) نتایج نیرو-تغییر مکان برای دیوار W4 و WU4

Fig. 25. Force-displacement results for walls with different fiber volume fraction



شکل ۲۶. حداکثر مقاومت دیوارها. الف) حداکثر مقاومت برای دیوارهای W1 و W2، ب) حداکثر مقاومت برای دیوارهای W3 و W4

Fig. 26. maximum lateral strength of walls



شکل ۲۷. درصد افزایش مقاومت جانبی حداکثر با افزایش درصد الیاف

Fig. 27. The increase in maximum lateral strength with the increase in the fiber volume fraction

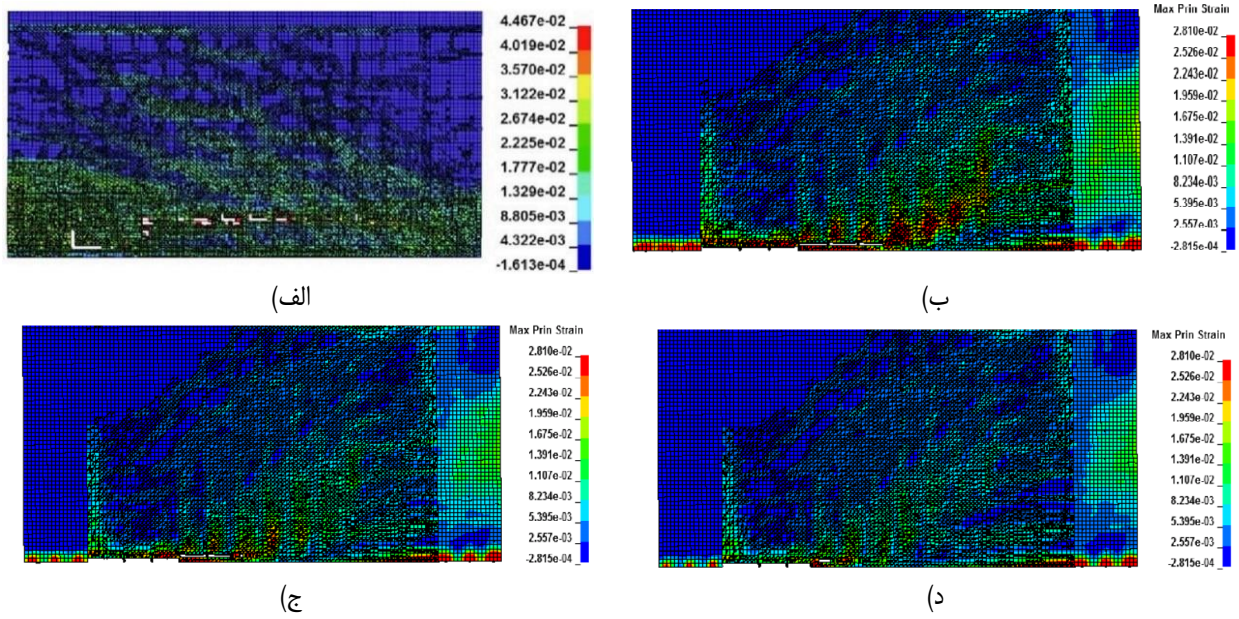
مدل شد در عضو مرزی دارای ۴ آرماتور $10T$ می‌باشد. مدلسازی برای چهار درصد مختلف آرماتور طولی اعضای مرزی انجام شد. به این صورت که در هر مدلسازی یک جفت از آرماتورهای $10T$ با آرماتور $8T$ ، $6T$ و $5T$ تعویض شد. جزئیات این تعویض به صورت شماتیک در شکل الف نشان داده شده است. با جایگزینی آرماتور طولی اعضای مرزی مطابق شکل ۲۹ الف، درصدهای آرماتور طولی اعضای مرزی و حداکثر مقاومت جانبی دیوار متناظر با آن بر حسب kN به ترتیب برابر $2/4$ ، $1/9$ ، 1 ، $0/9$ و 173 ، 159 ، 145 و 142 می‌باشد.

نتایج تحلیل عددی برای دیوار W1 به صورت پوش نمودار چرخه‌ای در شکل ۳۰ الف قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که در نتایج مدلسازی عددی مشاهده می‌شود، حداکثر مقاومت جانبی دیوار W1 با کاهش درصد آرماتور طولی اعضای مرزی کاهش یافته و با توجه به نتایج حداکثر مقاومت جانبی دیوارها در شکل ۳۰ الف، دیوار W1 با درصد آرماتور طولی اعضای مرزی حداکثر مقاومت جانبی مشابه با دیوار با بتن معمولی نشان داد.

نتایج تحلیل عددی برای دیوار W3 به صورت پوش نمودار چرخه‌ای در شکل ۳۰ ب قابل مشاهده می‌باشد. نتایج حداکثر مقاومت جانبی دیوارها در شکل ۳۰ ب نشان داده شده است. همان‌طور که در نمودار مشاهده می‌شود،

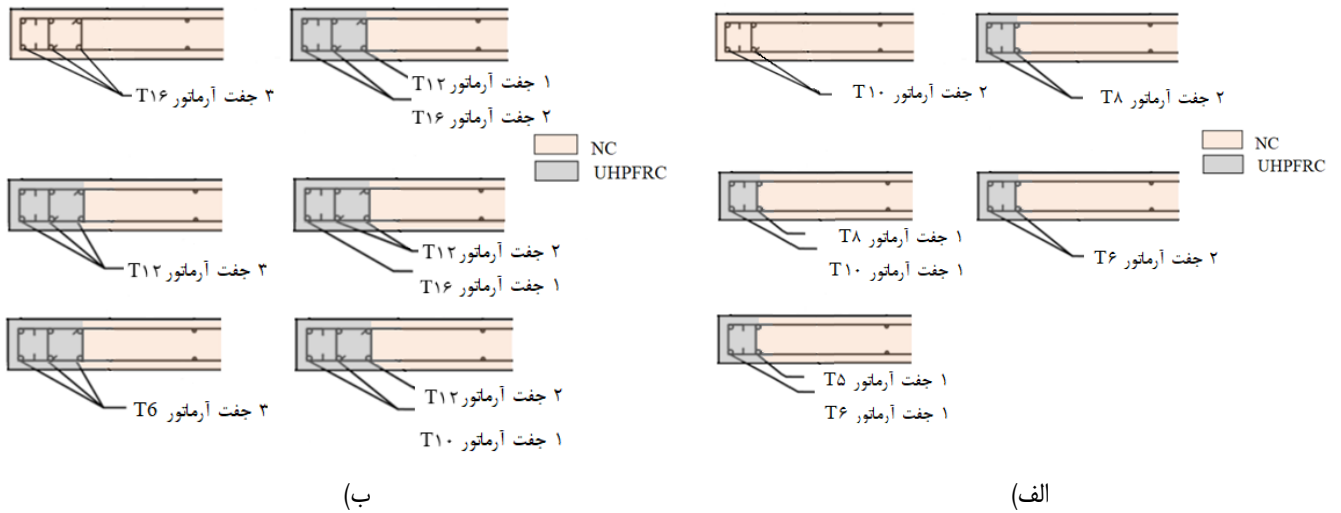
خمشی دیوار برای کاهش درصد آرماتورهای طولی در اعضای مرزی دیوار و در نتیجه ایجاد سهولت در ساخت این دیوار استفاده نمود. در این بخش رفتار این دو دیوار با درصدهای مختلف آرماتور طولی اعضای مرزی بررسی می‌شود تا مشخص شود با چه میزان کاهش در درصد آرماتورهای طولی اجزای مرزی دیوار می‌توان همچنان همان مقاومت دیوار اولیه با بتن معمولی را انتظار داشت.

دیوار W1 که در بخش صحت‌سنجی مدل شد در عضو مرزی دارای ۶ آرماتور $16T$ می‌باشد. مدلسازی برای پنج درصد مختلف آرماتور طولی اعضای مرزی انجام شد. به این صورت که در هر مدلسازی یک جفت از آرماتورهای $16T$ با آرماتور $12T$ و $10T$ تعویض شد. جزئیات این تعویض به صورت شماتیک در شکل ۲۹ ب نشان داده شده است. درصدهای آرماتور طولی اعضای مرزی که به صورت نسبت سطح مقطع آرماتورهای طولی به سطح مقطع ناخالص عضو مرزی محاسبه شده است، برای دیوار W1 با جایگزینی آرماتور طولی اعضای مرزی مطابق شکل ۲۹ ب، درصدهای آرماتور طولی اعضای مرزی و حداکثر مقاومت جانبی دیوار متناظر با آن بر حسب kN به ترتیب برابر $1/4$ ، $1/2$ ، 1 ، $0/9$ ، $0/23$ و 2286 ، 2171 ، 2104 و 1815 می‌باشد. دیوار W3 که در بخش صحت‌سنجی



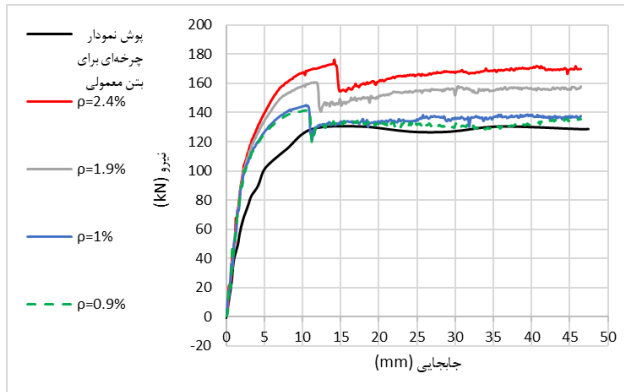
شکل ۲۸. الگوی ترک خوردگی و کانتور کرنش اصلی حداکثر برای دیوار W1 در جابجایی نسبی ۱/۵٪. (الف) دیوار با بتن معمولی، (ب) دیوار با بتن UHPFRC با ایلاف ۱/۵٪، (ج) دیوار با بتن UHPFRC با ایلاف ۲٪، (د) دیوار با بتن UHPFRC با ایلاف ۳٪

Fig. 28. Cracking pattern and maximum principal strain fringe of W1 at 1.5% drift ratio

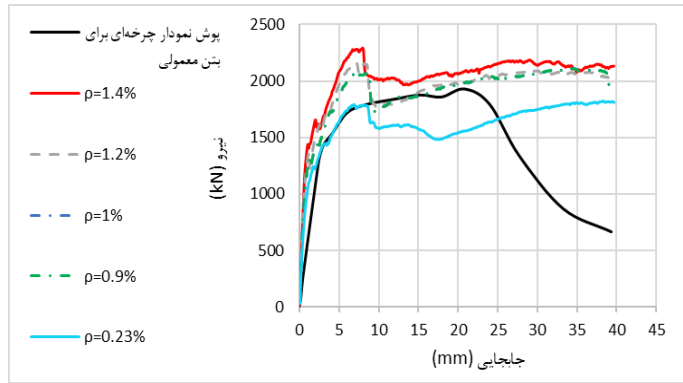


شکل ۲۹. آرماتورهای طولی اعضای مرزی دیوارها در مطالعات پارامتریک. (الف) آرماتورهای طولی اعضای مرزی دیوار W3 استفاده شده در مطالعات پارامتریک، (ب) آرماتورهای طولی اعضای مرزی دیوار W1 استفاده شده در مطالعات پارامتریک

Fig. 29. Boundary element longitudinal reinforcement details used in parametric studies



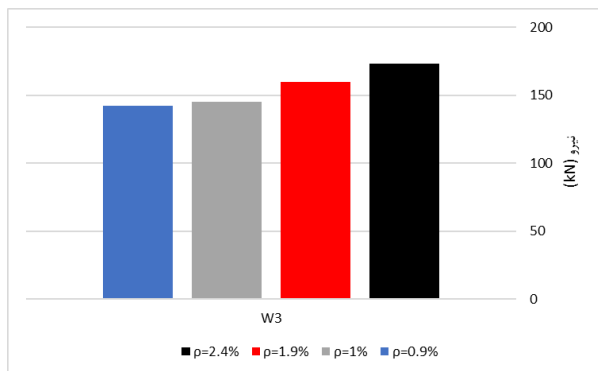
(ب)



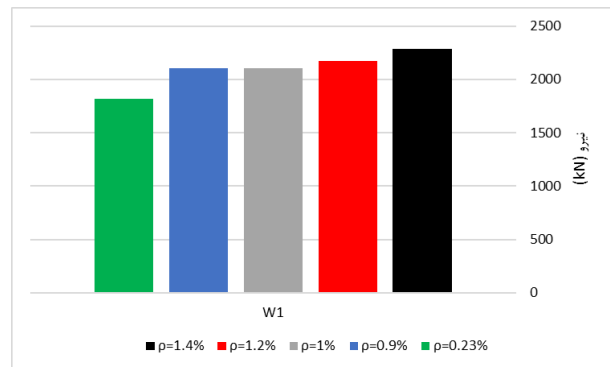
(الف)

شکل ۳۰. منحنی رفتار برای درصدهای مختلف آرماتور طولی اعضای مرزی در دیوارها. (الف) دیوار W1، (ب) دیوار W3

Fig. 30. Pushover curves for different longitudinal reinforcement in walls



(ب)



(الف)

شکل ۳۱. مقاومت جانبی برای درصدهای مختلف آرماتور طولی اعضای مرزی در دیوارها. (الف) مقاومت جانبی برای درصدهای مختلف آرماتور طولی اعضای مرزی در دیوار W1، (ب) مقاومت جانبی برای درصدهای مختلف آرماتور طولی اعضای مرزی در دیوار W3

Fig. 31. Lateral resistance for different longitudinal reinforcement in walls

شد که در دیوار W1 با استفاده از بتن UHPFRC با ۲٪ الیاف در اعضای مرزی برای رسیدن به مقاومت جانبی حداکثر دیوار با بتن معمولی می‌توان درصد آرماتورهای طولی عضو مرزی را از ۱/۶٪ به ۰/۲۳٪ کاهش داد. همچنین در دیوار W3 با استفاده از بتن UHPFRC با ۲٪ الیاف در اعضای مرزی می‌توان با کاهش درصد آرماتورهای طولی عضو مرزی از ۳٪ به ۰/۹٪ به همان مقاومت جانبی دیوار با بتن معمولی رسید. این کاهش در آرماتور

حداکثر مقاومت جانبی دیوار W3 با کاهش درصدهای آرماتور طولی اعضای مرزی کاهش یافته و دیوار با درصد آرماتور طولی اعضای مرزی در جابجایی نسبی نهایی مقاومت جانبی مشابه با دیوار با بتن معمولی نشان داد. بنابراین با کاهش درصدهای آرماتور طولی اعضای مرزی به ۰/۹٪ می‌توان رفتاری مشابه با دیوار با بتن معمولی را انتظار داشت. با توجه به بررسی‌های انجام شده روی دیوارهای W1 و W3 مشخص

ارائه شده صحت‌سنجی شد و مشخص شد این روش برای مدلسازی عددی بتن UHPFRC مناسب می‌باشد.

چهار دیوار برشی موجود در ادبیات فنی انتخاب شد و اثرات بکارگیری بتن UHPFRC در اجزای مرزی دیوار بر عملکرد دیوارهای برشی کوتاه و لاغر بررسی شد. بررسی اثرات اتصال سرد به دلیل بتن‌ریزی دو نوع بتن متفاوت در کنار هم در مدلسازی‌های عددی با بررسی و تعیین ضریب اصطکاک دیده شد و برای جلوگیری از جدا شدگی دو بتن در مرز اتصال، آرماتورهای دوخت طراحی گردید. با مدلسازی‌های عددی انجام شده در این تحقیق نتایج زیر حاصل شد:

- دیوارها به گونه‌ای انتخاب شدند که از دو دیوار برشی کوتاه، دیوار W1 دارای عضو مرزی و دیوار W2 فاقد عضو مرزی است و همچنین از دو دیوار برشی لاغر، دیوار W3 دارای عضو مرزی و دیوار W4 فاقد عضو مرزی است. با بکارگیری UHPFRC در اجزای مرزی این چهار دیوار مشاهده شد صرفه نظر از وجود یا عدم وجود عضو مرزی در دیوار اولیه، استفاده از این بتن تأثیر بسزایی در بهبود عملکرد دیوارهای برشی شامل افزایش مقاومت جانبی حداکثر دیوار و سختی اولیه آن‌ها دارد.

- افزایش مقاومت در دیوارهای برشی لاغر بیشتر از دیوار برشی کوتاه مشاهده شد.

- استفاده از UHPFRC در اجزای مرزی، ترک‌خوردگی دیوارها را کاهش داد و خرابی برای دیوارهای W1، W3 و W4 در پای دیوار و در دیوار W2 در اتصال دو بتن رخ داد.

مطالعات پارامتریک بر روی دو متغیر درصد ییاف و درصد آرماتور

طولی اعضای مرزی انجام شده نشان داد:

- افزایش درصد ییاف استفاده شده در طرح اختلاط بتن UH-PFRC تا ۳٪ منجر به افزایش مقاومت جانبی حداکثر دیوار تا ۷۹٪ شد.

- افزایش درصد ییاف گسترش ترک در دیوار را کاهش داد.

- بکارگیری بتن UHPFRC در اجزای مرزی دیوار به دلیل مقاومت کششی و فشاری بالا و ظرفیت کرنش کششی بالا باعث افزایش ظرفیت خمشی دیوار شد و با کاهش درصد آرماتور طولی اعضای مرزی به مقاومت جانبی دیوار با بتن دست پیدا کرد.

- با استفاده از بتن UHPFRC در اجزای مرزی دیوار که منجر به کاهش در آرماتور مصرفی شد تراکم آرماتورها و وزن سازه کاهش می‌یابد.

مصرفی باعث کم شدن تراکم آرماتورها و کاهش وزن سازه می‌شود. با توجه به اینکه وزن مخصوص بتن UHPFRC برابر ۲۶۲۷ کیلوگرم بر متر مربع می‌باشد و با بتن معمولی تفاوت زیادی ندارند، این میزان از کاهش مصرف آرماتور تأثیر بسزایی در حجم فولاد مصرفی در دیوار برشی و همچنین ایجاد سهولت اجرایی دیوار دارد.

۶- جمع‌بندی و نتیجه‌گیری

از آنجا که بتن به‌عنوان یک ماده ترد، با مقاومت کششی و ظرفیت کرنشی پایین شناخته می‌شود، به ویژه در سیستم‌های باربر جانبی و تحت بارهای چرخه‌ای و رفت و برگشتی که بارهای فشاری و کششی در هر قسمت عضو به یک اندازه محتمل هست و همچنین باز و بسته شدن ترک‌ها بیشتر انتظار می‌رود، استفاده از بتن UHPFRC که نسبت به بتن معمولی مقاومت کششی و کنترل ترک بهتری دارد عملکرد عضو را بهبود می‌بخشد. با توجه به اینکه تفاوت عمده بتن UHPFRC و بتن معمولی در بخش کشش می‌باشد و در بخش فشار، خرابی مانند بتن معمولی در اثر خردشدگی اتفاق می‌افتد بنابراین مدل ماده‌های موجود برای مدلسازی بتن معمولی کاملاً قادر به مدلسازی رفتار فشاری بتن UHPFRC می‌باشند. تفاوت رفتار کششی بتن UHPFRC و بتن معمولی را می‌توان در افزایش مقاومت کششی، کاهش ترک‌خوردگی، افزایش جذب انرژی و انرژی شکست خلاصه کرد. توزیع ییاف به‌صورت تصادفی در بتن پرمقاومت در درجه اول باعث بهبود پاسخ کششی و در درجه بعدی باعث کنترل ترک می‌شود. به‌وسیله ییاف پلهایی درون ترک‌ها ایجاد شود و امکان مقاومت کششی پس از ترک‌خوردگی را ایجاد می‌کند و از تبدیل میکرو ترک‌ها به ترک‌های بزرگ جلوگیری می‌کند.

در این تحقیق با استفاده از نرم افزار LS-DYNA و مدل ماده Winfrith که به روش ترک گسترده و با سطح خرابی Ottosen کار می‌کنند پیشنهادی برای اصلاح این مدل ماده بمنظور شبیه سازی رفتار بتن UHPFRC ارائه شد. با توجه به دو تفاوت کلیدی رفتار کششی بتن UHPFRC، با تغییر در دو پارامتر ورودی مدل ماده Winfrith شامل مقاومت کششی و حداکثر عرض ترک که پارامتر وابسته به انرژی شکست می‌باشد، این مدل ماده قادر به مدلسازی بتن UHPFRC خواهد بود. به این ترتیب مقاومت زیاد بتن UHPFRC پس از ترک‌خوردگی و انرژی شکست بالای این بتن، به مدل ماده Winfrith اعمال شد. با مشخص کردن تکنیکی مناسب برای مدلسازی عددی بتن UHPFRC، نتایج آزمایشات دو تیر با مدل عددی

- the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete, Kassel, Germany, 2008, pp. 153.
- [13] K. Wille, S. El-Tawil, A.E. Naaman, Properties of strain hardening ultra high performance fiber reinforced concrete (UHP-FRC) under direct tensile loading, *Cement and Concrete Composites*, 48 (2014) 53-66.
- [14] J.O. Hallquist, LS-DYNA keyword user's manual, Livermore Software Technology Corporation, 970 (2007) 299-800.
- [15] K. Bi, H. Hao, Numerical simulation of pounding damage to bridge structures under spatially varying ground motions, *Engineering Structures*, 46 (2013) 62-76.
- [16] B. Broadhouse, A. Neilson, Modelling reinforced concrete structures in DYNA3D, UKAEA Atomic Energy Establishment, 1987.
- [17] L. Schwer, The Winfrith concrete model: Beauty or beast? Insights into the Winfrith concrete model, in: 8th European LS-DYNA users conference, 2011, pp. 23-24.
- [18] N.S. Ottosen, A failure criterion for concrete, *Journal of the Engineering Mechanics Division*, 103(4) (1977) 527-535.
- [19] A. Hassan, S. Jones, G. Mahmud, Experimental test methods to determine the uniaxial tensile and compressive behaviour of ultra high performance fibre reinforced concrete (UHPFRC), *Construction and building materials*, 37 (2012) 874-882.
- [20] P.A. Krahl, G.d.M.S. Gidrão, R. Carrazedo, Cyclic behavior of UHPFRC under compression, *Cement and Concrete Composites*, 104 (2019) 103363.
- [21] M. Singh, A. Sheikh, M.M. Ali, P. Visintin, M. Griffith, Experimental and numerical study of the flexural behaviour of ultra-high performance fibre reinforced concrete beams, *Construction and Building Materials*, 138 (2017) 12-25.
- [22] H. Sobuz, P. Visintin, M.M. Ali, M. Singh, M. Griffith, A. Sheikh, Manufacturing ultra-high performance concrete utilising conventional materials and production methods, *Construction and Building materials*, 111 (2016) 251-261.
- [1] H. Marzouk, Z. Chen, Fracture energy and tension properties of high-strength concrete, *Journal of Materials in Civil Engineering*, 7(2) (1995) 108-116.
- [2] M.F.M. Zain, H. Mahmud, A. Ilham, M. Faizal, Prediction of splitting tensile strength of high-performance concrete, *Cement and Concrete Research*, 32(8) (2002) 1251-1258.
- [3] S.P. Shah, B.V. Rangan, Fiber reinforced concrete properties, in: *Journal Proceedings*, 1971, pp. 126-137.
- [4] J. Susetyo, P. Gauvreau, F.J. Vecchio, Effectiveness of Steel Fiber as Minimum Shear Reinforcement, *ACI Structural Journal*, 108(4) (2011).
- [5] M. Grzybowski, S.P. Shah, Shrinkage cracking of fiber reinforced concrete, *Materials journal*, 87(2) (1990) 138-148.
- [6] A.A. Shah, Y. Ribakov, Recent trends in steel fibered high-strength concrete, *Materials & Design*, 32(8-9) (2011) 4122-4151.
- [7] N.T. Tran, T.K. Tran, D.J. Kim, High rate response of ultra-high-performance fiber-reinforced concretes under direct tension, *Cement and Concrete Research*, 69 (2015) 72-87.
- [8] K. Habel, M. Viviani, E. Denarié, E. Brühwiler, Development of the mechanical properties of an ultra-high performance fiber reinforced concrete (UHPFRC), *Cement and Concrete Research*, 36(7) (2006) 1362-1370.
- [9] P. Richard, M. Cheyrezy, Composition of reactive powder concretes, *Cement and concrete research*, 25(7) (1995) 1501-1511.
- [10] J. Charron, E. Denarié, E. Brühwiler, Permeability of UHPFRC under high stresses, *Proc., Advances in Concrete Through Science and Engineering*, (CD-ROM), RILEM, Evanston, IL, (2004).
- [11] P. Rossi, A. Arca, E. Parant, P. Fakhri, Bending and compressive behaviours of a new cement composite, *Cement and Concrete Research*, 35(1) (2005) 27-33.
- [12] J. Wuest, E. Brühwiler, D.C.E. ETH, Model for predicting the UHPFRC tensile hardening, in: *Ultra High Performance Concrete (UHPC): Proceedings of*

- [25] M. Hube, A. Marihuén, J.C. de la Llera, B. Stojadinovic, Seismic behavior of slender reinforced concrete walls, *Engineering Structures*, 80 (2014) 377-388.
- [26] A. Committee, Building code requirements for structural concrete (ACI 318-08) and commentary, in, American Concrete Institute, 2008.
- [27] L. Ls-Dyna, Keyword user's manual, Livermore Software Technology Corporation, 598 (2007) 599.
- [23] M. Asgarpoor, A. Gharavi, S. Epackachi, Investigation of various concrete materials to simulate seismic response of RC structures, in: *Structures*, Elsevier, 2021, pp. 1322-1351.
- [24] B.N. Luna, J.P. Rivera, J.F. Rocks, C. Goksu, A.S. Whittaker, Seismic performance of low aspect ratio reinforced concrete shear walls, in: *Proceedings of the 22nd International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology*, 2013.

چگونه به این مقاله ارجاع دهیم

Z. Nouri, S. Epackachi, Numerical study on Ultra High-Performance Fiber Reinforced concrete for application in shear walls with boundary elements, *Amirkabir J. Civil Eng.*, 56(11) (2025) 1453-1484.

DOI: [10.22060/ceej.2024.23076.8101](https://doi.org/10.22060/ceej.2024.23076.8101)



