

مدل سازی اجزا محدود پانل های آجرکار تقویت شده با رویه بتن الیافی تحت بارگذاری درون صفحه

محمدامیر نجفقلی پور حقیقی^{۱*}، سیدمهدی دهقان^۲، علیرضا کامروا^۳

۱- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۲- استادیار، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد گرایش زلزله، دانشکده مهندسی عمران و محیط زیست، دانشگاه صنعتی شیراز، شیراز، ایران

چکیده

امروزه تحقیقات گسترده ای بر روی رفتار لرزه ای دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح و روش های متنوع مقاوم سازی آنها توسط محققین مختلف در حال انجام است. اکثر روش های پیشنهادی برای تقویت دیوارهای مصالح بنایی استفاده از یک رویه خارجی می باشد. اخیراً استفاده از رویه بتنی الیافی به عنوان روشی برای تقویت دیوارهای مصالح بنایی موجود در قالب تحقیقات عمدتاً آزمایشگاهی ارزیابی شده است. از این رو در این تحقیق یک مدل اجزا محدود میکرو برای دیوارهای مصالح بنایی تقویت شده توسط رویه بتن الیافی تحت تلاش های درون صفحه در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS ارائه شده است. برای مدل سازی آجر و ملات نیز از مدل آسیب خمیری بتن استفاده شده است. بدین ترتیب ابتدا مدل عددی پیشنهاد شده برای دیوارهای مصالح بنایی تحت نیروهای درون صفحه شرح داده شده و روش مذکور با استفاده از مدل سازی پانل های مصالح بنایی تقویت شده با رویه بتنی الیافی مسلح شده با الیاف فولادی که قبلاً در قالب یک تحقیق آزمایشگاهی ارزیابی شده اند، راست آزمایی شده است. مقایسه نتایج حاصل از تحلیل های انجام شده با نتایج حاصل از آزمایش ها نشان از دقت قابل قبول روش مدل سازی پیشنهادی دارد. در ادامه با استفاده از روش مدل سازی پیشنهادی، اثر برخی پارامترها از جمله ضخامت رویه، میزان الیاف در بتن الیافی و وجه تقویت شده پانل بر مقاومت و رفتار درون صفحه پانل های تقویت شده مورد ارزیابی قرار گرفته است.

کلمات کلیدی: دیوارهای مصالح بنایی، برش درون صفحه، مقاوم سازی لرزه ای، بتن الیافی، مدل اجزا محدود

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	10.22065/JSCE.2017.86049.1180	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	http://dx.doi.org/10.22065/JSCE.2017.86049.1180	۱۳۹۷/۵/۳۰	۱۳۹۶/۴/۱۷	۱۳۹۶/۴/۱۷	۱۳۹۶/۳/۳۰	۱۳۹۶/۲/۲۵
محمدامیر نجفقلی پور حقیقی					*نویسنده مسئول:	
najafgholipour@sutech.ac.ir					پست الکترونیکی:	

Finite Element Modeling of Brickwork Panels Strengthened with Fiber Reinforced Concrete layer

M. A. Najafgholipour^{1*}, S.M. Dehghan², A.R. Kamrava³

1- Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

2- Assistant Professor, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

3- M.Sc. Student, Department of Civil and Environmental Engineering, Shiraz University of Technology, Shiraz, Iran

ABSTRACT

Several researches have been carried out on seismic behavior and retrofitting of unreinforced masonry (URM) walls. Using an external retrofitting surface layer is the most popular strengthening technique for URM walls. Recently, using fiber reinforced concrete (FRC) overlay as a strengthening technique for URM walls is evaluated through a series of experimental studies. Therefore, in this paper finite element modeling of URM walls strengthened with FRC layer under in-plane actions is considered through a micro modeling approach in finite element software ABAQUS. Concrete Damage Plasticity Model is used for modeling of brick unites and mortar joints. In this article the finite element modeling of the retrofitted walls is explained and is verified with results of a previous experimental study. Results obtained from analyzes show that the finite element model can simulate the in-plane behavior of strengthened URM walls well. In addition, a parametric study is performed and the influence of some parameters such as FRC surface layer thickness, fiber content and retrofitted face of the panel on the in-plane capacity of the strengthened masonry panels is evaluated. Analysis results show that the FRC overlay thickness has considerable effects on the in-plane strength of retrofitted URM walls.

ARTICLE INFO

Received: 15/05/2017

Revised: 23/06/2017

Accepted: 8/06/2017

Keywords:

Unreinforced masonry walls

In-plane shear

Seismic retrofitting

Fiber reinforced concrete

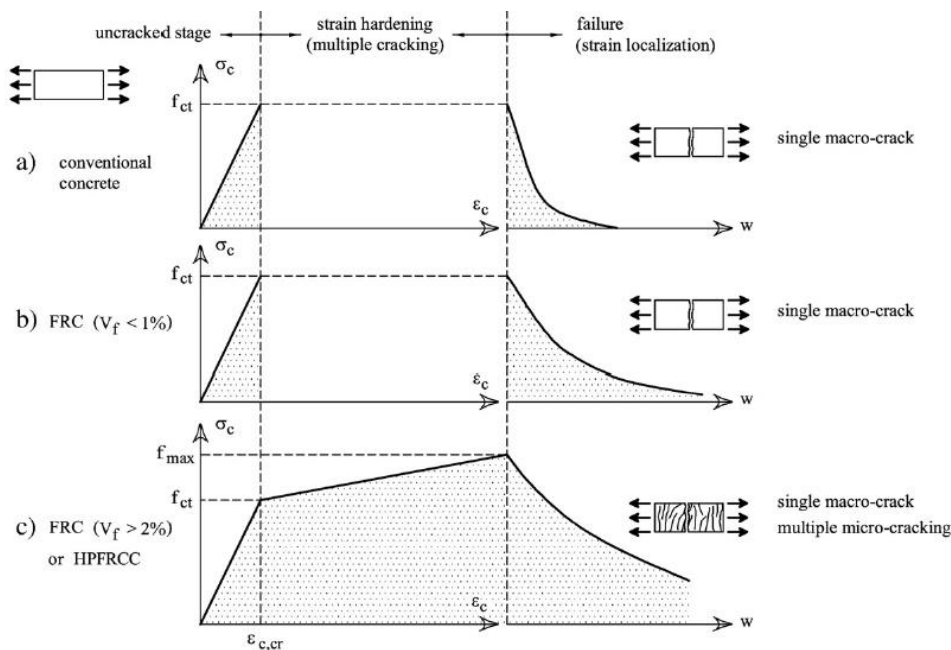
Finite element mode

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: 10.22065/JSCE.2017. 86049.1180

*Corresponding author: Mohammadmir Najafgholipour

Email address: najafgholipour@sutech.ac.ir



شکل ۱: مقایسه رفتار بتن غیر مسلح، بتن الیافی و بتن الیافی پرمقاومت با عملکرد ویژه در کشش [۱۶]

با توجه به گستردگی مطالعات آزمایشگاهی در زمینه تقویت درون صفحه دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح توسط رویه بتن الیافی، نیاز به مدل سازی عددی و مطالعات پارامتری در کنار مطالعات آزمایشگاهی احساس می شود. از این رو در این مقاله به ارائه یک مدل عددی در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS با رویکرد مدل سازی میکرو برای پانل های مصالح بنایی تقویت شده با رویه بتن الیافی مسلح شده با الیاف فولادی پرداخته می شود. با بهره گیری از این مدل عددی می توان تاثیر عوامل متعدد بر رفتار و مقاومت نهایی درون صفحه دیوارهای تقویت شده با رویه بتنی الیافی را ارزیابی نمود. در این مقاله پس از معرفی روش مدل سازی، برای اطمینان از صحت نتایج مدل پیشنهادی، از نتایج آزمایش درون صفحه ای قطری بر روی پانل های مصالح بنایی مربع شکل تقویت شده با رویه بتن الیافی شامل رفتار و مقاومت درون صفحه آنها بهره گرفته شده است. آنگاه نتایج شامل مقاومت نهایی درون صفحه و منحنی نیرو-جابجایی حاصل از مدل سازی در نرم افزار برای حالت های مختلف دیوار آجری بدون تقویت و دیوار تقویت شده با رویه بتن الیافی با الیاف فولادی، با نتایج حاصل از آزمایش های موجود مقایسه شده اند. ارزیابی نتایج حاصل نشان از دقت قابل قبول مدل پیشنهادی برای پیش بینی مقاومت نهایی درون صفحه دیوارهای آجری دارد. در نهایت تاثیر برخی پارامترهای موثر بر رفتار درون صفحه پانل های تقویت شده توسط رویه بتن الیافی در قالب مطالعات پارامتری انجام شده است.

۲- مرور رویکردهای مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی

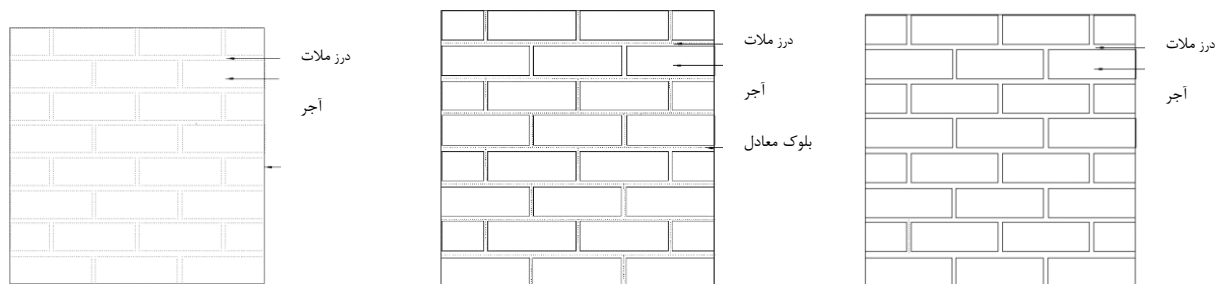
به طور کلی می توان مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی را به سه دسته مدل سازی میکرو دقیق، مدل سازی میکرو ساده شده و مدل سازی ماکرو تقسیم کرد که با استفاده از روش های عددی مختلف از جمله اجزا محدود یا اجزا مجزا قابل پیاده سازی می باشد. هر یک از این رویکردهای مدل سازی دارای مزایا و معایبی نسبت به یکدیگر می باشند که کاربر با توجه به هدف و امکانات خود می تواند از هر یک استفاده کند. در زیر به طور خلاصه انواع رویکردهای مدل سازی شرح داده شده اند.

• مدل سازی میکرو دقیق (Exact Micro Modeling): در این رویکرد مدل سازی، مصالح بنایی به عنوان یک ماده مرکب متشکل از آجر، ملات و سطح تماس آجر و ملات در نظر گرفته شده و تمامی این اجزا به طور جداگانه در مدل دیده می شوند. بنابراین در هندسه مدل درزهای ملات و واحدهای بنایی به طور مجزا مدل می شود و خصوصیات مصالح مربوط به هر یک به آن بخش اختصاص می یابد، شکل

۲-الف. هر چند که این شیوه مدل سازی دارای دقت قابل توجهی می باشد، اما در عمل تحلیل های انجام شده نیاز به حجم محاسبات قابل توجهی داشته و برای مدل سازی در مقیاس بزرگ کاربرد چندانی ندارد.

• مدل سازی میکرو ساده شده (Simplified Micro Modeling): در این روش مدل سازی، مصالح بنایی توسط المان های بلوک معادلی که در برگرفته واحد بنایی و ملات اطراف آن هست مدل سازی می شود، شکل ۲-ب. به این ترتیب آجر و نیمه از ملات اطراف آن به عنوان بلوک معادل در نظر گرفته شده که توسط المان تماسی با رفتار مناسب به یکدیگر متصل هستند.

• مدل سازی ماکرو (Macro Modeling): این روش نسبت به دو روش دیگر دقت کمتر و سرعت محاسبات بالاتری دارد. در این روش مجموعه آجر، ملات و سطح تماس آنها در قالب یک ماده همگن مدل سازی می شود. این روش مدل سازی برای نمونه های با ابعاد بزرگ مناسب است. چون نسبت به دو روش دیگر از حجم محاسبات کمتر و سرعت تحلیل بالاتری برخوردار است، شکل ۲-ج.



ج-مدل ماکرو

ب-مدل میکرو ساده شده

الف-مدل میکرو دقیق

شکل ۲: انواع رویکرد های مدل سازی مصالح بنایی

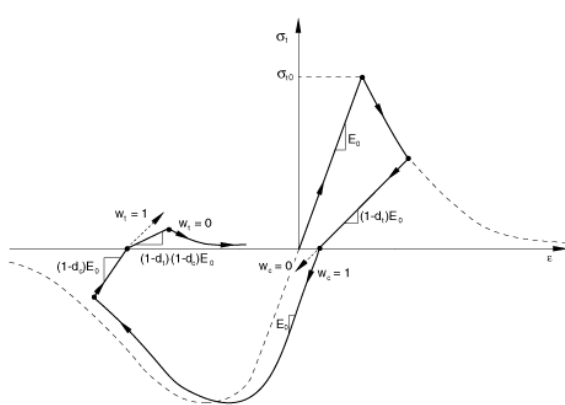
۳- روش مدل سازی و تحلیل در این تحقیق

در این مقاله یک مدل اجزا محدود برای دیوارهای آجری تقویت شده توسط رویه بتن الیافی ارائه شده است. مدل پیشنهادی به صورت مدل سازی میکرو دقیق در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS صورت گرفته است. به طوری که مدل سازی بخش مصالح بنایی شامل آجر، ملات و سطح تماس آجر و ملات به طور مجزا و بر اساس خصوصیات رفتاری آنها با استفاده از مدل های رفتاری مناسب انجام شده است. در نمونه های تقویت شده نیز رویه بتنی تقویتی به طور جداگانه و با خصوصیات رفتاری خود مدل سازی شده است.

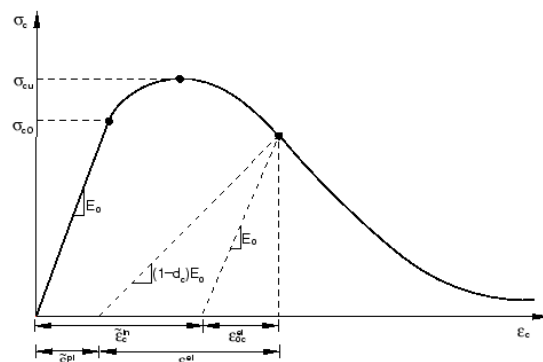
مدل سازی دیوارهای مصالح بنایی غیرمسلح چه در قالب نرم افزار های اجزا محدود موجود نظیر ANSYS، Diana و ABAQUS و چه خارج از آن قبلا توسط محققین مختلف انجام شده است [۱۷-۲۱]. در عمده این تحقیقات که مربوط به مدل سازی مصالح بنایی غیرمسلح است، از رویکرد مدل سازی میکرو ساده شده و یا مدل سازی ماکرو استفاده شده است. اما در اینجا مدل پیشنهادی برای دیوارهای مصالح بنایی تقویت شده توسط رویه بتن الیافی بر اساس رویکرد مدل سازی میکرو دقیق صورت گرفته است. در این تحقیق با توجه به تشابه رفتار ترد یا نسبتا ترد اجزا مصالح بنایی شامل آجر، ملات و رویه تقویتی بتن الیافی با رفتار بتن، از مدل های رفتاری موجود در نرم افزار مختص بتن برای مدل سازی این اجزا استفاده شده است. به طور کلی در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS سه روش برای مدل سازی رفتار بتن پیشنهاد شده است. این روش ها شامل مدل سازی به روش ترک مجزا (Discrete Crack)، روش ترک پخش (Smearred Crack) و روش مدل سازی آسیب خمیری بتن (Concrete Damage Plasticity) می باشند. در این میان مدل آسیب خمیری بتن که توسط لی و فنوس در سال ۱۹۹۸ ارائه شده است [۲۲]، به عنوان یکی از پر کاربرد ترین مدل های رفتاری برای شبیه سازی رفتار مصالح ترد نظیر بتن مطرح است. بنابراین در این تحقیق نیز برای مدل سازی آجر، ملات و بتن رویه از مدل رفتاری آسیب خمیری بتن استفاده شده است. در ادامه شرح مختصری از این مدل رفتاری ارائه می گردد.

۳-۱- مدل آسیب خمیری بتن

مدل آسیب خمیری بتن یک مدل پلاستیسیته گسترده (Distributed Plasticity) برای شبیه سازی رفتار بتن و یا مصالح مشابه با رفتار غیرخطی و ترد است. در این مدل فرض بر این است که دو مکانیزم گسیختگی بتن، شامل ترک خوردگی کششی و خردشدگی فشاری بتن می‌باشد. در این مدل به منظور مدل سازی رفتار غیرخطی مصالح تحت تنش تک محوره از منحنی های تنش- کرنش مناسب برای مصالح در کشش و فشار استفاده می‌شود. این منحنی ها می‌توانند از آزمایش های مصالح استخراج شوند و یا از منحنی های از پیش تعریف شده مصالح نظیر بتن یا ملات استفاده شود. همچنین برای شبیه سازی زوال بتن تحت تنش های چند محوره از سطح زوال مناسب استفاده می‌گردد. علاوه بر این در این مدل رفتاری برای در نظر گرفتن اثرات باربرداری و بارگذاری مجدد بر سختی مصالح از شاخص خرابی در کشش و فشار (dc) که در مدول ارتجاعی اولیه بتن ضرب می‌شود استفاده می‌شود. این شاخص های آسیب تابعی از کرنش پلاستیک است و می‌توانند مقداری بین صفر تا ۱ داشته باشند. $d=0$ به معنی مصالح آسیبنده و $d=1$ به معنی از بین رفتن کامل مقاومت در اثر زوال می‌باشد. شکل ۳ چگونگی اعمال شاخص آسیب در رفتار کششی و فشاری مصالح را ارائه می‌کند.



ب- آسیب خمیری در کشش

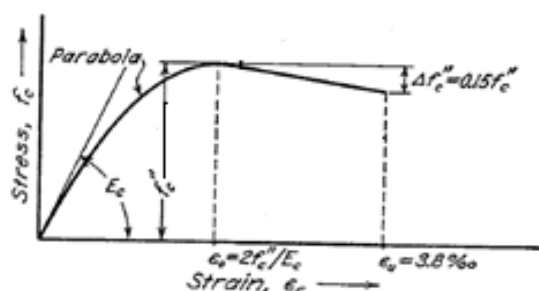


الف- آسیب خمیری در فشار

شکل ۳: نحوه اعمال آسیب در بتن الف- آسیب فشاری ب- آسیب کششی [۲۳]

۳-۲- منحنی تنش-کرنش آجر و ملات

با توجه به تشابه رفتار ترد مصالح بنایی به عنوان یک ماده مرکب و اجزای آن شامل آجر و ملات به بتن، در بسیاری از مراجع در صورت عدم وجود منحنی تنش-کرنش واقعی مصالح حاصل از آزمایش، از منحنی های کلی از پیش تعریف شده بتن برای این مصالح استفاده می‌شود. از این رو در اینجا از شاخه صعودی منحنی تنش-کرنش پیشنهادی توسط هاگنستاد [۲۴] (Hognestad) برای بتن در فشار برای شبیه سازی منحنی تنش-کرنش مصالح آجر و ملات استفاده شده است. شکل عمومی این منحنی در شکل ۴ مشاهده می‌شود. این منحنی شامل دو شاخه صعودی و نزولی است. شاخه صعودی یک سهمی است که از نقطه تنش و کرنش صفر تا نقطه متناظر با مقاومت فشاری مصالح ادامه می‌یابد. شاخه نزولی نیز که رفتار نرم شونده مصالح پس از مقاومت فشاری را نشان می‌دهد به صورت خطی از نقطه متناظر با مقاومت فشاری مصالح تا نقطه متناظر با ۰.۸۵ مقاومت فشاری ادامه می‌یابد. منحنی تنش-کرنش مصالح در کشش که کنترل کننده رفتار نمونه ها می‌باشد نیز به صورت یک منحنی دوخطی است که شامل یک شاخه صعودی تا نقطه متناظر با مقاومت کششی و یک شاخه نزولی تا نقطه متناظر با تنش صفر برای شبیه سازی رفتار ترد کششی مصالح می‌باشد، شکل ۵.



شکل ۴: منحنی تنش-کرنش پیشنهادی توسط هاگنستاد برای بتن [۲۴]

به منظور تعریف منحنی های تنش-کرنش مصالح مشخصات مکانیکی شامل مدول ارتجاعی مصالح، مقاومت کششی و فشاری آنها مورد نیاز است. این مشخصات مکانیکی را می توان با استفاده از آزمایش های مصالح و یا با استفاده از روابط تجربی موجود در مراجع تخمین زد. به عنوان مثال کاشیک و همکاران در سال ۲۰۰۸ [۲۵] دو رابطه زیر را برای تخمین مدول ارتجاعی ملات و آجر بر حسب مقاومت فشاری آنها پیشنهاد دادند:

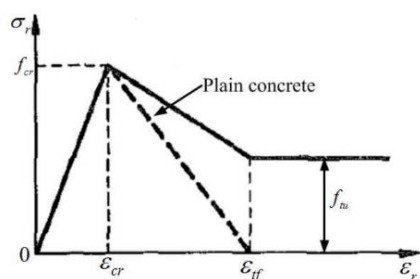
$$E_J = 200 f_J' \quad (1)$$

$$E_B = 300 f_B' \quad (2)$$

در این روابط E_B و E_J به ترتیب مدول ارتجاعی آجر و ملات بر حسب مگاپاسکال و f_J' و f_B' به ترتیب مقاومت فشاری آجر و ملات بر حسب مگاپاسکال می باشند.

۳-۳- منحنی تنش-کرنش بتن رویه

با توجه به شباهت رفتار بتن الیافی معمولی با درصد الیاف کم در فشار با بتن معمولی، از منحنی تنش-کرنش پیشنهادی توسط کنت و پارک (Kent & Park) برای بتن غیر محصور استفاده شده است. در صورتی که از بتن الیافی با درصد بیشتر الیاف استفاده شود، می توان از مدل های تنش-کرنش مختص بتن الیافی در فشار استفاده کرد [۷-۹]. اما با توجه به اینکه رفتار بتن های الیافی در کشش با رفتار بتن معمولی متفاوت است، بنابراین تحت تنش های کششی باید از منحنی های تنش-کرنش مختص بتن های الیافی استفاده شود، چون بتن های الیافی چه از نوع معمولی و چه از نوع با عملکرد ویژه رفتاری نسبتاً شکل پذیر در کشش از خود نشان می دهند. به منظور شبیه سازی رفتار بتن های الیافی در کشش مدل های تنش-کرنش از پیش تعریف شده متنوعی وجود دارد [۲۶]. در اینجا از مدل رفتاری پیشنهادی توسط تان و منصور (Tan & Mansour) [۲۶-۲۷] استفاده شده است. این مدل رفتاری که شکل کلی آن با بتن معمولی در شکل ۵ مقایسه شده است، شامل سه ناحیه خطی است. اول ناحیه صعودی که تا نقطه متناظر با مقاومت کششی مصالح بتن الیافی ادامه دارد. دوم شاخه نزولی است که از نقطه متناظر با مقاومت کششی تا نقطه ای نظیر یک تنش پسماند ادامه می یابد. در نهایت نیز ناحیه با تنش ثابت که معادل همان تنش پسماند است.



شکل ۵: منحنی تنش-کرنش پیشنهادی توسط تان و منصور برای بتن الیافی در کشش [۲۷]

به طور خلاصه روابط مورد استفاده برای تشکیل منحنی تنش کرنش بتن الیافی در کشش به شرح زیر است:

$$\sigma_r = E_C \varepsilon_r, \varepsilon_r \leq \varepsilon_{cr} \quad (3)$$

$$\sigma_r = (f_{cr} - f_{tu}) \left[\frac{\varepsilon_r - \varepsilon_{cr}}{\varepsilon_{cr} - \varepsilon_{if}} \right] + f_{cr}, \varepsilon_{cr} \leq \varepsilon_r \leq \varepsilon_{if} \quad (4)$$

$$\sigma_r = f_{tu}, \varepsilon_r > \varepsilon_{if} \quad (5)$$

در این روابط σ_r و ε_r به ترتیب مقادیر مختلف تنش و کرنش کششی برای تشکیل منحنی تنش کرنش بتن الیافی هستند. f_{cr} و ε_r نیز به ترتیب تنش و کرنش متناظر با مقاومت کششی بتن الیافی می باشند. در نهایت f_{tu} و ε_{if} نیز به ترتیب تنش پسماند و کرنش نظیر پایان شاخه نزولی در شاخه افقی منحنی تنش کرنش هستند.

همچنین برای محاسبه مقادیر نظیر تنش پسماند (f_{tu}) و کرنش پایان شاخه نزولی (ε_{if}) می توان از روابط پیشنهادی زیر که نتیجه تعداد قابل توجهی آزمایش کششی بر روی انواع بتن های الیافی است، استفاده کرد.

$$\varepsilon_{if} = \varepsilon_{cr} \left[1 + \frac{1}{0.48} (0.39 + f_{cr}) \right] \quad (3)$$

$$f_{tu} = 2\eta_1 \eta_0 \tau_{if} V_f \frac{l_f}{d_f} \quad (4)$$

در این روابط d_f و V_f به ترتیب طول، قطر و درصد حجمی الیاف مصرفی در بتن الیافی است. η_0 و η_1 نیز به ترتیب ضرایب جهت الیاف و کارایی طول الیاف می باشند. τ_{if} نیز چسبندگی معادل الیاف با بتن اطراف آن می باشد که با رابطه زیر تخمین زده می شود:

$$\tau = 0.66 \sqrt{f'_c} \quad (5)$$

۳-۴- شبیه سازی رفتار سطح تماس بین اجزا مصالح بنایی

با توجه به استفاده از رویکرد مدل سازی میکرو دقیق در این مقاله، باید اجزا مدل شامل آجر و درزهای ملات با استفاده از مدل رفتاری مناسبی به یکدیگر متصل شوند. با توجه به اینکه رفتار سطح تماس آجر و ملات در برش از معیار مور-کولمب (Mohr-Coulomb) تبعیت می کند، در اینجا از قابلیت مدل سازی اصطکاک به همراه چسبندگی در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS استفاده شده است. بنابراین رفتار این سطوح تماس در برش با یک مقدار چسبندگی اولیه و ضریب اصطکاک مناسب بین سطوح تعریف می شود. رفتار این سطوح در کشش نیز با یک مقدار چسبندگی کششی بین آجر و ملات تعریف می گردد. مقادیر چسبندگی برشی و کششی بین سطوح آجر و ملات و ضریب اصطکاک با استفاده از آزمایش های مصالح و یا مقادیر پیشنهادی در منابع قابل تخمین است.

۳-۵- الگوریتم تحلیل

در نرم افزار ABAQUS دو الگوریتم تحلیل شامل صریح (Explicit) و ضمنی (Implicit) تعریف شده است. الگوریتم صریح عمدتاً برای تحلیل های دینامیکی و ضربه و یا تحلیل های با درجه غیرخطی بالا استفاده می شود. البته با استفاده از این تحلیل و با کاهش نرخ اعمال بار به اندازه ای که سرعت بارگذاری به بارگذاری استاتیکی نزدیک شود می توان مسایل استاتیکی را نیز تحلیل کرد. همچنین برای تحلیل های استاتیکی با قید های تماسی پیچیده نیز می توان از این روش تحلیل استفاده کرد. در مقابل الگوریتم ضمنی برای تحلیل های رایج استاتیکی قابل استفاده است. براین اساس در اینجا از تحلیل صریح با سرعت بارگذاری بسیار کم به گونه ای که انرژی جنبشی سازه آنقدر کم شود که درصد کمی از انرژی داخلی سازه را شامل گردد استفاده شده است.

۴- صحت سنجی مدل پیشنهادی

به منظور اطمینان از نتایج مدل پیشنهادی، در این بخش به مدل سازی و تحلیل تعدادی از پانل های آجرکار تقویت شده توسط رویه بتن الیافی که قبلاً در قالب یک تحقیق جامع آزمایشگاهی توسط خواجه پور [۱۰] مورد ارزیابی قرار گرفته اند، پرداخته می شود. در این بخش پس از معرفی مدل های آزمایشگاهی، به شرح مدل سازی آنها و نتایج حاصل از تحلیل های انجام شده پرداخته خواهد شد. در نهایت نتایج حاصل از تحلیل های عددی شامل مقاومت نهایی درون صفحه، منحنی نیرو-جابجایی و شکل زوال نهایی نمونه ها با نتایج حاصل از آزمایش مقایسه می شود.

۴-۱- نمونه های آزمایشگاهی مورد استفاده برای صحت سنجی

نمونه های آزمایش شده توسط خواجه پور [۱۰] که در اینجا به منظور صحت سنجی مدل پیشنهادی مورد استفاده قرار گرفته اند، شامل نمونه های مربعی آجرکار می باشد که توسط رویه بتنی الیافی فولادی تقویت شده اند. در تحقیق آزمایشگاهی مذکور تاثیر پارامترهای مختلف از جمله نوع و مقدار الیاف و ضخامت رویه بتنی بر رفتار درون صفحه دیوارهای آجری تقویت شده بررسی شده است. سیستم آزمایش درون صفحه، آزمایش کششی قطری بر اساس استاندارد ASTM-E519 بوده است. بدین ترتیب ابتدا نمونه های آجرکار با ابعاد ۶۵۰ در ۶۵۰ میلیمتر و با ضخامت ۱ آجر معادل ۱۱۰ میلیمتر ساخته شده اند. آنگاه نمونه ها بر اساس طرح های مختلف و با هدف بررسی تاثیر پارامترهای مد نظر توسط بتن الیافی فولادی تقویت شده اند. در تمامی حالت ها تقویت روی دو وجه دیوار آجری انجام شده است. پس از گذشت مدت زمان مشخص نمونه ها تحت بارگذاری فشاری در راستای قطر خود قرار گرفته اند. نمونه ها از آجر فشاری رسی رایج در کشور ساخته شده اند و ملات مورد استفاده نیز ملات ماسه-سیمان با نسبت حجمی سه به یک بوده است. در ساخت ملات مورد استفاده از ماسه با دانه بندی استاندارد استفاده شده است. الیاف مورد استفاده در بتن رویه نیز الیاف فولادی قلاب دار بوده است. بارگذاری قطری به صورت بارافزون بوده و تا ظرفیت نهایی نمونه ها ادامه یافته است، شکل ۶. نتایج حاصل از مطالعات آزمایشگاهی نشان از افزایش قابل توجه مقاومت درون صفحه پانل های آجرکار پس از تقویت توسط رویه بتن الیافی نسبت به نمونه های آجرکار غیرمسلح دارد. این افزایش مقاومت تابع عواملی چون میزان الیاف مصرفی و ضخامت رویه بتنی است. شکست نهایی نمونه ها نیز با ایجاد یک ترک بر روی قطر فشاری همراه است. البته در نمونه های تقویت شده توسط بتن الیافی و بخصوص در نمونه ای که از الیاف بیشتر در بتن رویه استفاده شده است، نمونه ها رفتار نسبتاً شکل پذیرتری از خود نشان داده اند.



شکل ۶ - سیستم انجام آزمایش قطری نمونه های آجرکار [۱۰]

در تحقیق حاضر به منظور صحت سنجی مدل پیشنهادی، ۵ پانل آجرکار ارزیابی شده در آزمایشگاه انتخاب شده اند. نمونه های انتخاب شده با رویه بتن الیاف فولادی تقویت شده اند. سعی شده است که با انتخاب چندین نمونه شامل عوامل متنوع، صحت نتایج حاصل از مدل سازی های انجام شده ارزیابی شود. نمونه های مد نظر شامل نمونه آجرکار قبل از تقویت (B)، پانل آجرکار تقویت شده توسط رویه بتنی غیرمسلح (P)، پانل آجرکار تقویت شده توسط رویه بتن الیافی فولادی با مقدار ۱۵ کیلوگرم الیاف در هر متر مکعب و ضخامت ۲۵ میلیمتر (S15-T25)، پانل مصالح بنایی با تقویت رویه بتن الیافی فولادی با مقدار ۲۵ کیلوگرم الیاف در هر متر مکعب و ضخامت ۲۵ میلیمتر (S25-T25) و در نهایت پانل مصالح بنایی با تقویت رویه بتن الیافی فولادی با مقدار ۱۵ کیلوگرم الیاف در هر متر مکعب و ضخامت ۴۰ میلیمتر (S15-T40) می باشند. جدول ۱ خلاصه جزئیات نمونه های مورد بررسی در صحت سنجی مدلسازی را ارائه می نماید.

جدول ۱: جزئیات نمونه های آزمایشگاهی مورد استفاده برای صحت سنجی

نمونه	مقدار الیاف در رویه بتنی (kg/m^3)	درصد حجمی الیاف در رویه بتنی	ضخامت رویه بتنی (mm)
B	-	-	-
P	-	-	۲۵
S15-T25	۱۵	۰/۲	۲۵
S25-T25	۲۵	۰/۳	۲۵
S15-T40	۱۵	۰/۲	۴۰

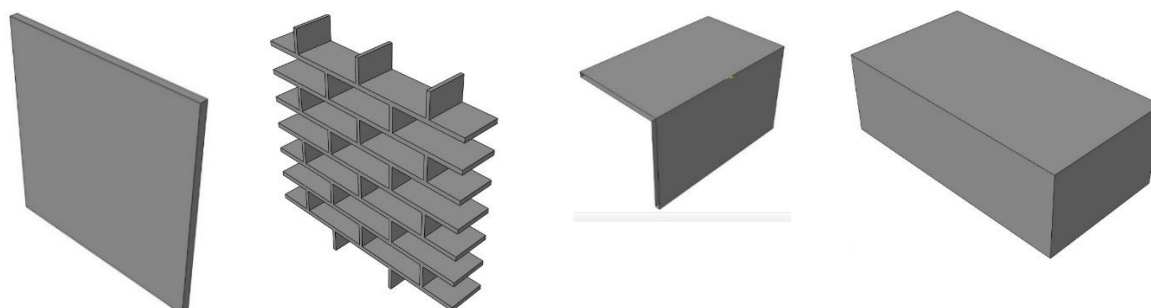
۴-۲- مدل سازی عددی نمونه های آزمایشگاهی

با توجه به روش مدل سازی پیشنهادی در این مقاله و نمونه های آزمایشگاهی موجود، در این مرحله نمونه ها مدل سازی و تحلیل شده اند. در اینجا به شرح کامل جزئیات مدل سازی عددی نمونه ها به روش پیشنهادی پرداخته می شود.

• هندسه مدل و شبکه بندی

همانطور که قبلاً ذکر شد نمونه های آزمایشگاهی شامل پانل های آجرکار ساخته شده با آجرهای فشاری رسی رایج در کشور و ملات ماسه سیمان می باشند. ابعاد پانل ها ۶۵۰ در ۶۵۰ میلیمتر و ضخامت آنها یک آجر است. در نمونه های تقویت شده نیز بر اساس نوع تقویت، رویه بتن الیافی روی دو وجه نمونه اجرا شده است. اعمال بار به نمونه ها نیز از طریق دو کلاهک فولادی فوقانی و تحتانی با طول

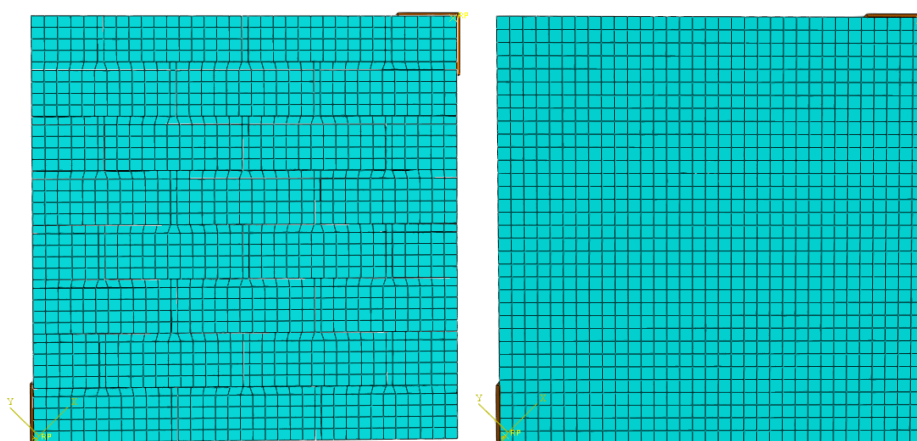
تماس ۹۰ میلیمتر با نمونه انجام شده است. با توجه به اینکه مدل پیشنهادی در این تحقیق از نوع مدل سازی میکرو است، بنابراین اجزا تشکیل دهنده دیوار به طور جداگانه مدل سازی می شوند. شکل ۷ اجزا تشکیل دهنده مدل را نشان می دهد.



الف- آجر ب- کلاهک بارگذاری ج- ملات درزهای افقی و قائم د- رویه تقویت

شکل ۷: اجزای تشکیل دهنده مدل

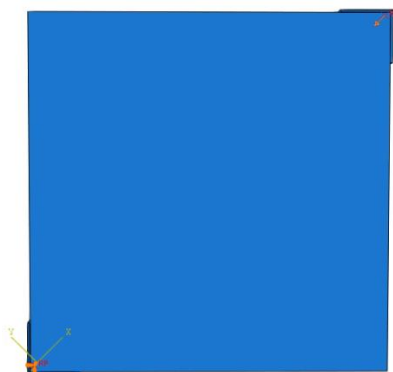
به منظور تحلیل نیز از المان سه بعدی هشت گرهی C3D8R استفاده شده است. شکل ۸ شبکه بندی با اندازه بعد ۳۰ میلی متر را نشان می دهد. این اندازه المان پس از انجام تحلیل حساسیت برای مش بندی بدست آمده است.



قبل از تقویت بعد از تقویت

شکل ۸: مدل شبکه بندی شده قبل و بعد از تقویت

بر اساس سیستم انجام آزمایش، نیرو در راستای قطر نمونه به کفشک فوقانی اعمال شده است. در مقابل کفشک تحتانی در برابر جابجایی در هر سه جهت بسته شده است. بنابراین با اعمال نیرو، نمونه در راستای قطری خود تحت فشار قرار می گیرد. در طول آزمایش با اعمال نیرو، جابجایی در راستای قطر فشاری قرائت شده و ثبت گردیده است و منحنی های نیرو-جابجایی گزارش شده اند. در اینجا نیز به منظور ایجاد شرایط تکیه گاهی سازگار با آزمایش ها کفشک تحتانی به صورت ثابت در نظر گرفته شده است و کفشک فوقانی در راستای قطر نمونه ها جابجا شده است. شکل ۹ نمونه مورد نظر و شیوه اعمال شرایط مرزی برای آن نشان می دهد.



شکل ۹: اعمال شرایط مرزی در گوشه ها و بار فشاری قطری

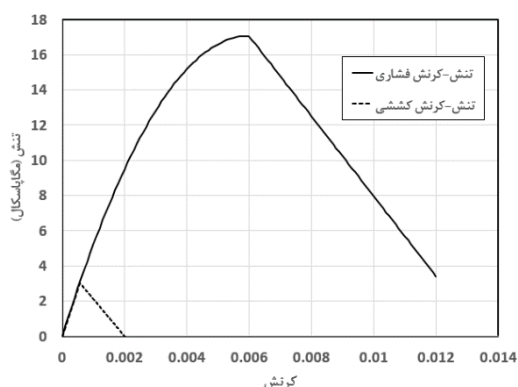
• خصوصیات مکانیکی و رفتاری مصالح

پس از ساخت هندسه مدل، شبکه بندی و اعمال نیرو و شرایط مرزی مناسب خصوصیات مکانیکی بر اساس مدل های رفتاری تشریح برای اجزا تعریف می شود. تعدادی از مشخصات مکانیکی مورد نیاز بر اساس آزمایش های مصالح انجام شده توسط خواجه پور [۱۰]، تعدادی بر اساس مقادیر توصیه شده در مراجع برای مصالح مشابه و تعدادی نیز بر اساس روابط تجربی پیشنهادی در مراجع مورد استفاده قرار گرفته اند. خلاصه مشخصات مکانیکی مورد استفاده برای مصالح در مدل سازی در قالب جدول ۲ ارائه شده است. مقادیر مقاومت فشاری آجر، ملات و طرح های مختلف رویه بتنی بر اساس آزمایش های مصالح انجام شده توسط خواجه پور [۱۰] انتخاب شده اند. همچنین مقاومت کششی نیز از مقادیر حاصل از آزمایش خمشی نمونه های آجر، ملات و رویه بتنی گزارش شده توسط خواجه پور [۱۰] استفاده شده است. با توجه به اینکه در مدل سازی به مقاومت کششی مصالح نیاز است و در مراجع مقاومت کششی مصالح را بین ۵۰ تا ۸۰ درصد مقاومت خمشی آنها تخمین زده اند، مقدار مقاومت کششی مورد استفاده در مدل سازی عددی که در جدول ۲ درج شده است، به ترتیب ۸۰ درصد مقاومت خمشی برای نمونه های آجر و ملات و ۶۵ درصد برای بتن رویه است. مدول ارتجاعی مصالح نیز با استفاده از روابط تجربی ارائه شده در قبل بر اساس مقاومت فشاری مصالح در نظر گرفته شده است. علاوه بر این زاویه اتساع مورد استفاده برای آجر، ملات بتن رویه غیرمسلح ۳۰ درجه و برای بتن رویه ییافی ۳۵ درجه در نظر گرفته شده است. این مقدار در مراجع بین ۳۰ تا ۴۲ درجه پیشنهاد شده است.

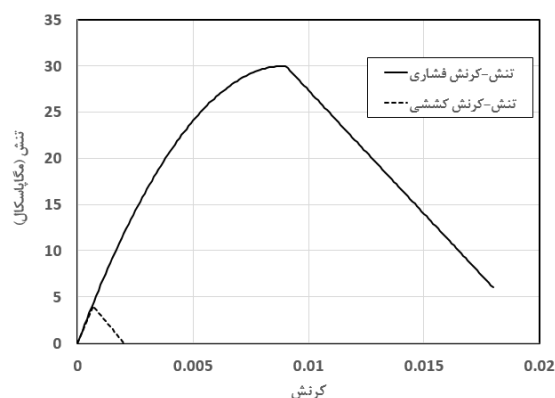
جدول ۲: خصوصیات مکانیکی مصالح

مصالح	مقاومت فشاری (MPa)	مدول ارتجاعی (MPa)	مقاومت کششی (MPa)
آجر	۱۷/۰۶	۵۱۱۸	۳
ملات	۳۰	۶۰۰۰	۴
رویه بتنی غیرمسلح	۲۵/۸	۲۱۰۱۸/۸	۲/۱
رویه بتنی با ۱۵ kg/m ³	۱۹/۹۳	۱۸۴۷۳/۵	۲/۴
رویه بتنی با ۲۵ kg/m ³	۲۴/۸	۲۰۶۰۷/۴	۳/۱۲۵

بر اساس مقادیر مشخصات مکانیکی مصالح و مدل های تنش- کرنش استاندارد موجود، منحنی تنش کرنش مصالح در کشش و فشار برای مصالح مورد استفاده در مدلسازی به عنوان نمونه در شکل های ۱۰ و ۱۱ ارائه شده است.

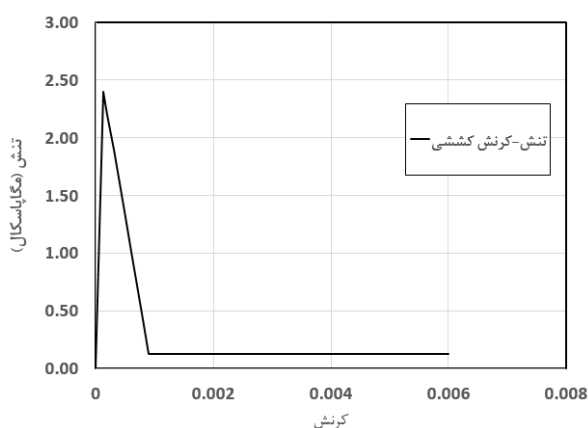


ب- آجر

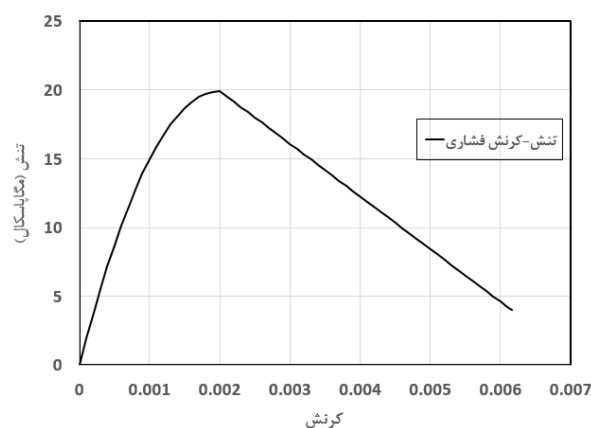


الف- ملات

شکل ۱۰: منحنی تنش کرنش مورد استفاده در کشش و فشاری برای مصالح بنایی الف-ملات ب- آجر



ب- تنش-کرنش کششی



الف- تنش-کرنش فشاری

شکل ۱۱- منحنی تنش کرنش مورد استفاده در برای بتن الیافی با ۱۵ کیلوگرم الیاف در مترمکعب الف-تنش-کرنش فشاری ب- تنش-کرنش کششی

در نهایت برای مدل سازی سطح تماس آجر و ملات از مدل اصطکاکی به همراه چسبندگی برشی استفاده شده است. مقدار ضریب اصطکاک مورد استفاده برای سطح تماس آجر و ملات ۰/۸۵ لحاظ شده است و چسبندگی برشی نیز ۰/۵ مگاپاسکال در نظر گرفته شده است. رفتار سطح تماس در کشش نیز با چسبندگی کششی به مقدار ۰/۱ مگاپاسکال در مدل سازی لحاظ شده است. مقادیر چسبندگی برشی و کششی مورد استفاده بر اساس آزمایش های انجام شده توسط نجفقلی پور [۲۸]، مزروعی و همکاران [۲۹] و تسنیمی [۳۰] که با استفاده از نتایج تحقیقات بر روی مصالح مشابه برآورد شده است.

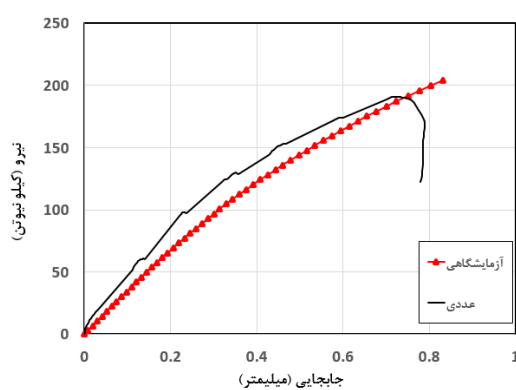
۳-۴- نتایج تحلیل های انجام شده

پس از مدل سازی نمونه های معرفی شده در جدول ۱ به روش اشاره شده در این مقاله و انجام تحلیل ها نتایج استخراج شدند. مقاومت نهایی درون صفحه نمونه ها حاصل از تحلیل های انجام شده به همراه مقاومت نهایی آنها بدست آمده از آزمایش در جدول ۳ درج شده اند. همانطور که ملاحظه می شود، نتایج حاصل از مدلسازی عددی، از نظر مقاومت نهایی درون صفحه از دقت قابل قبولی برخوردار هستند. به گونه ای که حداکثر خطا در مقاومت نهایی نمونه ها ۱۴٪ است. لازم به یادآوری است که برای اطمینان از دقت نتایج تحلیل ۵ نمونه با پارامترهای مختلف مورد ارزیابی قرار گرفته اند. دقت نتایج حاصل نشان می دهد که مدل پیشنهادی به خوبی توانایی پیش بینی مقاومت نهایی درون صفحه پانل های آجرکار قبل و بعد از تقویت را دارا می باشد.

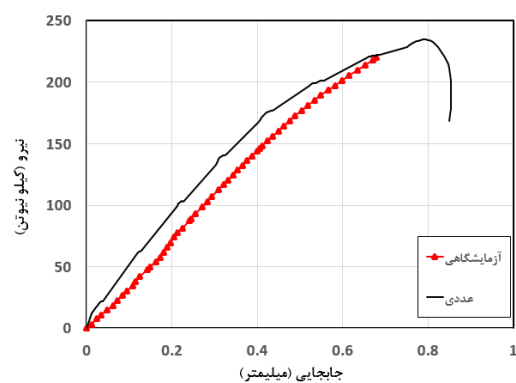
جدول ۳- مقایسه مقاومت نهایی درون صفحه حاصل از تحلیل و آزمایش

نمونه	مقاومت نهایی (kN) (آزمایش)	مقاومت نهایی (kN) (تحلیل)	درصد خطا
B	۳۶/۶	۳۱/۶	۱۴
P	۱۶۸/۳	۱۸۴/۸	۹
S15-T25	۲۰۲/۶	۱۹۰/۷	۶
S25-T25	۲۲۰/۱	۲۳۴/۷	۶/۶
S15-T40	۲۶۳	۲۶۰/۳	۱/۱

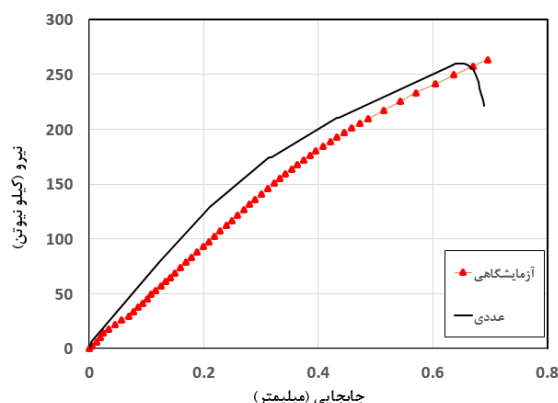
همچنین منحنی های نیرو-جابجایی در راستای قطر بارگذاری سه نمونه تقویت شده با بتن رویه الیافی، حاصل از تحلیل و آزمایش در شکل های ۱۲ تا ۱۴ ارائه شده اند. مقایسه منحنی ها نشان دهنده این است که مدل پیشنهادی نه تنها توانایی تخمین مقاومت نهایی نمونه ها را دارد، بلکه منحنی نیرو-جابجایی درون صفحه نمونه ها بدست آمده از تحلیل از دقت قابل قبولی برخوردار هستند.



شکل ۱۲: منحنی های آزمایشگاهی و عددی نیرو-جابجایی برای نمونه S15-T25

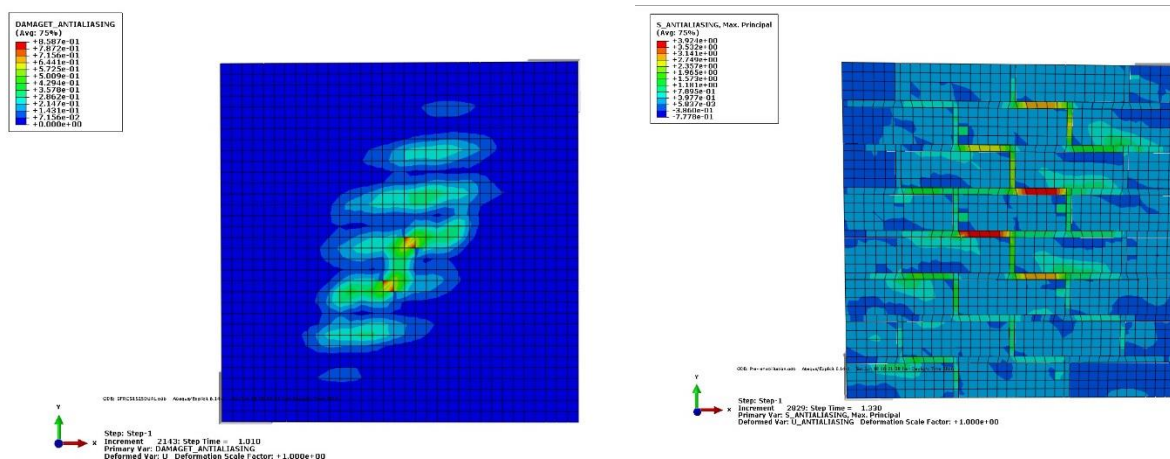


شکل ۱۳: منحنی های آزمایشگاهی و عددی نیرو-جابجایی برای نمونه S25-T25



شکل ۱۴: منحنی های آزمایشگاهی و عددی نیرو-جابجایی برای نمونه S15-T40

در نهایت در شکل ۱۵ به عنوان نمونه شکل کلی توزیع تنش حداکثر در نمونه پانل غیرمسلح و پانل تقویت شده S15-T25 متناظر با مقاومت نهایی نشان داده شده است. همانگونه که پیش بینی می شد وضعیت تنش روی قطر بارگذاری شده نمونه بحرانی است.



ب- وضعیت تنش اصلی در نمونه S15-T25

الف- وضعیت تنش اصلی در نمونه قبل از تقویت

شکل ۱۵: توزیع تنش اصلی در پانل های آجرکار قبل و بعد از تقویت

۵- مطالعات پارامتری

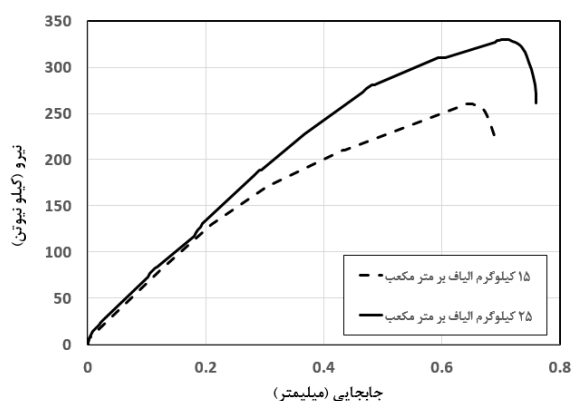
در این بخش با استفاده از روش پیشنهادی برای مدل سازی پانل های مصالح بنایی تقویت شده که صحت آن در بخش قبل ارزیابی شد، به بررسی تاثیر برخی از مشخصات مقاومتی و هندسی بر مقاومت درون صفحه پانل های مصالح بنایی تقویت شده پرداخته شده است. از جمله پارامترهای موثر بر مقاومت درون صفحه و رفتار پانل های تقویت شده میزان الیاف مصرفی، ضخامت رویه بتنی و وجه تقویت شده پانل مصالح بنایی توسط رویه بتن الیافی است. با توجه به اینکه به دلیل محدودیت های معماری در ساختمان های موجود، همواره دسترسی به هر دو وجه دیوارها وجود ندارد، لذا بررسی رفتار دیوارهایی که تنها بر یک وجه تقویت شده اند، از اهمیت ویژه ای برخوردار است. علاوه بر این، موضوعی که همواره از اهمیت ویژه ای برخوردار می باشد، تخمین مقاومت درون صفحه دیوارهای مصالح بنایی تقویت شده توسط رویه با استفاده از مقاومت مصالح بنایی و رویه بتنی، هر یک به تنهایی است که در اینجا با عنوان اندرکنش پانل مصالح بنایی و رویه بتنی مورد بررسی قرار گرفته است. در جدول ۴ مشخصات نمونه های تحلیل شده در این بخش ارائه شده است.

جدول ۴: مشخصات مدل های مورد بررسی در مطالعات پارامتری

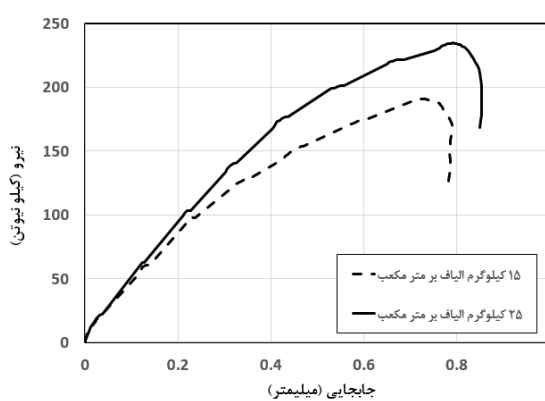
نمونه	مقدار الیاف در رویه بتنی (kg/m ³)	درصد حجمی الیاف در رویه بتنی	ضخامت رویه بتنی (mm)	وجه تقویت شده
B	-	-	-	-
P	-	-	۲۵	دو طرفه
S15-T25	۱۵	۰/۲	۲۵	دو طرفه
S25-T25	۲۵	۰/۳	۲۵	دو طرفه
S15-T40	۱۵	۰/۲	۴۰	دو طرفه
S25-T40	۲۵	۰/۳	۴۰	دو طرفه
S15-O25	۱۵	۰/۲	۲۵	یک طرفه
S25-O25	۲۵	۰/۳	۲۵	یک طرفه

۵-۱- بررسی تاثیر میزان الیاف در رویه بتن الیافی

با توجه به تحلیل های انجام شده در بخش قبل، رفتار پانل های مصالح بنایی تقویت شده توسط رویه بتن الیافی با دو مقدار مختلف الیاف (۱۵ و ۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب) و ضخامت رویه ۲۵ و ۴۰ میلی متر قابل مقایسه است. در شکل ۱۶ منحنی های نیرو-جابجایی مربوط به ۴ پانل مورد بررسی نمایش داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، در مقایسه با نمونه با رویه بتنی فاقد الیاف، افزودن الیاف مقاومت درون صفحه پانل تقویت شده را افزایش می دهد. همچنین افزایش میزان الیاف از ۱۵ به ۲۵ کیلوگرم در هر متر مکعب بتن رویه، در پانل های با ضخامت رویه ۲۵ میلی متر و ضخامت رویه ۴۰ میلی متر به ترتیب منجر به افزایش ۲۳ و ۲۷ درصدی مقاومت درون صفحه نمونه می شود. این امر به این دلیل است که افزایش میزان الیاف در رویه به افزایش مقاومت کششی رویه بتن الیافی می انجامد. علاوه بر این در حالی که سختی اولیه هر دو نمونه تقریباً یکسان است، اما به تدریج و با افزایش نیروی درون صفحه، نمونه حاوی الیاف بیشتر شکل پذیری بیشتری نسبت به نمونه دیگر از خود نشان می دهند.



ب

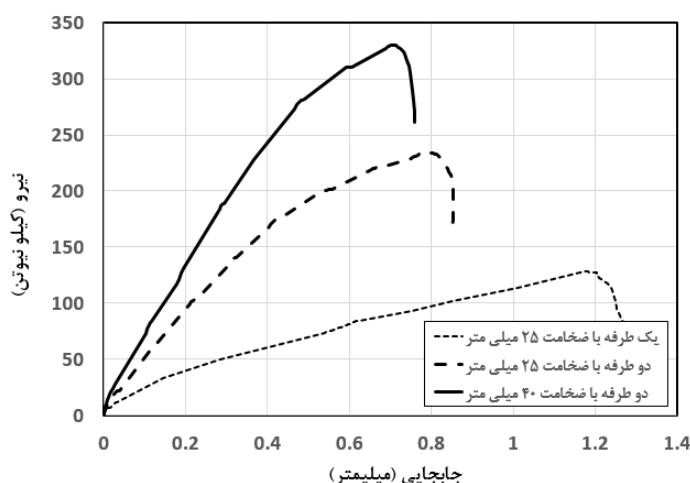


الف

شکل ۱۶: منحنی های نیرو-جابجایی پانل های تقویت شده با رویه بتنی حاوی مقادیر مختلف الیاف الف- ضخامت ۲۵ میلی متر ب- ۴۰ میلی متر

۵-۲- بررسی تاثیر ضخامت رویه و وجه تقویت شده

در شکل ۱۷ منحنی های نیرو-جابجایی مربوط به پانل های تقویت شده توسط رویه بتنی با ۲۵ کیلوگرم الیاف در هر متر مکعب، با ضخامت های ۲۵ و ۴۰ میلیمتر در دو وجه و پانل تقویت شده بر روی یک وجه نشان داده شده است. همانگونه که ملاحظه می شود، افزایش ضخامت رویه بتنی از ۲۵ به ۴۰ میلی متر منجر به افزایش ۴۰ درصدی مقاومت درون صفحه پانل می شود. همچنین تقویت دوطرفه نسبت به یک طرفه افزایش مقاومتی معادل ۸۳ درصد را به همراه دارد. نکته قابل توجه در این تحلیل ها این است که جابجایی نظیر مقاومت نهایی در پانل تقویت شده بر روی یک وجه نسبت به پانل تقویت شده بر دو وجه بیشتر است.



شکل ۱۷: منحنی های نیرو-جابجایی پانل های تقویت شده با ضخامت های مختلف رویه بتن الیافی

۵-۳- اندرکنش رویه بتنی و مصالح بنایی

نکته ای که همواره مورد توجه محققین و مهندسیین در خصوص محاسبه ظرفیت درون صفحه دیوارها و پانل های تقویت شده توسط رویه بتنی مطرح است، نحوه محاسبه ظرفیت درون صفحه دیوار تقویت شده با استفاده از ظرفیت رویه و مصالح بنایی است. معمولاً در این مواقع مرسوم است که در جهت اطمینان از مقاومت درون صفحه دیوار مصالح بنایی در برابر رویه بتنی صرف نظر می شود و یا مقاومت برشی رویه و مصالح بنایی به تنهایی محاسبه شده و با هم جمع می شود. در این بخش با داشتن ظرفیت درون صفحه پانل مصالح بنایی و رویه به تنهایی که هر یک از تحلیل های جداگانه بدست آمده اند و مقایسه آن با مقاومت درون صفحه حاصل از تحلیل پانل تقویت شده به این سوال پاسخ داده می شود. برای این منظور دیوارهای تحلیل شده در بخش قبل مورد بررسی قرار گرفته و مقاومت تک تک اجزا و پانل تقویت شده در جدول ۵ ارائه شده اند. همانگونه که ملاحظه می شود، در تمامی نمونه ها مقاومت درون صفحه حاصل از تحلیل پانل مصالح بنایی تقویت شده به عنوان یک عنصر مرکب، بیش از مقدار حاصل از مجموع مقاومت دیوار مصالح بنایی و رویه به تنهایی است. این نسبت برای دیوارهای تحلیل شده بین ۱/۱ تا ۱/۲۷ متغیر است که می تواند تابع ضخامت رویه، مقاومت رویه و وجه تقویت باشد. بنابراین ملاحظه می شود که در صورتی که مقاومت درون صفحه رویه و مصالح بنایی به طور جداگانه با هم جمع شود، مقدار حاصل کمتر از مقاومت درون صفحه پانل تقویت شده است که در جهت اطمینان می باشد.

جدول ۵: مقاومت نهایی نمونه های مورد بررسی و اجزا آنها

نمونه	مقاومت نهایی پانل تقویت شده (kN)	مقاومت نهایی مصالح بنایی (kN)	مقاومت نهایی رویه بتنی به تنهایی (kN)	مقاومت مصالح بنایی + مقاومت رویه بتنی (kN)	نسبت مقاومت حاصل از تحلیل پانل تقویت شده به مقدار حاصل از مجموع مقاومت مصالح بنایی و رویه بتنی
S15-T25	۱۹۰/۷	۳۱/۶	۱۱۸/۷	۱۵۰/۳	۱/۲۷
S25-T25	۲۳۴/۷	۳۱/۶	۱۶۰	۱۹۱/۶	۱/۲۲
S15-T40	۲۶۰/۴	۳۱/۶	۱۸۷/۳	۲۱۸/۹	۱/۱۹
S25-T40	۳۳۰	۳۱/۶	۲۵۷/۶	۲۸۹/۲	۱/۱۴
S15-O25	۱۰۲	۳۱/۶	۵۹/۳۵	۹۰/۹۵	۱/۱۲
S25-O25	۱۲۸/۴	۳۱/۶	۸۰	۱۱۱/۶	۱/۱۵

۶- نتیجه گیری

در این مقاله یک روش مدل سازی میکرو برای دیوارهای آجری تقویت شده توسط رویه بتن الیافی فولادی به عنوان روشی کاربردی برای تقویت درون صفحه دیوارهای آجری غیرمسلح، در نرم افزار اجزا محدود ABAQUS ارائه شده است. نتایج حاصل از تحلیل های انجام شده شامل مقاومت نهایی درون صفحه، منحنی نیرو جابجایی و شکل زوال و مقایسه آن با نتایج آزمایشگاهی نشان می دهد که این روش مدل سازی برای دیوارهای بنایی غیر مسلح و دیوارهای تقویت شده توسط رویه بتن الیافی دقت قابل قبولی دارد. با توجه به رویکرد مدل سازی میکرو دقیق به سادگی می توان با استفاده از این شیوه مدل سازی اثر عوامل مختلف هندسی و مکانیکی بر رفتار و مقاومت نهایی درون صفحه دیوارهای آجری تقویت شده توسط رویه بتن الیافی را در ابعاد آزمایشگاهی و نمونه های واقعی بررسی نمود. بدین ترتیب در ادامه از مدل تهیه شده به منظور بررسی تاثیر پارامترهایی نظیر مقدار الیاف در بتن رویه، ضخامت بتن رویه و وجه تقویت شده پانل بر مقاومت درون صفحه پانل های مصالح بنایی تقویت شده توسط رویه بتن الیافی استفاده شده است که خلاصه نتایج به شرح زیر می باشد:

- افزودن الیاف به بتن رویه نسبت به نمونه تقویت شده توسط بتن رویه معمولی منجر به رفتار نسبتا شکل پذیرتر نمونه و همچنین افزایش مقاومت درون صفحه پانل مصالح بنایی می شود.
- با افزایش میزان الیاف موجود در بتن رویه، مقاومت درون صفحه پانل افزایش می یابد. به طوری که با افزایش مقدار الیاف از ۱۵ به ۲۵ کیلوگرم در هر مترمکعب بتن رویه، مقاومت درون صفحه بین ۲۳ تا ۲۷ درصد افزایش می یابد.
- ضخامت بتن رویه تاثیر مستقیمی بر مقاومت برشی درون صفحه پانل ها دارد. به طوری که با افزایش ضخامت رویه بتن الیافی از ۲۵ به ۴۰ میلی متر مقاومت درون صفحه حدود ۸۳ درصد افزایش می یابد.
- همانگونه که ملاحظه می شود، با افزایش نسبت مشابه میزان الیاف و ضخامت رویه، این ضخامت رویه بتنی است که در افزایش مقاومت درون صفحه پانل های تقویت شده موثرتر است.
- مقاومت درون صفحه بدست آمده از تحلیل برای پانل های مصالح بنایی تقویت شده با مجموع مقاومت درون صفحه مصالح بنایی و رویه بتنی به تنهایی مقایسه شده است. نتایج حاصل از این مقایسه نشان می دهد که روش مرسوم و ساده محاسبه مقاومت درون صفحه پانل های تقویت شده با استفاده از مجموع مقاومت مصالح بنایی و بتن رویه در جهت اطمینان می باشد.

مراجع

- [1] El Gawady, M., Lestuzzi, P. and Badoux, M. (2004). A review of conventional seismic retrofitting techniques for URM. In: 13th International Brick and Block Masonry Conference. Amsterdam.
- [2] Karantoni, F.V. and Frardis, M.N. (1992). Effectiveness of seismic strengthening techniques for masonry buildings. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 118 (7), 1884-1902.
- [3] El Gawady, M., Lestuzzi, P. and Badoux, M. (2006). Retrofitting of Masonry Walls Using Shotcrete. In: NZSEE Conference.
- [4] Kadam, S.B., Singh, Y. and Li, B. (2014). Strengthening of unreinforced masonry using welded wire mesh and micro-concrete– Behaviour under in-plane action. *Construction and building materials*, 54, 247-257.
- [5] El Gawady, M., Lestuzzi, P. and Badoux, M. (2006). Aseismic retrofitting of unreinforced masonry walls using FRP. *Composites- Part B: Engineering*, 37, 148-162.
- [6] Spinella, N., Colajanni, P. and Recupero, A. (2014). Experimental in situ behaviour of unreinforced masonry elements retrofitted by pre-tensioned stainless steel ribbons. *Construction and building materials*, 73, 740-753.
- [7] Bencardino, F., Rizzuti, L. and Spadea, G. and Swamy, R.N. (2008). Stress-Strain Behavior of Steel Fiber-Reinforced Concrete in Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 20 (3), 255-263.
- [8] Naaman, A.E. (2003). Strain hardening and deflection hardening fiber reinforced cement composites. In: RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 95-113.
- [9] Nataraja, M.C., Dhang, N. and Gupta, A.P. (1999). Stress-strain curves for steel fiber reinforced concrete under compression. *Cement & Concrete Composites*, 21, 383-390
- [10] Khajehpour, M. (2015). Experimental study on in-plane behavior of unreinforced masonry walls retrofitted by fiber reinforced concrete. M.Sc. Thesis, Shiraz University of Technology, Iran.
- [11] Lin, Y.W., Biggs, D., Wotherspoon, L. and Ingham, J.M. (2014). In-plane strengthening of unreinforced concrete masonry wallets using ECC shotcrete. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 140 (11), 255-263.
- [12] Lin, Y.W., Wotherspoon, L., Scott, A. and Ingham, J.M. (2014). In-plane strengthening of clay brick unreinforced masonry wallets using ECC shotcrete. *Engineering Structures*, 66, 57-65.
- [13] Sevil, T., Baran, M., Bilir, T. and Canbay, E.; (2011) “Use of steel fiber reinforced mortar for seismic strengthening”; *Construction and building materials*, 25, 892-899.
- [14] Kyriakides, M.A. and Billington, S.L. (2014). Behavior of unreinforced masonry prisms and beams retrofitted with engineered cementitious composites. *Materials and Structures*, 47, 1573-1587.
- [15] Dehghani, A., Nateghi-Alahi, F. and Fischer, G. (2015). Engineered cementitious composites for strengthening masonry infilled reinforced concrete frames. *Engineering Structures*, 105, 197-208.
- [16] Fantilli, A.P., Mihashi, H. and Villini, P. (2009). Multiple cracking and strain hardening in fiber-reinforced concrete under uniaxial tension. *Cement and Concrete Research*, 39, 1217-1229.
- [17] Page, A.W.; (1978). Finite element model for masonry. *Journal of the Structural Division, ASCE*, ST8, 1267-1285.
- [18] Lourenço, P.B., Rots, J.G. (1997). Multisurface interface model for analysis of masonry structures. *Journal of Structural Engineering (ASCE)*, 123 (7), 660-668.
- [19] Giordane, E., Mele, E. and De Luca A. (2002). Modelling of historical masonry structures: comparison of different approaches through a case study. *Engineering Structures*, 24, 1057-1069.
- [20] Maheri, M.R., Najafgholipour, M.A. and Rahabi, A.R. (2011). The influence of mortar headjoints on the in-plane and out-of-plane seismic strength of brick masonry walls. *Iranian Journal of Science and Technology*, 35 (C1), 63-79.
- [21] Najafgholipour, M.A., Maheri, M.R. and Lourenço, P.B. (2013). Capacity interaction in brick masonry under simultaneous in-plane and out-of-plane loads. *Construction and building materials*, 38, 619-626.
- [22] Lee, J. and Fenves, G.L. (1998). Plastic damage model for cyclic loading of concrete structures. *Journal of Engineering Mechanics (ASCE)*, 124 (8), 892-900.
- [23] ABAQUS Analysis user's manual 6.10-EF, (2010). Dassault Systems Simulia Corp., Providence, RI, USA.
- [24] Hognestad, E. (1955). A study of combined bending and axial load in reinforced concrete members. University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin No. 399.
- [25] Kaushik, H.B., Durgesh, C.R. and Sudhir K.J. (2007). Stress-Strain Characteristics of Clay Brick Masonry under Uniaxial Compression. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 19 (9), 728-739.
- [26] Meskenas, A. (2011). Stress strain analysis of steel fiber reinforced concrete members. M.Sc. Thesis.

- [27] Tan, K.H. and Mansur, M.A. (1990). Shear Transfer in Reinforced Fiber Concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering (ASCE)*, 2 (4), 202-214.
- [28] Najafgholipour, M.A. (2007). The effect of lack of mortar in head joints on the in-plane shear strength of unreinforced brick walls, M.Sc. Thesis, Shiraz University, Iran.
- [29] Mazroi, A., Yaghoobifar, A., Majedi Ardakani, M.H., Zeidabadi Nejad, E., and Jafarpour, F. (2012) Experimental study of mechanical properties of common sand and cement mortar (for masonry), Research Report, BHRC Publication, Tehran, Iran.
- [30] Tasnimi, A.A (2007) Behavior of brick walls recommended by Standard 2800, Research Report, BHRC Publication, Tehran, Iran.