



# Journal of Structural and Construction Engineering

www.jsce.ir



## Development of William-Warnke failure criteria parameters based on experimental studies of scaled masonry materials

Houman Fazeli<sup>1</sup>, Esmaeel Izadi Zamanabadi<sup>2\*</sup>, Seyed Jalil Hosseini<sup>2</sup>

1- Ph.D. Candidate, Civil Engineering Department, Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

2- Assistant Professor, Civil Engineering Department Najafabad Branch, Islamic Azad University, Najafabad, Iran.

### ABSTRACT

*Due to the great importance of traditional structures and masonry materials and their high application, the effective parameters in the load-bearing capacity of these structural forms should be examined. In order to study the behaviour of building materials in traditional buildings and structures, due to the high cost and time-consuming laboratory studies, it is necessary to use software methods with accurate failure criteria. To achieve more acceptable and realistic results in the analysis of brick masonry structures, the Willam-Warnke fracture criterion, which is specific to brittle materials, is generally used. In this paper, the aim is to obtain the Willam-Warnke fracture criterion parameters for the combination of brick and mortar materials in macro modelling. For this purpose, with the help of laboratory studies on the combined materials of brick and mortar, the mechanical properties of these materials have been obtained. Finally, in order to validate the obtained parameters, these parameters were included in the numerical modelling of a semi-circular arch of building materials and compared with laboratory results. The results show that the developed parameters of Willam-Warnke fracture criterion predict the behaviour of building materials with a maximum error of about ten percent and a suitable and acceptable agreement is observed between the results of the analytical and laboratory model.*

### ARTICLE INFO

**Receive Date:** 20 February 2022

**Revise Date:** 16 April 2022

**Accept Date:** 07 May 2022

### Keywords:

*Masonry materials*

*Finite elements*

*William-warnke criterion*

*Semi-circular arch*

*Experimental study*

All rights reserved to Iranian Society of Structural Engineering.

doi: <https://doi.org/10.22065/jsce.2022.329426.2730>

\*Corresponding author: Esmaeel Izadi Zamanabadi.

Email address: e.izadi@pci.iaun.ac.ir

## توسعه‌ی پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک بر اساس مطالعات آزمایشگاهی مصالح بنایی مقیاس شده

هومان فاضلی<sup>۱</sup>، اسماعیل ایزدی زمان آبادی<sup>۲\*</sup>، سید جلیل حسینی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی دکتری سازه، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۲- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

۳- استادیار، گروه مهندسی عمران، واحد نجف آباد، دانشگاه آزاد اسلامی، نجف آباد، ایران.

### چکیده

با توجه به اهمیت زیاد سازه‌های سنتی و مصالح بنایی و کاربرد زیاد آن‌ها، می‌بایست پارامترهای اثرگذار در باربری این فرم‌های سازه‌ای مورد بررسی قرار گیرد. برای بررسی رفتار مصالح بنایی در ساختمان‌های بنایی و سازه‌های سنتی با توجه به پرهزینه بودن و زمان بر بودن مطالعات آزمایشگاهی لزوم استفاده از روش‌های نرم افزاری با معیار شکست دقیق حائز اهمیت می‌باشد. برای رسیدن به نتایج قابل قبول و واقعی‌تر در تحلیل سازه‌های مصالح بنایی آجری عموماً از معیار شکست ویلام-وارنک که مخصوص مصالح ترد و شکننده است استفاده می‌شود. در این مقاله هدف به‌دست آوردن پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک برای ترکیب مصالح آجر و ملات در مدل‌سازی ماکرو می‌باشد. بدین منظور به کمک مطالعات آزمایشگاهی روی مصالح ترکیبی آجر و ملات خصوصیات مکانیکی این مصالح به‌دست آمده است، در ادامه بر مبنای روابط تفوریک پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک بر اساس نتایج آزمایشات ترکیبی آجر-ملات محاسبه شده است. در نهایت به منظور صحت‌سنجی پارامترهای بدست آمده، این پارامترها در مدل‌سازی عددی یک قوس نیم‌دایره مصالح بنایی وارد شده و با نتایج آزمایشگاهی مقایسه شده است. نتایج تحقیق نشان می‌دهد پارامترهای توسعه‌یافته‌ی معیار شکست ویلام-وارنک با حداکثر خطای حدود ده درصد رفتار مصالح بنایی را پیش‌بینی کرده و انطباق مناسب و قابل قبولی بین نتایج مدل تحلیلی و آزمایشگاهی مشاهده می‌شود.

کلمات کلیدی: مصالح بنایی، المان محدود، معیار شکست ویلام-وارنک، قوس نیم‌دایره، مطالعه‌ی آزمایشگاهی.

شناسه دیجیتال:		سابقه مقاله:				
doi:	<a href="https://doi.org/10.22065/jsce.2022.329426.2730">https://doi.org/10.22065/jsce.2022.329426.2730</a>	چاپ	انتشار آنلاین	پذیرش	بازنگری	دریافت
	10.22065/jsce.2022.329426.2730	۱۴۰۱/۱۱/۳۰	۱۴۰۱/۰۲/۱۷	۱۴۰۱/۰۲/۱۷	۱۴۰۱/۰۱/۲۷	۱۴۰۰/۱۲/۰۱
اسماعیل ایزدی زمان آبادی e.izadi@pci.iaun.ac.ir					*نویسنده مسئول: پست الکترونیکی:	

۱- مقدمه

مصالح به کاررفته در بناهای تاریخی، متشکل از آجر، بلوک و یا سنگ که با یک ماده پیوند دهنده معمولاً ملات می‌باشد. آجر و بلوک‌ها از گل پخته، کلسیم سیلیکات و یا بتن ساخته شده است. ملات به کاررفته در این بناها شامل گل رس، انواع ملات ساروج، ملات گچ، گچ و خاک و غیره می‌باشد. مدل‌های مناسب برای مصالح بنایی در صورتی قابل استفاده هستند که خصوصیات کاملی از این مصالح در دسترس باشد، اغلب اوقات این حالت اتفاق نمی‌افتد چرا که اطلاعات تجربی و آزمایشگاهی مناسب از پارامترهای عددی، کمیاب می‌باشند. آنالیز سازه‌های مصالح بنایی که از تعداد زیادی از واحدها (آجر، سنگ) و اتصال‌های بین آنها تشکیل شده باشند بهتر است به وسیله‌ی ماکرو مدل‌ها انجام گیرد. در مدل‌سازی ماکرو، آجر و ملات به‌عنوان یک مجموعه‌ی پیوسته در نظر گرفته می‌شوند. بنابراین هنگامی که از ماکرو مدل‌ها استفاده می‌شود فرض می‌گردد که سازه، بارگذاری و شرایط مرزی به صورتی هستند که انفصال و گسستگی بین ملات و واحدها رخ نخواهد داد. این نکته مهم است که یک مکانیزم شکست قابل قبول برای این مجموعه، ترکیبی (ترکیب واحدها و ملات) ارائه شود. زمینه کاربرد ماکرو مدل‌ها سازه‌هایی هستند که تحت یک سری بارها و شرایط مرزی قرار دارند. این بارها و شرایط مرزی باید تنش و کرنشی را که در مقیاس بزرگ به صورت پیوسته در نظر گرفته می‌شوند ارضاء نمایند. در این مجموعه از مصالح بنایی باید رابطه‌ای بین تنش‌ها و کرنش‌های متوسط نیز برقرار شود و مورد استفاده قرار گیرد. در اینجا حتی اگر واحدها و ملات هر کدام دارای خواص ایزوتروپیک باشند، نحوه‌ی قرارگیری و شکل هندسی مجموع آنها باعث بروز یک رفتار غیرایزوتروپیک می‌گردد. به هر حال برای شبیه‌سازی مصالح بنایی در مقیاس ماکروسکوپی یک ابزار عددی منطقی برای مدل‌های پلاستیک غیر ایزوتروپیک مورد نیاز است [۱]. وقتی که اندازه‌ی واحدها در مقایسه با اعضای سازه‌ای کوچک باشند، فرضیه‌ی یک جسم پیوسته به جای حالت گسسته قابل قبول به نظر می‌رسد. در این حالت وقتی که مصالح بصورت مصالح ترکیبی غیر ایزوتروپیک با یک رابطه‌ی تنش-کرنش معادل رفتار می‌کنند یک روش متفاوت برای مدل‌سازی به کار گرفته می‌شود. این روش به نام مدل‌سازی ماکرو شناخته شده است. در این روش برای آسان کردن طراحی و آنالیز، خصوصیات مصالح در سرتاسر عضو سازه‌ای، ایزوتروپیک فرض می‌شود [۲]. به منظور توصیف کامل مصالح بنایی از جمله معیاری عمومی برای شکست این مصالح با استفاده از آزمایش‌های متعدد از قبیل توسعه آزمایش‌های دو محوری، کاری طاقت فرسا است؛ از این رو یکی از متداول‌ترین معیار شکست‌های مورد استفاده در روش المان محدود برای مدل کردن مصالح بنایی، معیار ویلام-وارنک<sup>۱</sup> است. مدل ویلام-وارنک اساساً برای پیش‌بینی شکست در مصالح ترد و نیمه ترد ایجاد شده است. این مدل هر دو مود شکست شامل شکست خوردگی درکشش و خردشدگی یا لهیدگی در فشار را در محاسبات وارد می‌کند. هاقز<sup>۲</sup> و کیچینگ<sup>۳</sup> [۳]، میلانی<sup>۴</sup> و ترالی<sup>۵</sup> [۴]، به بررسی نحوه‌ی شکست و تنش ایجاد شده در ملات به کار رفته بین آجرها در یک سازه به صورت برشی و کششی و حدس روابط تنش-کرنش در این حالت پرداختند. مصالح بنایی ممکن است ترکیبی از واحدها و ملات زمینه غیر الاستیک آن به عنوان یک نوع مصالح به نظر برسند. لورنسو و همکاران<sup>۶</sup> [۵]، و کورانی<sup>۷</sup> [۲]، به بررسی حالت‌های مختلف بارگذاری و ایجاد تنش در دیوارهای آجری و چگونگی تأثیر چیدمان آجرها در رسیدن به تنش نهایی پرداختند. آستریز و زامیتز، روشی را جهت آنالیز ماکروسکوپی غیرخطی برای دیوارهای بنایی غیرمسلح تحت تنش دو محوری با استفاده از شیوه المان محدود پیشنهاد نموده‌اند؛ یکی از مزیت‌های مدل پیشنهادی، استفاده از مدل معادل مصالح آجر-ملات است که هم شامل خصوصیات آجر و هم تأثیر ملات می‌شود. این بدان معنی است که در شبکه‌بندی المان محدود، یک المان هم شامل آجر و هم ملات است. به عبارت دیگر هر المان خصوصیات متوسط آجر و ملات را با هم دارد. فلسفه این روش تعریف و تشخیص یک سطح شکست کلی غیر ایزوتروپیک برای مصالح بنایی است [۶]. حجازی و مهدی‌زاده سراج، پس از به دست آوردن مشخصات مکانیکی مصالح به بررسی تأثیر چیدمان آجرها در رسیدن به تنش نهایی و ایجاد تنش در دیوارهای آجری پرداختند. مطالعات انجام شده نشان داد که در قوس‌های نیم‌دایره‌ای با دهانه کوچک‌تر عملکرد قوس‌های ضربی در بیشتر حالت‌ها نسبت به قوس‌های رومی بهتر است ولی با افزایش طول

<sup>1</sup> Willam-Warnke

<sup>2</sup> T. Hughes

<sup>3</sup> N. Kitching

<sup>4</sup> G. Milani

<sup>5</sup> A. Tralli

<sup>6</sup> P. B. Lourenco et al

<sup>7</sup> Y. Korany

دهانه از برتری عملکرد قوس‌های ضربی کاسته می‌شود [۷]. محمد و همکاران<sup>۸</sup>، به بررسی اثر درجه‌بندی ماسه بر مقاومت ملات آهک پرداختند. در این تحقیق دو نوع ملات با درصد ماسه‌های مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج این تحقیق نشان داد که ملات ساخته شده با درجه‌بندی درشت‌دانه مقاومت فشاری و سختی بیشتر نسبت به ملات با دانه‌بندی ریزتر دارد. همچنین این تحقیق نشان داد که بین سختی و مقاومت فشاری یک رابطه‌ی خطی وجود دارد [۸]. حجازی و مؤیدیان رفتار تنش-کرنش مصالح بنایی آجری مقیاس شده با ملات گچ و سیمان را مورد بررسی قرار دادند و روابط جدیدی برای تنش-کرنش برای این مصالح ارائه دادند. این روابط با استفاده از نتایج مطالعات آزمایشگاهی بر روی نمونه‌های با مقیاس ۱:۴ و ۱:۶ بر اساس دو استاندارد متفاوت حاصل شده است [۹]. درجی و همکاران<sup>۹</sup> مقاومت پل‌های مصالح بنایی قوسی شکل با قدمت بیش از صد سال در کشور استرالیا که به طور معمول در معرض عبور قطار می‌باشند را مورد بررسی قرار دادند. بدین منظور آزمایش‌های متفاوتی روی نمونه‌های گرفته شده جهت ارزیابی مقاومت کششی و فشاری و سایر خصوصیات مکانیکی انجام داده و به این نتیجه رسیدند که مصالح بنایی سنتی به کار برده شده در پل‌های قوسی شکل دارای مقاومت بیشتری نسبت به آنچه که قبلاً تصور می‌شده هستند [۱۰]. گانون<sup>۱۰</sup> و سایوز<sup>۱۱</sup> یک پل قوسی شکل سنگی مصالح بنایی را به کمک مدل‌سازی المان محدود مورد ارزیابی لرزه‌ای قرار دادند. در این مطالعه مجموعه‌ای از تحلیل‌های استاتیکی غیرخطی، دینامیکی غیرخطی و دینامیکی غیرخطی فزاینده انجام شده است. نتایج مطالعات نشان داد که به کارگیری روش استاتیکی غیرخطی با محدودیت‌هایی همراه است در حالی که تحلیل دینامیکی فزاینده تصویر کاملی از رفتار لرزه‌ای را نشان می‌دهد. همچنین بر ضرورت در نظر گرفتن اثرات متقابل مؤلفه‌های افقی و عمودی رکوردهای زلزله در تحلیل دینامیکی غیرخطی تأکید کردند [۱۱]. دمیرل<sup>۱۲</sup> و آلدمیر<sup>۱۳</sup> عملکرد لرزه‌ای پل‌های قوسی مصالح بنایی با اتصالات خشک را مورد بررسی و ارزیابی قرار دادند و به این نتیجه رسیدند که عملکرد لرزه‌ای خاص اینگونه قوس‌های مصالح بنایی و مشخصات سازه‌ای منحصر بفرد آن‌ها به‌طور عمده به ظرفیت مصالح بستگی ندارد و بیشتر به دوران یا حرکت لغزشی وجه مشترک بین آجرهای مجاور هم بستگی دارد. همچنین یک روش ترکیبی شامل تحلیل اجزاء محدود به روش میکرو با اصول روش تحلیل حدی جهت ارزیابی عملکرد لرزه‌ای اینگونه سازه‌های قوسی شکل ارائه کردند [۱۲]. جهانگیر و اصفهانی با مطالعات آزمایشگاهی رفتار و وضعیت پیوند بین ملات مرکب گروت تقویت شده با فولاد که در لایه‌ی بین مصالح بنایی به کار برده شده است را مورد ارزیابی قرار دادند. نتایج آزمایش‌ها نشان داد که مود دوم شکست برای کلیه‌ی نمونه‌های آزمایشگاهی مود غالب است و اثر طول پیوند بیشتر از ۱۵۰ میلی‌متر می‌باشد. همچنین مود شکست مصالح بنایی با نوارهای کامپوزیتی مورد مطالعه با طول پیوند کمتر از ۱۵۰ میلی‌متر با جداسازی لایه‌ی زمینه‌ی بالای کامپوزیت از لایه‌ی پایین قابل تشخیص خواهد بود [۱۳]. تحقیقات انجام شده نشان می‌دهد پارامترهای معیار شکست جهت مدل‌سازی المان محدود دارای اهمیت بسیار زیادی در رسیدن به نتایج واقعی‌تر می‌باشد، بنابراین لازم است با استفاده از آزمایش‌های دقیق مصالح مشخصات مکانیکی مصالح را به‌دست آورده و پارامترهای معیار شکست را استخراج نمود. در این مطالعه در گام اول با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی، مشخصات مکانیکی مصالح استخراج شده است. در ادامه بر مبنای نتایج آزمایشگاهی پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک محاسبه شده است. به منظور صحت‌سنجی پارامترهای محاسبه قوس نیم‌دایره مصالح بنایی مقیاس شده با سه عدد فراوانی در آزمایشگاه ساخته شده و تحت بار ثقلی در وسط دهانه مورد آزمایش قرار گرفته است و نتایج این سه آزمایش با نتایج بدست آمده از مدل‌سازی عددی قوس نیم‌دایره با استفاده از پارامترهای توسعه یافته‌ی معیار شکست ویلام-وارنک مقایسه شده است، تحلیل نمونه‌ها با نرم افزار اجزاء محدود ANSYS، انجام شده است.

## ۲- خصوصیات مکانیکی مصالح بنایی

برای اطلاع از خصوصیات مکانیکی مصالح جهت استخراج پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک، آزمایش نمونه‌های با مصالح ترکیبی آجر و ملات بر اساس آیین‌نامه‌ی انگلستان صورت گرفته است؛ این آزمایش‌ها عبارتند از: آزمایش نسبت آب به گچ، وزن مخصوص،

<sup>8</sup> A. Mohammed et al

<sup>9</sup> Dorji et al

<sup>10</sup> Gonen

<sup>11</sup> Soyoz

<sup>12</sup> Demirel

<sup>13</sup> Aldemir

آزمایش مقاومت فشاری<sup>۱۴</sup>، آزمایش تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون، آزمایش مقاومت خمشی<sup>۱۵</sup> با حالت بارگذاری عمود بر درز ملات، آزمایش مقاومت خمشی با حالت بارگذاری به موازات درز ملات. مقاومت خمشی در حقیقت مقاومت کششی در کشش ناشی از خمش است که با آزمایش خمشی چهار نقطه‌ای<sup>۱۶</sup> بر روی نمونه‌ها انجام می‌شود.

## ۱-۲ آزمایش وزن مخصوص

مطابق شکل ۱ برای به دست آوردن وزن مخصوص ترکیب آجر و ملات حداقل سه نمونه دیوار<sup>۱۷</sup> مصالح بنایی در آزمایشگاه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته است، نتیجه‌ی آزمایش‌ها جرم حجمی نمونه ترکیب آجر و ملات است که ۱۶۲۲/۷۵ کیلوگرم بر متر مکعب می‌باشد.



شکل ۱: آزمایش وزن مخصوص ترکیب آجر و گچ

## ۲-۲ آزمایش نسبت آب به گچ، مقاومت فشاری، تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون

مطابق شکل ۲ حداقل چهار نمونه دیوار مصالح بنایی مطابق استاندارد انگلستان [۱۴]، ساخته شده است، اندازه و مشخصات نمونه‌های ساخته شده مطابق استاندارد در جدول ۱ آمده است. مطابق شکل ۳ و شکل ۴ نمونه‌های ساخته شده برای تعیین مقاومت فشاری، مدول الاستیسیته و نسبت پواسون واحد دیوار مصالح بنایی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. نتیجه‌ی این آزمایش‌ها نسبت آب به گچ، مقاومت فشاری، مدول یانگ و نسبت پواسون مصالح ترکیب آجر و ملات است که به ترتیب ۰/۶۶، ۶/۶۴ مگاپاسکال، ۶۶۹/۳۷ مگاپاسکال و ۰/۱۷ می‌باشد.



(ب)



(الف)

شکل ۲: نمونه‌ی ترکیبی آجر و ملات جهت آزمایش مقاومت فشاری [۱۴]، (الف) پارامترهای هندسی، (ب) نمونه‌ی ساخته شده در آزمایشگاه

<sup>14</sup> Compressive Strength

<sup>15</sup> Flexural Strength

<sup>16</sup> Four-Point Flexural Strength

<sup>17</sup> Wallete

جدول ۱: مشخصات هندسی نمونه‌های ترکیبی آجر و ملات

$h_s$ (mm)	$t_m$ (mm)	$l_s$ (mm)	$t_s$ (mm)	$h_u$ (mm)	استاندارد	تعداد	نوع آزمایش
-	-	-	-	-	BS.EN.1052-1	۴	نسبت آب به گچ
۹۵	۲/۵	۱۱۴/۵	۲۶	۱۷	BS.EN.1052-1	۴	مقاومت فشاری
۹۵	۲/۵	۱۱۴/۵	۲۶	۱۷	BS.EN.1052-1	۴	مدول الاستیسیته و ضریب پواسون



(ج)

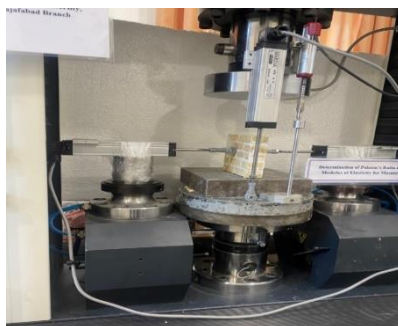


(ب)

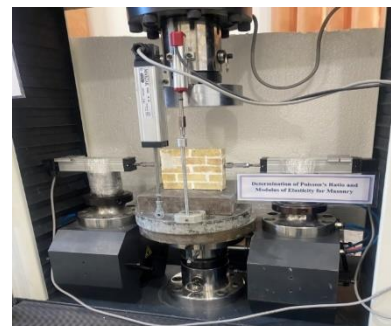


(الف)

شکل ۳: آزمایش مقاومت فشاری، الف) نمونه و تنظیمات دستگاه قبل از آزمایش، ب) نمونه بعد از آزمایش، ج) چهار عدد نمونه‌ی آزمایش شده



(ب)

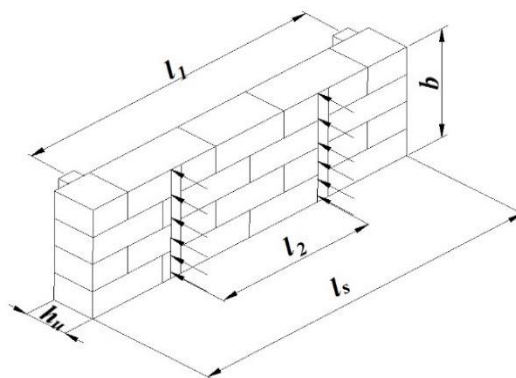
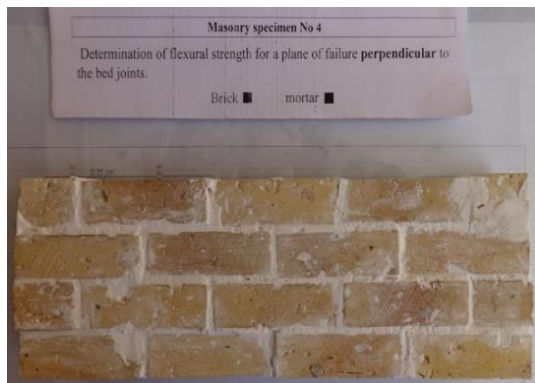


(الف)

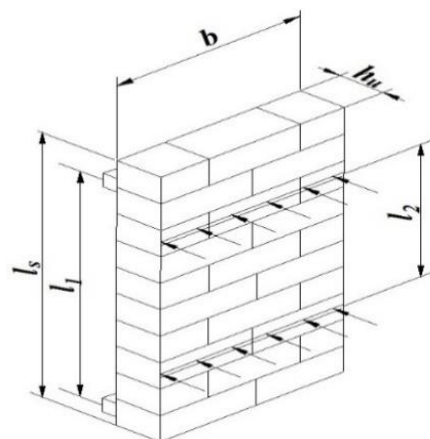
شکل ۴: آزمایش تعیین مدول الاستیسیته و نسبت پواسون، الف) جهت X، ب) جهت Y

## ۲-۳ آزمایش مقاومت خمشی با حالت بارگذاری عمود بر درز ملات و به موازات درز ملات

مطابق شکل ۵ حداقل شش نمونه دیوار مصالح بنایی مطابق استاندارد انگلستان [۱۵]، ساخته شده، اندازه و مشخصات نمونه‌های ساخته شده مطابق آیین نامه در جدول ۲ آمده است. نمونه‌های ساخته شده مطابق شکل ۶ و شکل ۷ برای تعیین مقاومت خمشی و کششی واحد دیوار مصالح بنایی مورد آزمایش قرار گرفته‌اند.



(الف)



(ب)

شکل ۵: آزمایش مقاومت خمشی [۱۵]، (الف) حالت بارگذاری عمود بر درز ملات، (ب) حالت بارگذاری به موازات درز ملات

جدول ۲: مشخصات هندسی نمونه‌های ترکیبی آجر و ملات جهت آزمایش مقاومت خمشی با حالت بارگذاری عمود بر درز ملات مطابق آیین نامه

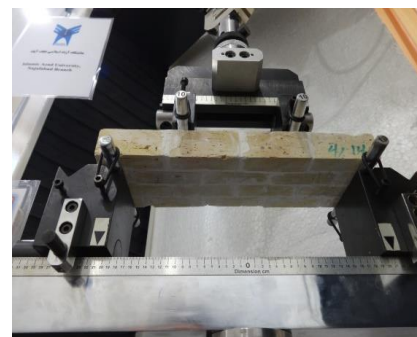
$b$ (mm)	$l_1$ (mm)	$l_2$ (mm)	$l_s$ (mm)	$h_u$ (mm)	استاندارد	تعداد	نوع آزمایش
۷۵/۵	۲۱۰	۱۰۰	۲۳۱/۵	۲۶	BS.EN.1052-2	۶	مقاومت خمشی عمود بر درز ملات
۱۱۴/۵	۱۷۰	۹۰	۱۹۲/۵	۲۶	BS.EN.1052-2	۶	مقاومت خمشی به موازات درز ملات
-	-	-	-	-	BS.EN.1015-11	۶	مقاومت کششی



(ج)



(ب)

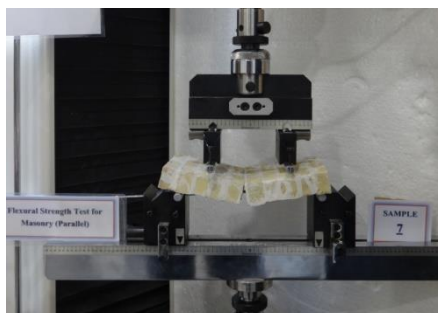


(الف)

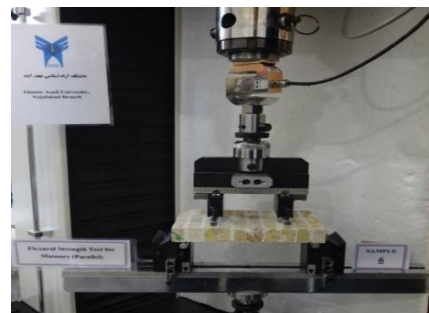
شکل ۶: آزمایش مقاومت خمشی با حالت بارگذاری عمود بر درز ملات، (الف) نمونه و تنظیمات دستگاه قبل از آزمایش، (ب) نمونه بعد از آزمایش، (ج) هفت عدد نمونه‌ی آزمایش شده



(ج)



(ب)



(الف)

شکل ۷: آزمایش مقاومت خمشی با حالت بارگذاری به موازات درز ملات، (الف) نمونه و تنظیمات دستگاه قبل از آزمایش، (ب) نمونه بعد از آزمایش، (ج) هفت عدد نمونه‌ی آزمایش شده

مطابق استاندارد دو نوع آزمایش خمش چهار نقطه‌ای با حالت بارگذاری به موازات و عمود بر درز ملات انجام شده است و نتیجه‌ی اصلی دو آزمایش خمش، مقاومت کششی غیرمستقیم ترکیب آجر و ملات است که  $1/31$  مگاپاسکال می‌باشد.

### ۳- توسعه‌ی پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک

در مدل‌سازی المان محدود مصالح بنایی و به‌منظور پیش‌بینی شکست در مصالح ترد و نیمه‌ترد یکی از متداول‌ترین معیار شکست‌های مورد استفاده، معیار شکست ویلام-وارنک است. می‌توان از معیار شکست ویلام-وارنک برای مدل‌سازی رفتار ترد آجر و از روش مدل‌سازی ماکرو برای آنالیز سازه‌های آجری استفاده کرد. این معیار شکست به دلیل حالت چند محوری از تنش، به شکل رابطه (۱) بیان می‌شود [۱۶].

$$\frac{F}{f_c} - S \geq 0 \quad (1)$$

که در رابطه‌ی (۱):

$F$ : تابعی از حالت تنش‌های اصلی

$S$ : سطح شکست برحسب تنش‌های اصلی در جهت‌های اصلی و خصوصیات مصالح  $f_t$ ,  $f_c$ ,  $f_{cb}$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  و  $\sigma_h^a$  می‌باشد.

$f_t$ : مقاومت کششی تک‌محوری

$f_c$ : مقاومت فشاری تک‌محوری

$f_{cb}$ : مقاومت فشاری دومحوری

$f_1$ : مقاومت فشاری برای حالتی از فشار دومحوری که بر روی تنش هیدرو استاتیک قرار داده می‌شود.

$f_2$ : مقاومت فشاری برای حالتی از فشار تک‌محوری که بر روی تنش هیدرو استاتیک قرار داده می‌شود.

$\sigma_h^a$ : تنش هیدرو استاتیک

اگر معیار شکست رابطه‌ی (۱) ارضاء نشود، هیچ‌گونه ترک خوردگی یا خردشدگی اتفاق نخواهد افتاد. مصالح در صورتی ترک می‌خورند که یکی از تنش‌های اصلی کششی از مقاومت کششی بیش‌تر شود و در صورتی خرد می‌شوند که همه تنش‌های اصلی فشاری از مقاومت فشاری سه محوری تجاوز کنند. باوجود پارامترهای بالا سطح شکست را می‌توان با دو پارامتر  $f_c$  و  $f_t$  محاسبه نمود و بقیه پارامترها را از روابط (۲) تا (۶) تخمین زد [۱۷].



$$f_{cb} = 1.2 f_c \quad (2)$$

$$f_1 = 1.45 f_c \quad (3)$$

$$f_2 = 1.725 f_c \quad (4)$$

$$|\sigma_h^a| \leq \sqrt{3} f_c \quad (5)$$

$$f_1 \neq 1 \rightarrow TCF = 0.6 \quad (6)$$

TCF: ضریب افزایش سختی ترک در حالت کشش.

مقادیر تخمینی قبل برای حالتی معتبر است که تنش‌های هییدرو استاتیک کم اعمال می‌شود و رابطه (5) ارضا می‌شود.

$$\sigma_h^a = \frac{1}{3}(\sigma_{xp} + \sigma_{yp} + \sigma_{zp}) \quad (7)$$

که در رابطه (7)،  $\sigma_{xp}$ ،  $\sigma_{yp}$  و  $\sigma_{zp}$ ، تنش‌های اصلی در جهات اصلی می‌باشند.

برای مواقعی که تنش هییدرو استاتیک زیاد باشد تمام پارامترهای شکست باید مشخص شوند و اگر رابطه (6) ارضا نشود مقادیر روابط (2) و (3) فرضی هستند و پارامترهای مقاومتی ممکن است به صورت نادرست ارزیابی شده باشد.

مواقعی که  $f_c = -1$  قابلیت شکست متوقف می‌شود و زمانی ماده ترک می‌خورد که هر یک از تنش‌های اصلی از تنش کششی فراتر رود. هر دو تابع  $F$  و  $S$  با عبارت‌هایی از تنش‌های اصلی  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  مطابق روابط (8) تا (10) بیان می‌شوند.

$$\sigma_1 = \max(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (8)$$

$$\sigma_3 = \min(\sigma_{xp}, \sigma_{yp}, \sigma_{zp}) \quad (9)$$

$$\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (10)$$

با توجه به مقادیر تنش‌های اصلی چهار حالت برای  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  به وجود می‌آید.

$$0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (1) \quad \sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \quad (2) \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3 \quad (3) \quad \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0 \quad (4)$$

برای هر عبارت تابع  $F$  و تابع سطح شکست  $S$  به طور مستقل تعریف می‌شوند.

چهار تابع تعریف شده به عنوان تابع عمومی  $F$  با  $F_1$  و  $F_2$  و  $F_3$  و  $F_4$  ارائه می‌شود و همچنین تابع عمومی  $S$  با  $S_1$  و  $S_2$  و  $S_3$  و  $S_4$  ارائه می‌شود.

برای حالت اول که  $0 \geq \sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  توابع  $F$  و  $S$  به صورت روابط (11) و (12) تعریف می‌شوند.

$$F = \frac{1}{\sqrt{15}} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (11)$$

$$S = \frac{2r_2(r_2^2 - r_1^2) \cos \eta + r_2(2r_1 - r_2)[4(r_2^2 - r_1^2) \cos^2 \eta + 5r_1^2 - 4r_1 r_2]^{\frac{1}{2}}}{4(r_2^2 - r_1^2) \cos^2 \eta + (r_2 - 2r_1)^2} \quad (12)$$

عبارت  $\cos \eta$  در رابطه (12) برابر است با رابطه (13) و  $r_1$  و  $r_2$  برابر است با رابطه (14) و (15)

$$\cos \eta = \frac{2\sigma_1 - \sigma_2 - \sigma_3}{\sqrt{2} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 - (\sigma_3 - \sigma_1)^2]^{\frac{1}{2}}} \quad (13)$$

$$r_1 = \partial_0 + \partial_1 \xi + \partial_2 \xi^2 \quad (14)$$

$$r_2 = b_0 + b_1 \xi + b_2 \xi^2 \quad (15)$$

که در روابط (۱۴) و (۱۵)  $\xi$  برابر است با رابطه (۱۶)

$$\xi = \frac{\sigma_h^a}{f_c} \quad (16)$$

اگر  $\sigma_3 = \sigma_2 > \sigma_1$  با جایگذاری در رابطه (۷-۱۵) مقدار  $\eta$  برابر صفر به دست می آید.

و اگر  $\sigma_3 > \sigma_2 = \sigma_1$  با جایگذاری در رابطه (۷-۱۵) مقدار  $\eta$  برابر  $60^\circ$  به دست می آید.

بنابراین  $0 \leq \eta \leq 60$  و در حالتی که  $\eta = 0$  در نتیجه  $r_1 = r_2$  و در حالتی که  $\eta = 60$  در نتیجه  $r_2 = r_1$ .

همان طور که در شکل های ۸ و ۹ نشان داده شده است صفحه سطح شکست در یک صفحه هشت ضلعی طبق زاویه مشابه  $0 \leq \eta \leq 60$  در هر قطاع  $120^\circ$  یک تناوب تقارنی دارد.

مطابق رابطه (۱۴) تابع  $r_1$  با ضرایب  $\theta_0$  و  $\theta_1$  و  $\theta_2$  تعریف می شود که این ضرایب از معادلات دوطرفه (۱۷) به دست می آید.

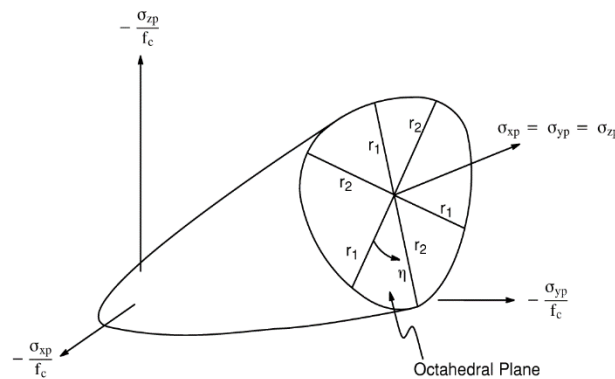
$$\begin{cases} \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = f_t, \sigma_2 = \sigma_3 = 0) \\ \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = 0, \sigma_2 = \sigma_3 = -f_{cb}) \\ \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = -\sigma_h^a, \sigma_2 = \sigma_3 = -\sigma_h^a - f_1) \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & \xi_t & \xi_t^2 \\ 1 & \xi_{cb} & \xi_{cb}^2 \\ 1 & \xi_1 & \xi_1^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_0 \\ \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} \quad (17)$$

در رابطه (۱۷) مقادیر  $\xi_t$  و  $\xi_{cb}$  و  $\xi_1$  برابر است با رابطه (۱۸)

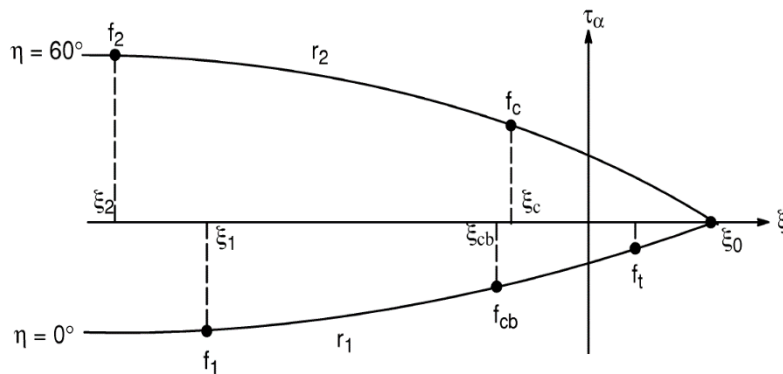
$$\xi_t = \frac{f_t}{3f_c}, \xi_{cb} = -\frac{2f_{cb}}{f_c}, \xi_1 = -\frac{\sigma_h^a}{f_c} - \frac{2f_1}{3f_c} \quad (18)$$

مطابق رابطه (۱۵) تابع  $r_2$  با ضرایب  $b_0$  و  $b_1$  و  $b_2$  تعریف می شود که این ضرایب از معادلات دوطرفه (۱۹) به دست می آید.

$$\begin{cases} \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = \sigma_2 = 0, \sigma_3 = -f_c) \\ \frac{F_1}{f_c} (\sigma_1 = \sigma_2 = -\sigma_h^a, \sigma_3 = -\sigma_h^a - f_2) \\ \frac{F_1}{f_c} (0) \end{cases} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{3} & \frac{1}{9} \\ 1 & \xi_2 & \xi_2^2 \\ 1 & \xi_0 & \xi_0^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} \quad (19)$$



شکل ۸: سطح شکست معیار ویلام-وارنک [۱۸].



شکل ۹: برش عرضی از سطح شکست [۱۸].

در رابطه (۱۹) مقدار  $\xi_2$  برابر است با رابطه (۲۰)

$$\xi_2 = -\frac{\sigma_h^a}{f_c} - \frac{f_2}{3f_c} \quad (20)$$

$\xi_0$  از جواب مثبت معادله درجه دوم رابطه (۲۷) به دست می آید.

$$r_2(\xi_0) = \partial_0 + \partial_1 \xi_0 + \partial_2 \xi_0^2 = 0 \quad (21)$$

مادامی سطح شکست به صورت محدب باقی می ماند که رابطه (۲۲) ارضا شود.

$$0.5 < \frac{r_1}{r_2} < 1.25 \quad (22)$$

ولیکن برای اکثر مواد مقدار  $\frac{r_1}{r_2} < 1$  می باشد و همچنین روابط (۲۳) و (۲۴) ارضا می شود.

$$\partial_0 > 0, \partial_1 \leq 0, \partial_2 \leq 0 \quad (23)$$

$$b_0 > 0, b_1 \leq 0, b_2 \leq 0 \quad (24)$$

برای حالت دوم که  $\sigma_1 \geq 0 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3$  توابع  $S$  و  $F$  به صورت روابط (۲۵) و (۲۶) تعریف می شوند.

$$F = F_2 = \frac{1}{\sqrt{15}} [(\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_2)^2 + (\sigma_3)^2]^{\frac{1}{2}} \quad (25)$$

$$S = S_2 \left(1 - \frac{\sigma_1}{f_t}\right) \frac{2p_2(p_2^2 - p_1^2) \cos \eta + p_2(2p_1 - p_2)[4(p_2^2 - p_1^2) \cos^2 \eta + 5p_1^2 - 4p_1 p_2]^{\frac{1}{2}}}{4(p_2^2 - p_1^2) \cos^2 \eta + (p_2 - 2p_1)^2} \quad (26)$$

عبارت  $\cos \eta$  در رابطه (۲۳) برابر است با رابطه (۱۳) و  $p_1$  و  $p_2$  برابر است با رابطه (۲۷) و (۲۸)

$$p_1 = \partial_0 + \partial_1 X + \partial_2 X^2 \quad (27)$$

$$p_2 = b_0 + b_1 X + b_2 X^2 \quad (28)$$

مطابق رابطه (۲۷) و (۲۹) تابع  $p_2$  و  $p_1$  با ضرایب  $\partial_0$  و  $\partial_1$  و  $\partial_2$  و  $b_0$  و  $b_1$  و  $b_2$  تعریف می شود که این ضرایب از معادلات دوطرفه (۱۷) و (۱۹) به دست می آید و مقدار  $X$  برابر است با:

$$X = \frac{1}{3}(\sigma_2 + \sigma_3) \quad (29)$$

اگر رابطه شکست (۱) ارضا شود ترک در صفحه عمود بر تنش  $\sigma_1$  اتفاق می افتد.

برای حالت سوم که  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq 0 \geq \sigma_3$  توابع  $S$  و  $F$  به صورت روابط (۳۰) و (۳۱) تعریف می شوند.

$$F = F_3 = \sigma_i; i = 1, 2 \quad (30)$$

$$S = S_3 = \frac{f_t}{f_c} \left(1 + \frac{\sigma_3}{f_c}\right); i = 1, 2 \quad (31)$$

اگر رابطه شکست (۱) برای هر دو  $i=1,2$  ارضا شود ترک در هر دو صفحه عمود بر  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  اتفاق می افتد و اگر رابطه شکست برای  $i=1$  ارضا شود فقط ترک در صفحه عمود بر  $\sigma_1$  اتفاق می افتد.  
برای حالت چهارم که  $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \sigma_3 \geq 0$  توابع  $F$  و  $S$  به صورت روابط (۳۲) و (۳۳) تعریف می شوند.

$$F = F_4 = \sigma_i; i = 1, 2, 3 \quad (32)$$

$$S = S_4 = \frac{f_t}{f_c} \quad (33)$$

اگر رابطه شکست برای  $i=1,2,3$  ارضا شود ترک در صفحات عمود بر جهت  $\sigma_1$ ،  $\sigma_2$  و  $\sigma_3$  اتفاق می افتد.  
اگر رابطه شکست برای  $i=1,2$  ارضا شود ترک در صفحه عمود بر جهت  $\sigma_1$  و  $\sigma_2$  اتفاق می افتد.  
اگر رابطه شکست برای  $i=1$  ارضا شود ترک در صفحه عمود بر جهت  $\sigma_1$  اتفاق می افتد [۲].  
به عنوان نتیجه ای این تحقیق خصوصیات خطی و غیرخطی مصالح که در پارامترهای معیار شکست ویلام-وارنک اعمال شده است و در مدل های المان محدود جهت آنالیز ترک مورد استفاده قرار خواهد گرفت و در جدول ۱ آمده است.

جدول ۳: پارامترهای توسعه یافته ی معیار شکست ویلام-وارنک بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی

$\beta_t$	$\beta_c$	$f_t$ (MPa)	$f_c$ (MPa)	$f_{cb}$ (MPa)	$\sigma_h^a$ (MPa)	$f_1$ (MPa)	$f_2$ (MPa)	TCF
۰/۱۵	۰/۷۵	۱/۳۱	۶/۶۴	۷/۹۶۸	۱۱/۵۰	۹/۶۳	۱۱/۴۵	۰/۶

$\beta_t$  ضریب جابجایی برشی ترک باز و  $\beta_c$  ضریب جابجایی برشی ترک بسته می باشند. به دلیل محدودیت های آزمایشگاهی امکان انجام مطالعات به منظور استخراج پارامترهای مذکور در این مطالعه وجود ندارد و لذا مقادیر بدست آمده در تحقیقات قبلی، که به ترتیب ۰/۱۵ و ۰/۷۵ می باشند مورد استفاده قرار گرفته است [۲۰ و ۱۹].

#### ۴- راستی آزمایشی پارامترهای توسعه یافته ی معیار شکست ویلام-وارنک

در این مرحله پارامترهای توسعه یافته ی معیار شکست ویلام-وارنک با استفاده از مطالعات آزمایشگاهی و تحلیلی المان محدود بر روی قوس های نیم دایره آجری با ملات گچ مورد راستی آزمایشی قرار می گیرد.

#### ۴-۱ مطالعه ی آزمایشگاهی قوس های مصالح بنایی نیم دایره $^{18}$ (SCA)

قوس مورد مطالعه قوس نیم دایره با هندسه ی شکل ۱۰- الف می باشد. قوس نیم دایره هم تزئینی و هم نیمه باربر می باشد، که نحوه ترسیم آن به شرح زیر می باشد:

۱- محور عمودی به فاصله نصف دهانه از دو ستون ترسیم می گردد.

۲- محور افقی عمود بر محور قائم رسم می شود.

۳- دو ستون از نقاط A و B به فاصله نصف دهانه از محور عمودی به موازات یکدیگر رسم می گردد.

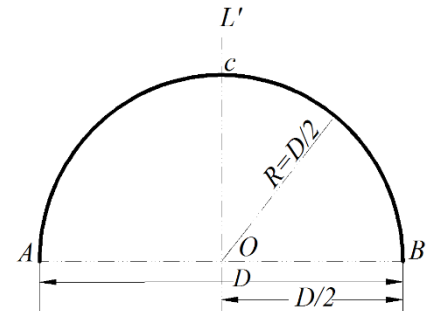
<sup>18</sup> Semi Circular Arch

۴- از نقطه O مرکز تقاطع دو محور افقی و عمودی، شعاع R به اندازه نصف دهانه از نقطه A یا B شروع و پس از عبور از نقطه C یعنی خیز، به ضلع مقابل ختم و نیم‌دایره رسم می‌شود.

ساخت نمونه‌ی کامل از قوس‌ها با توجه به محدودیت‌های آزمایشگاهی امکان‌پذیر نیست، لذا تعداد سه نمونه قوس نیم‌دایره‌ی مقیاس شده با آجرهای با مقیاس یک چهارم و ملات گچ مطابق شکل ۱۰- ب در آزمایشگاه ساخته شده است. ابعاد آجرهای برش خورده در جدول ۴ آمده است.



(ب)

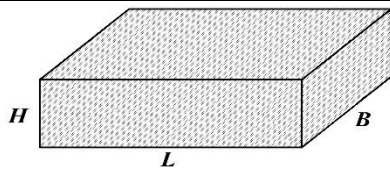


(الف)

شکل ۱۰: قوس نیم‌دایره، الف) هندسه‌ی قوس، ب) قوس‌های ساخته شده در آزمایشگاه

جدول ۴: پارامترهای توسعه یافته‌ی معیار شکست ویلام-وارنک بر مبنای مطالعات آزمایشگاهی

مقیاس	ابعاد آجر (cm)		
	ضخامت (H)	عرض (B)	طول (L)
۱:۱	۶/۸	۱۰/۴	۲۲/۴
۱:۴	۱/۷	۲/۶	۵/۶



قوس‌های نیم‌دایره با پارامترهای هندسی شکل ۱۱- الف و مشخصات هندسی جدول ۵، در آزمایشگاه با اعمال بار در وسط دهانه مطابق شکل ۱۱- ب مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. در آزمایش‌ها بار متمرکز عمودی در وسط دهانه‌ی قوس اعمال شده است. تکیه‌گاه در پایه‌ها بصورت گیردار است. بارگذاری روی هر مدل قوس با به‌کار بردن جک دستگاه یونیورسال (UTM) با ظرفیت ۲۵ تن انجام شده است. بار به‌وسیله‌ی لودسل<sup>۱۹</sup> با ظرفیت ۲/۵ تن و حساسیت بالا اندازه‌گیری شده است. پیکربندی آزمایشگاهی دارای سیستم جابجایی کنترل<sup>۲۰</sup> است. میزان تغییر مکان‌های افقی و عمودی با به‌کار بردن جابجایی سنج<sup>۲۱</sup> (LVDT) متصل به دستگاه ثبت کننده‌ی داده‌ها<sup>۲۲</sup> با دقت بسیار بالا ثبت شده است.

<sup>19</sup> Load Cell

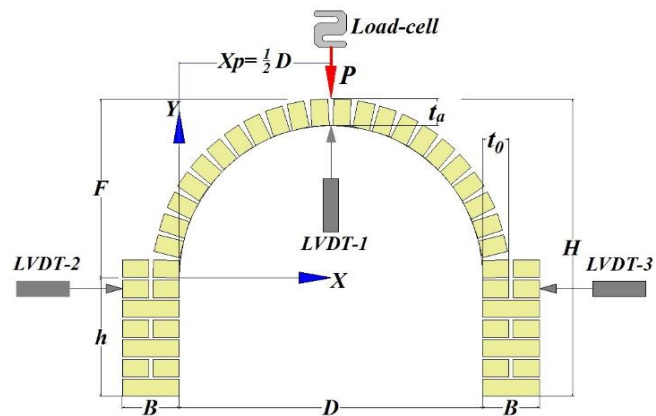
<sup>20</sup> Displacement-Control

<sup>21</sup> Linear Variable-differential Transformer

<sup>22</sup> Data Logger



(ب)



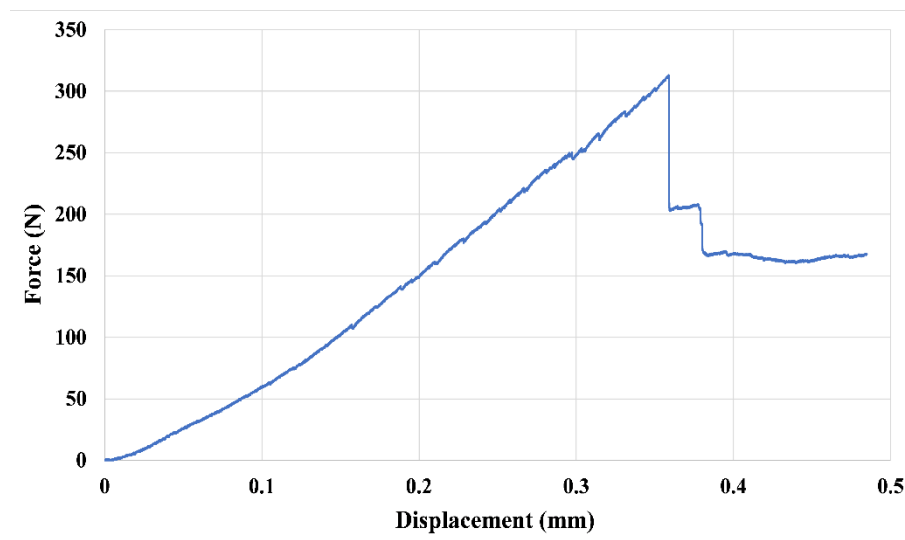
(الف)

شکل ۱۱: قوس نیم دایره، (الف) پارامترهای هندسی، (ب) پیکربندی دستگاه و نمونه در زمان آزمایش.

جدول ۵: مشخصات هندسی قوس‌های نیم دایره

$H$ (mm)	$D$ (mm)	$B$ (mm)	$h$ (mm)	$F$ (mm)	$k = \frac{t_a}{t_0}$
۲۹۳	۳۰۰	۵۶	۱۱۷	۱۷۶	۱

قوس‌های نیم دایره تحت بارگذاری قرار گرفته‌اند و مطابق با نمودارهای بار-تغییر مکان شکل ۱۲ برای این قوس‌ها، مقدار میانگین بار ماکزیمم اعمال شده تا شکست ۳۱۹/۵ نیوتن و مقدار تغییر مکان عمودی ۰/۳۶۳ میلی‌متر می‌باشد.

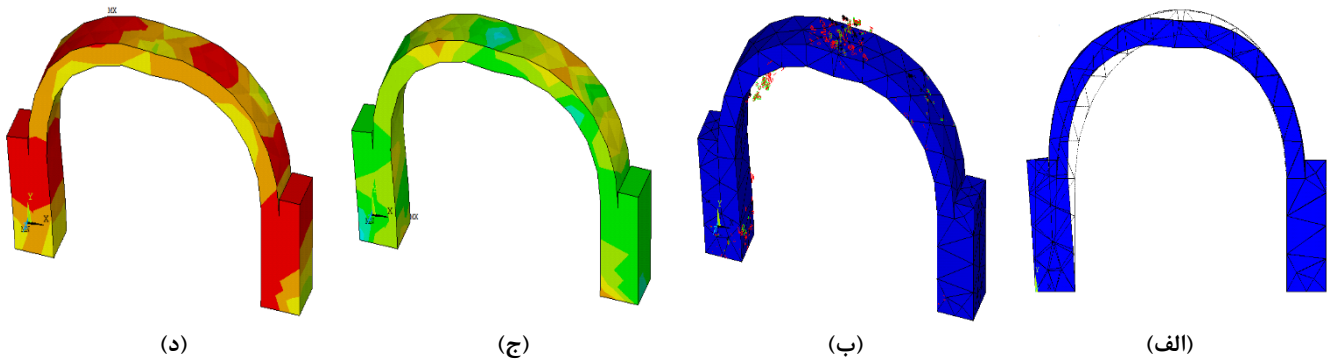


شکل ۱۲: نمودار بار - تغییر مکان قوس نیم دایره

#### ۲-۴ توسعه‌ی مدل المان محدود

یک مدل سه بعدی المان محدود برای شبیه سازی رفتار غیرخطی مصالح قوس بنایی در نرم افزار ANSYS [۲۱]، ساخته شده است. تمامی قسمت‌های نمونه‌ها با المان‌های صلب هشت نقطه‌ای و Solid65 با سه درجه آزادی در هر گره مدل شده‌اند. برای مصالح آجری از معیار شکست ویلام-وارنک و آنالیز ماکرو استفاده شده است که پارامترهای آن به وسیله نتایج آزمایشگاهی مصالح استخراج شده

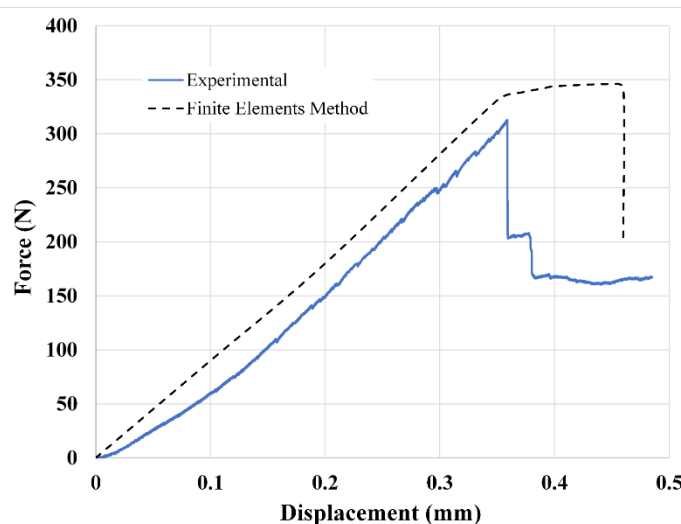
است. با بررسی همگرایی پاسخها در تحلیل‌های مختلف از تعداد کافی و مناسب المان‌ها اطمینان حاصل شده است. تعداد مش‌ها ۴۹۱ ۳۳ عدد و بارگذاری به صورت متمرکز به طرف پایین در نقطه‌ی وسط دهانه‌ی قوس اعمال می‌شود. تکیه‌گاه پایین پایه‌ها به صورت گیردار مدل می‌شود. شکل ۱۳ نتایج مدل المان محدود توسعه یافته پس از بارگذاری شامل تغییرمکان قائم، توزیع ترک، توزیع تنش اول، توزیع تنش اصلی سوم را نشان می‌دهد. مطابق شکل ۱۳ قوس‌های نیم‌دایره پس از مدل‌سازی تحت بارگذاری قائم وسط دهانه قرار گرفتند و برای این نمونه قوس‌ها مقدار بار ماکزیمم اعمال شده تا لحظه‌ی بروز اولین شکست ۳۴۶ نیوتن می‌باشد.



شکل ۱۳: آنالیز قوس نیم‌دایره تحت بارگذاری قائم، (الف) تغییرمکان قائم، (ب) توزیع ترک، (ج) توزیع تنش اصلی اول، (د) توزیع تنش اصلی سوم

#### ۴-۳ اعتبارسنجی تحلیل

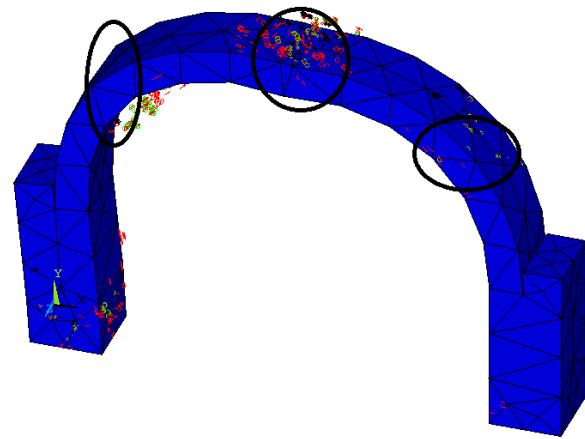
در این قسمت برای اطمینان از فرضیات و روش مدل‌سازی به اعتبارسنجی مدل اجزا محدود توسعه یافته پرداخته شده است. بدین منظور مدل المان محدود متناظر با نمونه آزمایشگاهی قوس نیم‌دایره با پارامترهای هندسی جدول ۵ در چارچوب فرضیات و روش مدل‌سازی تشریح شده در بند ۵-۲ توسعه یافته و نتایج آن با نتایج آزمایشات مورد مقایسه قرار می‌گیرد. در شکل ۱۴ منحنی رفتاری بار-تغییرمکان نمونه آزمایشگاهی و مدل اجزا محدود متناظر با یکدیگر مقایسه شده است. همانگونه که در این شکل مشاهده می‌شود انطباق مناسب و قابل قبولی بین نتایج مدل آزمایشگاهی و مدل تحلیلی توسعه یافته برقرار است. شکل ۱۵ توانایی مدل المان محدود در پیش‌بینی نقاط مستعد شکست و انطباق با مدل‌های آزمایشگاهی را نشان می‌دهد. طبق نتایج به دست آمده رفتار نمونه‌های آزمایشگاهی و نمونه‌های مشابه از تحلیل عددی بسیار به یکدیگر نزدیک بوده و در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد اختلاف نسبت به یکدیگر ارزیابی می‌شوند.



شکل ۱۴: مقایسه نمودارهای بار-تغییر مکان مدل آزمایشگاهی و مدل المان محدود توسعه یافته



(ب)



(الف)

شکل ۱۵: نمایش نقاط مستعد شکست در: (الف) مدل المان محدود، (ب) مدل آزمایشگاهی

## ۵- نتیجه

در این تحقیق در ابتدا بوسیله‌ی مطالعات آزمایشگاهی، مشخصات مکانیکی مصالح ترکیبی آجر و ملات گچ بصورت مقیاس شده استخراج شده است. در مرحله‌ی بعد با بکارگیری نتایج آزمایشهای مصالح و بر اساس روابط تئوریک موجود، پارامترهای معیار شکست ویلیام-وارنک که یکی از معیارهای شکست معمول و پرکاربرد برای مدل‌سازی مصالح ترد می‌باشد، محاسبه شده است. در نهایت پارامترهای استخراج شده مربوط به معیار شکست مذکور، با مدل‌سازی همزمان عددی و آزمایشگاهی قوس مصالح بنایی نیم‌دایره مورد راستی آزمایی قرار گرفته است. نتایج به دست آمده از مطالعات تحلیلی و آزمایشگاهی به شرح زیر است:

۱- انطباق بسیار خوبی در حدود ۱۰ الی ۱۵ درصد اختلاف بین نتایج آزمایشگاهی و مدل اجزاء محدود توسعه یافته مربوط به قوس مصالح بنایی نیم‌دایره مشاهده شد. به عبارت دیگر پارامترهای محاسبه شده مربوط به معیار شکست ویلام-وارنک به خوبی توانسته است رفتار قوس مصالح بنایی در زمینه تخمین ظرفیت باربری و شناسایی نقاط مستعد شکست را پیش بینی نماید.

۲- در تحقیقات آینده می‌توان از نتایج این تحقیق جهت مدل‌سازی اجزاء محدود سازه‌های مصالح بنایی بخصوص سازه‌های سنتی در پروژه‌های طراحی و همچنین ارائه طرح‌های مقاوم‌سازی استفاده نمود.

## مراجع

- [1] P, Lourenço. (1998). Experimental and Numerical Issues in the Modeling of the Mechanical Behaviour of Masonry. *Int. Seminar on Structural Analysis of Historical Construction II. Espagne: Barcelona*, Pages 57–91.
- [2] Y, Korany. (2003). Mechanics and Modeling of URM Structures. *Germany, Dresden university of Technology*.
- [3] T, Hughes and N, Kitching. (2000). Small Scale Testing of Masonry. *Proceedings of the 2th International Brick Block Masonry Conference. Madrid, Spain*, Pages 893–902.
- [4] G, Milani and A, Tralli. (2012). A Simple Meso-Macro Model Based on SQP for the Non-Linear Analysis of Masonry Double Curvature Structures. *Int. J. Solids Struct*, 49(5), Pages 808–834.
- [5] P, B, Lourenço., G, Vasconcelos., P, Medeiros and J, Gouveia. (2010). Vertically Perforated Clay Brick Masonry for Loadbearing and non-Loadbearing Masonry Walls. *Constr. Build. Mater*, 24(11), Pages 2317–2330.
- [6] A, Tzamtzis and P, Asteris. (2003). Finite Element Analysis of Masonry Structures Part1-Review of Pervious Work. *9th North American Masonry Conference. Clemson, South Carolina, USA*, Pages 101–107.
- [7] M, Hejazi and F, Mehdizadeh Saradj. (2014). Persian Architectural Heritage: Architecture, Structure and Conservation. *WIT Press, Southampton and Boston*.
- [8] A, Mohammed., T, G, Hughes and A, Abubakar. (2015). Importance of Sand Grading on the Compressive Strength and Stiffness of Lime Mortar in Small Scale Model Studies. *Open J. Civ. Eng*, Vol 5, Pages 372–378.
- [9] S, M, Moayedian and M, Hejazi. (2021). Stress-strain relationships for scaled gypsum mortar and cement mortar brick masonry. *J. Build. Eng*, Vol 33, Pages 101861.



- [10] Dorji, J., Zahra, T., Thambiratnam, D., & Lee, D. (2021). Strength assessment of old masonry arch bridges through moderate destructive testing methods. *Construction and Building Materials*, 278, 122391.
- [11] Gönen, S., & Soyöz, S. (2021). Seismic analysis of a masonry arch bridge using multiple methodologies. *Engineering Structures*, 226, 111354.
- [12] Demirel, I. O., & Aldemir, A. (2021). Simplified Approach for Seismic Performance Assessment of Dry-Joint Masonry Arch Bridges. *Buildings*, 11(7), 313.
- [13] Jahangir, H., & Esfahani, M. R. (2022). Bond Behavior Investigation Between Steel Reinforced Grout Composites and Masonry Substrate. *Iranian Journal of Science and Technology, Transactions of Civil Engineering*, 1-17.
- [14] BSI, BS EN 1052-1. (1998). Methods of Test for Masonry - Determination of Compressive Strength. *British Standards Institution*.
- [15] BSI, BS EN 1052-2. (1999). Methods of Test for Masonry Units - Determination of Flexural Strength, *British Standards Institution*, 3(1).
- [16] Triaxial Willam, K, J and Warnke, E, P. (1957). Constitutive Models Behavior of Concrete. *Proceedings of the International Association for Bridge and Structural Engineering*, Vol 19, Pages 1-30.
- [17] Chen, W, F., Han, D, J. (1988). *Plasticity for structural engineers*. Springer, New York.
- [18] K, Peter. (2016). *Theory reference for ANSYS and ANSYS workbench. Release 17, Canonsburg: Pennsylvania*.
- [19] Betti, M., Orlando, M. and Vignoli, A. (2011). Static behaviour of an Italian medieval castle: damage assessment by numerical modelling, *Computers and Structures*, 89(21-22), Pages 1956-1970.
- [20] Pineda, P., Robador, M and Gil-Marti, M. (2011). Seismic damage propagation prediction in ancient masonry structures: an application in the non-linear range via numerical models. *The Open Construction and Building Technology Journal*, Vol 5, pages 71-79.
- [21] *Basic Analysis Guide for ANSYS 16*. (2016). SAS IP Inc. New York.