



## بررسی تجربی جذب انرژی ساندویچ پانل‌های دارای هسته سازه مشبک هرمی ساخته شده به روش بریزینگ

آکو پارسا<sup>1</sup>، مجتبی یزدانی<sup>2\*</sup>

1- دانشجوی دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، شهر جدید سهند، تبریز

2- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی سهند، شهر جدید سهند، تبریز

\* تبریز، صندوق پستی 51335-1996، m.yazdani@sut.ac.ir

### چکیده

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 8 تیر 1400

داوری اولیه: 2 مرداد 1400

پذیرش: 11 شهریور 1400

### کلیدواژگان:

سازه‌های مشبک هرمی

جذب انرژی

لحیم‌کاری سخت

پارامترهای هندسی

استفاده از سازه‌های مشبک به دلیل داشتن خواص مکانیکی منحصربه‌فرد و وزن پایین آن‌ها همواره مورد توجه محققان و صنایع مختلف بوده است. یکی از جدی‌ترین چالش‌های استفاده از سازه‌های مشبک، فرآیند ساخت این سازه‌ها علی‌الخصوص تولید انبوه و تجاری‌سازی آن‌ها است. سازه‌های مشبک هرمی ساخته شده از لوله‌های فلزی یکی از بهینه‌ترین ساختارهای مشبک برای جذب انرژی است که اصلی‌ترین چالش در زمینه ساخت این سازه، نحوه‌ی اتصال لوله‌ها به صفحات فلزی است. در این تحقیق روشی برای اتصال لوله‌های فلزی به صفحات معرفی شده است که نسبت به روش‌های موجود در عین سادگی و سرعت ساخت بالاتر، باعث بهبود استحکام اتصال نیز می‌شود. در این روش بجای استفاده از قالب و فیکسچرهای فلزی برای تثبیت موقعیت لوله‌ها در فرآیند لحیم‌کاری، زائده‌هایی به شکل دندان در حین برش لوله‌ها روی آن‌ها ایجاد شده و با قرارگیری آن‌ها در سوراخ‌های تعبیه شده روی صفحات، هم موقعیت آن‌ها طی لحیم‌کاری حفظ می‌شود و هم گیر مکانیکی ایجاد شده باعث افزایش استحکام اتصال می‌گردد. در این مطالعه نمونه‌ها با هندسه متفاوت از فولاد ضد زنگ 304 ساخته شده‌اند و تأثیر پارامترهای هندسی از جمله نسبت طول به قطر و زاویه‌ی قرارگیری لوله روی جذب انرژی این سازه‌ها بررسی شده است. روش ساخت معرفی شده در این تحقیق کاملاً کارآمد بوده و هیچکدام از نمونه‌ها در محل اتصال دچار آسیب نشدند. نسبت طول به قطر 5 بیشترین جذب انرژی مخصوص را دارد. افزایش زاویه‌ی قرارگیری لوله‌ها از 45 به 55 درجه باعث افزایش جذب انرژی مخصوص به میزان 40 درصد شده است.

## Experimental investigation of energy absorption of sandwich panels with pyramidal lattice core made by brazing method

Ako Parsa, Mojtaba Yazdani\*

Faculty of mechanical engineering, Sahand University of Technology, Sahand new town, Iran

\* P.O.B. 51335-1996 Sahand new town, Iran, m.yazdani@sut.ac.ir

### Article Information

Original Research Paper

Received: 29 June 2021

First Decision: 24 July 2021

Accepted: 2 September 2021

### Keywords:

Pyramidal lattice structures

Energy absorption

Brazing

Geometrical parameters

### Abstract

The use of lattice structures has always been envisaged by researchers and various industries because of their unique mechanical properties and low weight. One of the main challenges in this area is the manufacturing process of these structures, particularly in mass production and commercialization. Pyramid-metal tubular lattice structures are among the most optimal lattice structures for energy absorption. The connection of tubes to metal plates is one of the main challenges in the construction of these types of structures. In this research, rather than using metal molds and fixtures, the toothed appendages are created by cutting the ends of the tube and place them in the holes of the plates in order to fix the position of the tubes in the brazing process. Mechanical locking of tubes and plates enhances connection strength and structural stiffness. In this study, specimens have been made with various geometries and the effect of geometrical parameters such as the length to diameter ratio of the tube and its angle of orientation on energy absorption were investigated. The manufacturing process used in this research was very efficient and none of the samples were damaged at the joint. Increasing the orientation angle from 45 to 55 increases the specific energy uptake by up to 40%.

### 1- مقدمه

استحکام مناسب این سازه‌ها در خمش و کمانش باعث شده تا علاوه بر داشتن عملکرد چندمنظوره<sup>1</sup>، به‌صورت ویژه‌ای برای جذب انرژی مکانیکی مورد توجه قرار گیرند. تاکنون ساختارهای

ساندویچ پانل‌ها با داشتن خواص مکانیکی ممتاز و چگالی پایین بعنوان ساختارهای سبکی از مواد مورد توجه بسیاری از محققان و صنایع مهمی مانند صنایع خودروسازی و هوافضا بوده‌اند.

<sup>1</sup> Multifunctional performance

### Please cite this article using:

A. Parsa, M. Yazdani, Experimental investigation of energy absorption of sandwich panels with pyramidal lattice core made by brazing method, Iranian Journal of Manufacturing Engineering, Vol. 8, No. 7, pp. 10- 19, 2021 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

هرچند روش ساخت افزوده<sup>4</sup> و پرینترهای سه بعدی به صورت وسیعی برای ساخت مواد مشبک سبک پلیمری مورد استفاده قرار می‌گیرند [11] اما با توجه به پیچیدگی و مشکلات ساخت این سازه‌ها با لوله‌های توخالی فلزی، روش‌های کمتری برای تولید این ساختارها گزارش شده است. فرآیند ساخت دشوار این سازه‌ها ناشی از ابعاد کوچک و دقت بالای مورد نیاز در حین ماشینکاری، سرهم کردن قطعات روی صفحات و اتصال مستحکم آن‌ها است.

یکی از روش‌های ساخت این سازه‌ها برای اولین بار توسط وادلی و همکاران [12] با پانچ کردن توری لوله فلزی با قطر خارجی 1/47 میلی‌متر و ضخامت 0/2 میلی‌متر در فواصل مشخص به شکل هرمی و قرارگیری آن بین صفحات فلزی با زاویه 45 درجه و نهایتاً اتصال محل تاشدگی به صفحات به وسیله بریزینگ ارائه شده است. نحوه انجام این فرآیند و ایجاد زاویه‌های مورد نظر در شکل 1 مشاهده می‌شود. هرچند نمونه‌های ساخته شده از لوله توخالی با این روش استحکام بسیار بیشتری نسبت به نمونه‌های ساخته شده با میله‌های توپر مشابه داشتند اما وجود انحنای ایجاد شده طی فرآیند پانچ کردن لوله‌ها باعث کاهش بارپذیری نمونه‌ها شده و همانند عیوب ساختاری باعث کاهش استحکام نمونه‌ها می‌شود.

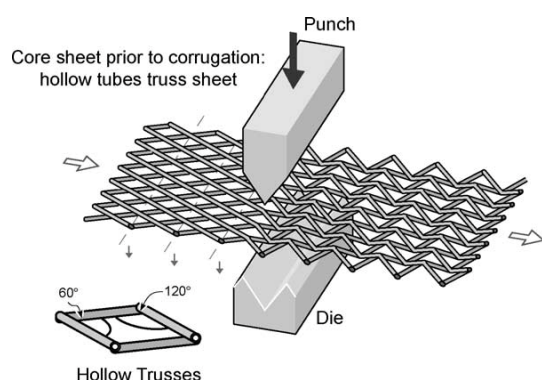


Fig. 1 Punching method for making pyramidal lattice structure with metal tubes [8]

شکل 1 روش پانچ کردن برای ساخت سازه مشبک هرمی با لوله فلزی [8]

روش ساخت دیگری که متعاقباً توسط وادلی و همکاران [6] معرفی شده، شامل استفاده از صفحات کمکی سوراخ‌داری است که موقعیت لوله‌های بریده شده را بین صفحات اصلی در حین فرآیند بریزینگ ثابت نگه می‌دارد. لوله‌ها با قطر خارجی 3/175 میلی‌متر و سه ضخامت متفاوت در نظر گرفته شده اند. زاویه قرارگیری لوله‌ها نیز 55 درجه انتخاب شده که اشاره‌ای به دلیل

هندسی مختلفی به عنوان هسته‌ی ساندویچ پانل‌ها معرفی شده‌اند که هر یک از آن‌ها قابلیت‌ها و محدودیت‌های خاص خود را دارند. هرچند از هسته‌های لانه زنبوری به دلیل سادگی فرآیند ساخت و جذب انرژی بالا به صورت گسترده استفاده می‌شود اما ساختارهای دیگری وجود دارند که خاصیت جذب انرژی آن‌ها در مقایسه با دیگر ساختارها بالاتر است [1، 2]. هسته‌های مشبک ساخته شده از صفحات به صورت منشوری<sup>1</sup> و میله‌ای به صورت خریابی<sup>2</sup> از دیگر انواع سازه‌های مشبک پرکاربرد هستند که به عنوان هسته‌ی ساندویچ پانل‌ها استفاده می‌شوند.

سازه‌های مشبک خریابی به صورت هندسه‌های مختلفی از قبیل چهار وجهی [3]، هرمی [4]، کاگومی سه بعدی<sup>3</sup> [5] و انواع دیگر ساخته می‌شوند که استحکام آن‌ها قابل قیاس با سازه‌های مشبک لانه زنبوری است. سازه‌های مشبک هرمی ساخته شده از لوله‌ها، یکی از ساختارهای مشبک خریابی هستند که به دلیل داشتن شعاع ژیراسیون بزرگتر نسبت به نوع میله‌ای آن، مقاومت بهتری در مقابل کمانش داشته و کاهش ناگهانی استحکام آن بعد از کمانش کمتر خواهد بود.

بسیاری از محققان به برتری سازه‌های مشبک هرمی از نظر استحکام نسبت به دیگر انواع ساختارها اشاره کرده‌اند [6، 7]. لی و همکاران [8] خرابی ساندویچ پانل با هسته سازه مشبک فلزی را تحت بار دینامیکی در نرخ‌های مختلف کرنش به صورت تجربی آزمایش کرده و اثرات نرخ کرنش و اینرسی سازه را روی جذب انرژی آن‌ها به صورت عددی مورد مطالعه قرار داده‌اند. در پژوهشی که توسط ایوانز و همکاران [9] روی سازه مشبک هرمی با المان‌های استوانه توخالی در ابعاد میکرو انجام گرفته است، جذب انرژی در واحد جرم این سازه‌ها نسبت به فوم‌ها به صورت عددی نزدیک به دو برابر بوده است. این در حالی است که نتایج تجربی برای جذب انرژی این سازه‌ها در همین پژوهش دو برابر تحلیل عددی گزارش شده که نشان دهنده ظرفیت عالی این سازه‌ها برای جذب انرژی است. ژانگ و همکاران [10] اثر پر کردن اطراف سازه مشبک با فوم پلی اورتان را در ساندویچ پانل تحت بار شبه استاتیکی و ضربه‌ای با سرعت کم را مورد بررسی قرار داده‌اند. با اینکه افزودن فوم پلی اورتان باعث بهبود خواص مکانیکی و جذب انرژی در حالت شبه استاتیکی می‌شود اما در حالت بارگذاری ضربه‌ای اثر چشم‌گیری نخواهد گذاشت.

<sup>1</sup> Prismatic

<sup>2</sup> Truss

<sup>3</sup> 3-D Kagome

<sup>4</sup> Additive Manufacturing

قطر و زاویه‌ی قرارگیری لوله‌ها روی صفحات، با استفاده از ماشین و ایرکات برش داده می‌شوند.

مطابق با شکل 3، برای اتصال چهار لوله به صفحه پایینی بایستی دو عدد فیکسچر داخل هم قرار گرفته و در محل شیار صفحه پایین قرار بگیرند. با تثبیت یک انتهای لوله‌ها روی یکی از صفحات، موقعیت آن طی فرآیند بریزینگ حفظ شده و لحیم‌کاری صورت می‌گیرد. استحکام و خاصیت جذب انرژی در این نمونه‌ها در مقایسه با سازه‌هایی مانند لانه زنبوری، کاگومی و ساختارهای کامپوزیتی دیگر بسیار بیشتر است. استفاده از این روش ساخت هرچند در مقایسه با روش‌های قبلی کارآمدتر به نظر می‌رسد، اما بهینه نیست. بعنوان مثال، تعداد زیاد شیارها و هندسه‌ی نه چندان ساده‌ی فیکسچرها باعث صرف زمان و هزینه زیادی خواهد شد و نیاز به دقت و تolerانس معینی دارد. همچنین قرارگیری قسمتی از انتهای لوله‌ها در فیکسچر مورد نظر باعث کاهش طول مؤثر لوله شده و جذب انرژی آن را کاهش می‌دهد.

در این تحقیق، ابتدا به معرفی روشی برای ساخت ساندویچ پانل‌هایی با هسته‌ی سازه مشبک هرمی از لوله‌های استیل ضد-زنگ 304 با قطر 4 میلی‌متر و ضخامت 0/5 میلی‌متر و همچنین صفحات فلزی از همان جنس با رویکردی متفاوت برای رفع محدودیت‌های روش‌های موجود پرداخته می‌شود. نمونه‌های آزمایشگاهی متعددی براساس این روش ساخته شده است و چالش‌های احتمالی درحین فرآیند تولید بررسی شده است. با توجه به اینکه در هیچکدام از منابع مذکور اشاره‌ای به نحوه‌ی انتخاب زاویه قرارگیری لوله‌ها و حالت بهینه‌ی آن نشده است بنابراین نمونه‌های مورد مطالعه در این پژوهش با هندسه متفاوت ساخته شده‌اند تا تأثیر پارامترهایی مانند زاویه قرارگیری لوله‌ها و نسبت طول به قطر آن‌ها روی خواص مکانیکی و جذب انرژی ساندویچ پانل‌های با هسته مشبک هرمی مورد مطالعه قرار گیرد. نحوه‌ی تغییرشکل نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه استاتیکی فشاری و استحکام محل اتصال لوله به صفحات نیز بررسی شده است. روش ساخت معرفی شده در این پژوهش به دلیل حذف فیکسچر لوله‌ها در لحیم‌کاری، نسبت به روش ساخت بکار رفته توسط دیگر محققان، ساده‌تر و کاربردی‌تر بوده و از پیچیدگی‌های روش‌های قبلی کاسته شده است. استحکام محل اتصال لوله‌ها به صفحات در این نوع از ساندویچ پانل‌ها در افزایش استحکام کلی سازه بسیار تأثیرگذار است که با بکارگیری روش ساخت معرفی شده در این تحقیق، محل اتصال تقویت شده و استحکام کلی سازه بهبود پیدا می‌کند. فرآیند ساخت

آن نشده است. نمونه‌های ساخته شده با این روش در مقایسه با دیگر سازه‌های هرمی و منشوری دارای استحکام و ظرفیت جذب انرژی بالاتری هستند. شکل 2 نحوه‌ی ساخت این سازه‌ها را با استفاده از صفحات کمکی سوراخ‌دار نشان می‌دهد. استفاده از دو صفحه کمکی سوراخ‌دار در این روش باعث افزایش وزن ساندویچ پانل شده و هم امکان ساخت آن در ابعاد بزرگ بسیار دشوار خواهد شد.

بین هو و همکاران [13] برای ساخت سازه‌های مشبک هرمی با لوله‌های فلزی با قطر 4 میلی‌متر، ضخامت 0/5 میلی‌متر و زاویه 45 درجه از روش همبند کردن مکانیکی قبل از بریزینگ استفاده کرده‌اند. در این روش ابتدا تعدادی لوله با طول مشخص به وسیله دستگاه ماشینکاری تخلیه الکتریکی<sup>1</sup> برش خورده و در یک انتهای آن‌ها شیار با عمق معین مطابق شکل 3 ایجاد می‌شود.

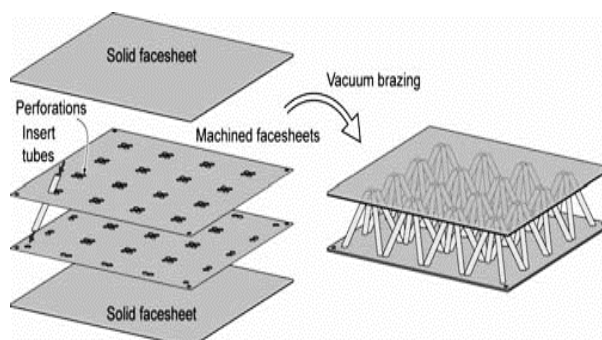


Fig. 2 Using perforated auxiliary plates to hold the tubes in place during brazing [6]

شکل 2 استفاده از صفحات کمکی سوراخ‌دار برای ثابت نگه داشتن لوله‌ها حین انجام بریزینگ [6]

(a) Manufacturing route

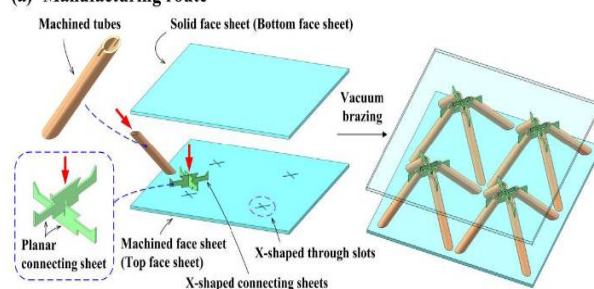


Fig. 3 Mechanical interlocking of tubes on plates using fixtures cut in a proper geometry [9]

شکل 3 همبند کردن مکانیکی لوله‌ها به وسیله فیکسچرهای برش خورده به شکل معین و قرارگیری روی صفحه‌ی شیاردار [9]

روی یکی از صفحات ساندویچ پانل با استفاده از دستگاه برش لیزر، شیارهایی به شکل علامت ضرب و عمق مشخص تعبیه می‌شود. در مرحله بعد، فیکسچرهای طراحی شده مطابق

<sup>1</sup> Electrical discharge machining

کوچک مدل حاضر، روش جایگزین مناسب و کارآمدتری معرفی شده است که در آن بدون استفاده از قطعات کمکی و تنها با برش خود قطعات، اتصال مکانیکی موقتی بین لوله‌ها و صفحات برقرار شده که باعث تثبیت موقعیت لوله‌ها روی صفحات مطابق هندسه مورد نظر خواهد شد. در این روش، برشکاری لوله‌ها به وسیله‌ی دستگاه وایرکات EDM به صورتی انجام می‌گیرد که زائده‌هایی به شکل دندان در دو انتهای آن‌ها مطابق شکل 4 باقی بماند. همچنین، سوراخ‌هایی به قطر متناسب با ضخامت دندان‌ها روی صفحات بالایی و پائینی در محل متناظر با دندان‌ها به وسیله دستگاه سوپردریل EDM ایجاد می‌شوند. قرارگیری دندان‌های هریک از لوله‌ها در سوراخ‌های متناظر باعث ایجاد اتصال موقت بین لوله‌ها و صفحات می‌شود که در طی فرآیند لحیم‌کاری موقعت لوله‌ها را ثابت نگه می‌دارد (شکل 4). مقاومت اتصال در نمونه‌های ساخته شده با این روش نسبت به نمونه‌های ساخته شده با فیکسچر بهتر است زیرا در این حالت درگیری دندان‌ها در صفحات، عاملی کمکی برای استحکام اتصال خواهد بود. روش‌های دیگری نیز می‌توان برای تثبیت موقعت لوله‌ها در طی لحیم‌کاری ارائه داد که هریک مزایا و معایب خود را دارند اما معیار اصلی در انتخاب روش مذکور مواردی از قبیل دقت ساخت، اجرای ساده و افزایش استحکام اتصال بین لوله و صفحات است.

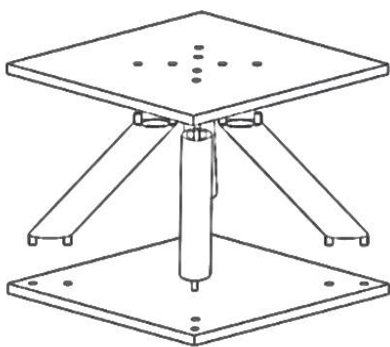


Fig. 4 Placement of tube teeth in the corresponding holes on the plates and formation of a single cell with temporary connection

شکل 4 قرارگیری دندان لوله‌ها در سوراخ‌های متناظر روی صفحات و تشکیل یک سلول واحد با اتصال موقت

ابعاد کوچک نمونه‌ها از یک طرف و روش تثبیت موقعت لوله‌ها بوسیله دندان و سوراخ از طرف دیگر باعث می‌شود تا فرآیند برشکاری با دقت بالا و بوسیله‌ی دستگاه وایرکات انجام شود. برش لوله‌ها مطابق شکل 5 بدین صورت انجام می‌گیرد که

حاضر در عین حال دارای دقت بالا و قابلیت بکارگیری برای تولید انبوه این سازه‌ها در صنایع مرتبط است.

## 2- ساخت نمونه‌ها

جستجو در لوله‌های موجود و قابل تهیه و بررسی مشخصات فنی آن‌ها از جمله جنس فلز، قطر و ضخامت لوله از یک طرف و همچنین تطابق آن‌ها با معیارهای سازه‌های مشبک جاذب انرژی مکانیکی از طرف دیگر باعث شد تا لوله‌هایی از جنس فولاد ضدزنگ 304 و مشخصات هندسی شامل قطر و ضخامت به ترتیب 4 میلی‌متر و 0/5 میلی‌متر برای ساخت نمونه‌ها انتخاب شوند. لوله‌های مذکور برای ساخت هسته‌ی هرمی مشبک و صفحاتی از همان جنس با ضخامت یک میلی‌متر بعنوان صفحات بالایی و پائینی در ساخت ساندویچ پانل استفاده شده است.

فرآیند لحیم‌کاری سخت روی فولاد ضدزنگ عبارتست از آغشته کردن محل اتصال دو قطعه به ماده خمیری از جنس مناسب و معمولاً مشابه با جنس قطعات اصلی و پخت آنها در کوره‌ی خلاء. از همین رو تثبیت موقعت قرارگیری قطعات نسبت به هم در حین بالا رفتن دما در کوره بسیار حائز اهمیت است. در مواردی که سازه قبل از اجرای لحیم‌کاری از نظر استاتیکی ناپایدار باشد برای نگهداری قطعات در محل اتصال به هم از نگهدارنده<sup>1</sup> استفاده می‌شود.

## 2-1- مدل هندسی نمونه‌ها

مدلسازی هندسی نمونه اولیه جهت ساخت در نرم‌افزار Solidworks صورت گرفته و هدف اصلی در این قسمت از پژوهش، بررسی قابلیت اجرای بریزینگ لوله‌ها روی صفحات از جنس مشابه مطابق هندسه هرمی است. با توجه به جنس مواد، ابعاد کوچک (میلیمتری) مدل و ملزومات اجرای لحیم‌کاری فولاد در خلاء، چالش‌های ساخت مدل مذکور را می‌توان به صورت موارد زیر بیان نمود:

- 1- نگه داشتن قطعات به صورت ثابت در محل خود در هنگام اجرای لحیم‌کاری و پخت در کوره خلاء
- 2- برشکاری دقیق لوله‌ها و صفحات
- 3- یافتن خمیر لحیم‌کاری با خواص مکانیکی مناسب.

بکارگیری قطعات کمکی برای نگهداری لوله‌ها با زاویه مشخص بین صفحات یکی از روش‌هایی است که در چند پژوهش مرتبط انجام گرفته است [6، 13]. با توجه به ابعاد

<sup>1</sup> Fixture

دندانه‌ها طوری انتخاب می‌شود که دارای انطباقی از نوع روان باشند.



Fig. 6 Placing the pipe in the fixture when it cut with the wire-cut machine

شکل 6 قرارگیری لوله در فیکسچر در هنگام برش با دستگاه برش وایرکات

بعد از آماده سازی قطعات، نوبت به سرهم کردن آن‌ها می‌رسد. نحوه‌ی قرارگیری لوله‌ها در بین صفحات در شکل 7 ملاحظه می‌شود. همان‌طور که مشاهده می‌شود، طول دندانه‌ها بزرگتر از ضخامت صفحات در نظر گرفته شده است تا با خم کردن آن‌ها روی صفحات اتصال محکمی حاصل گردد.

### 2-3- بریزکاری قطعات

قطعات ساخته شده جهت انجام لحیم‌کاری با خمیر لحیم از ماده مشابه و ترکیبات آلیاژ فولاد ضدزنگ 304 در گام اول شستشو داده شده و سطوح اتصال چربی زدایی می‌شوند. با بکارگیری خمیر لحیم در محل اتصال لوله‌ها به صفحات، نمونه آماده‌ی قرارگیری در کوره خواهد شد. با قرارگیری نمونه‌ها در کوره خلاء در این مرحله، دمای کوره تا حدود 1150 درجه سانتی‌گراد بالا رفته و با کنترل محل اتصال، از ذوب شدن خمیر لحیم و قرارگیری آن به صورت لایه‌ای یکنواخت در اطراف لوله اطمینان حاصل می‌گردد. میزان خمیر بکار رفته و زمان پخت آن از جمله پارامترهایی است که علاوه بر جنس خمیر روی کیفیت اتصال تأثیر می‌گذارد و بایستی ملاحظات دقیقی را در این زمینه انجام داد تا اتصال مورد نظر از کیفیت و استحکام مناسبی برخوردار گردد. شکل 8 نمونه‌ی لحیم‌کاری شده در این مرحله را نشان می‌دهد.

### 3- آزمون‌های تجربی

آزمون‌های نمونه‌ها تحت بارگذاری شبه-استاتیکی با استفاده از

ابتدا تکه ای از لوله با زاویه‌ی مورد نظر (بعنوان مثال 45 درجه نسبت به افق) روی دستگاه قرار می‌گیرد. قرارگیری لوله طبق زاویه‌ی مذکور توسط یک فیکسچر ساده شامل قطعه فولادی با سوراخی به اندازه اندکی بزرگتر از 4 میلی‌متر (قطر لوله) انجام می‌شود. حرکت سیم دستگاه وایرکات مطابق الگوی نشان داده شده در شکل 5 منجر به برش و ایجاد لوله‌ی با دندانه‌هایی به طول 2 میلی‌متر و ضخامت 0/5 میلی‌متر خواهد شد.

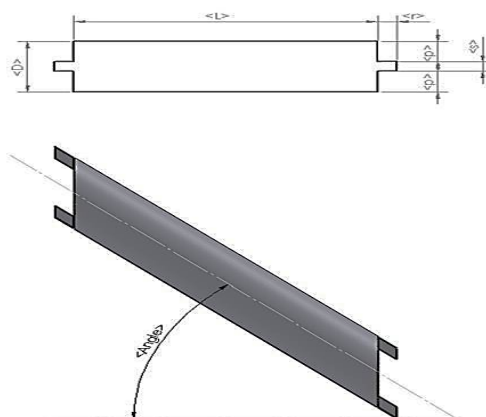


Fig. 5 The orientation angle of tube in the EDM machine and the pattern of wire movement

شکل 5 زاویه قرارگیری لوله در دستگاه وایرکات و الگوی حرکت سیم

پس از برش لوله، نوبت به تغییر راستای دندانه‌های روی آن می‌رسد به نحوی که بتوان به آسانی لوله‌ها را در محل مورد نظر روی سوراخ‌های متناظر تعبیه شده در صفحات جایگذاری نمود. بدین منظور از یک قطعه‌ی مشابه آچار و دارای سوراخی به اندازه ابعاد دندانه‌ها استفاده می‌شود به طوری که با قرار گرفتن کامل دندانه در آچار و خم نمودن آچار به اندازه زاویه‌ی مورد نظر، دندانه به صورت عمود بر صفحات درآید.

### 2-2- برشکاری و سوراخکاری قطعات

برای برش لوله‌ها به صورت طرح مذکور در بخش قبل بایستی از یک قطعه آهنی به شکل مکعب مطابق شکل 6 برای نگهداری لوله تحت زاویه  $w$  در زمان برشکاری با وایرکات استفاده کرد که همان زاویه‌ی قرارگیری لوله نسبت به راستای افقی در سلول واحد سازه‌ی مشبک هرمی است.

صفحات بالا و پائین هردو به صورت مربعی و با ابعاد یکسان در ابتدا به وسیله دستگاه وایرکات برشکاری می‌شوند. جنس ورق فولاد ضدزنگ 304 و ضخامت آن یک میلی‌متر است. تعبیه سوراخ‌ها روی صفحات با استفاده از دستگاه سوراخکاری سوپردریل انجام می‌گیرد. ضخامت مته دستگاه مطابق با ابعاد

طوری جدا شود که بعد از قرارگیری آن بین گیره‌های دستگاه، ابعاد مشخص شده در استاندارد رعایت شوند. طول گیج نمونه به اندازه‌ی 4 برابر (یا 5 برابر) قطر خارجی آن مطابق با استاندارد E8 (E8M) بایستی در نظر گرفته شود. تغییر طول آن‌ها حین فرایند بارگذاری توسط یک اکستنسومتر با طول دهانه‌ی 5 سانتی‌متر اندازه‌گیری شده است. مغزی‌های فلزی در دو انتهای لوله به صورت انطباق راحت قرار می‌گیرند تا گیره‌ها به طور محکم لوله را در حین آزمون نگه داشته و همزمان از تغییر شکل انتهای لوله نیز جلوگیری شود (شکل 9- الف).

برای تعیین خواص مکانیکی فولاد ضدزنگ بکار گرفته در ساخت صفحات از استاندارد ASTM A370 استفاده می‌شود. دو عدد نمونه‌ی ساخته شده با ابعاد استاندارد که همراه نمونه‌های اصلی داخل کوره‌ی خلاء قرار گرفته‌اند و عملیات حرارتی مشابه با نمونه‌های اصلی را تجربه کرده‌اند، بین گیره‌های کششی دستگاه قرار گرفته و مورد آزمایش قرار می‌گیرند (شکل 9- ب). خواص مکانیکی از نمودار نیروی کششی-تغییر طول بدست آمده از آزمون استاندارد در دمای محیط استخراج می‌گردند.

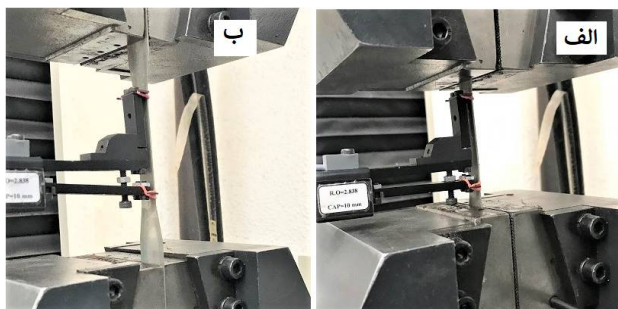


Fig. 9 Tensile test of a) tube b) plate

شکل 9 آزمون کشش استاندارد (الف) لوله (ب) صفحه

### 3-2- آزمون نمونه‌های ساندویچ پانل

زاویه‌ی قرارگیری لوله‌ها نسبت به راستای افقی ( $w$ ) و نسبت طول به قطر لوله‌ها ( $L/D$ )، دو پارامتر هندسی مؤثر روی رفتار مکانیکی و جذب انرژی سازه‌های مشبک هرمی است. بنابراین هندسه‌ی نمونه‌های ساخته شده طوری انتخاب شده تا تأثیر این دو پارامتر به وضوح مشاهده شده و مورد بررسی قرار گیرد. برای اطمینان از تکرارپذیری آزمون‌ها، از هر یک از هندسه‌های مذکور تعداد چهار نمونه ساخته شده و مورد آزمایش قرار گرفته‌اند. شکل‌های 10- الف و ب به ترتیب تعداد نمونه‌های ساخته شده برای انجام آزمایش فشار شبه-استاتیکی و نحوه‌ی اعمال بار روی نمونه‌ها را نشان می‌دهد.

دستگاه آزمون یونیورسال سننام در محل آزمایشگاه رفتار دینامیکی مواد دانشگاه صنعتی سهند انجام گرفت که قابلیت اعمال بار معادل با 25 تن را دارد.

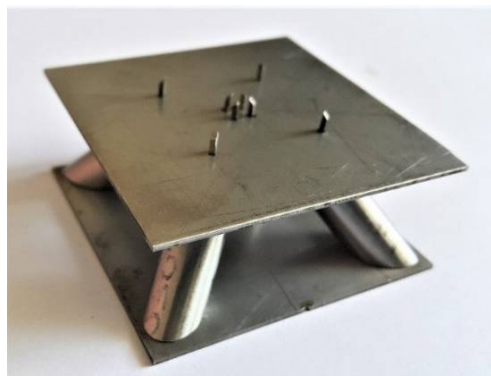


Fig. 7 Assembled specimen before brazing

شکل 7 نمونه سرهم شده قبل از بریزکاری

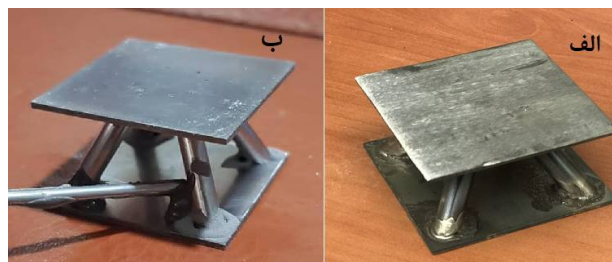


Fig. 8 a) Specimen after brazing b) Placing the paste at the joint

شکل 8 الف) نمونه بعد از بریزینگ ب) قرارگیری خمیر در محل اتصال

### 3-1- تعیین خواص مکانیکی ماده بکار رفته در نمونه‌ها

برای پیش بینی خواص مکانیکی سازه‌ی مشبک از جمله سفتی استحکام و جذب انرژی آن، لازم است که خواص مکانیکی فولاد ضدزنگ بکار رفته در ساخت لوله‌ها و صفحات به طور دقیق اندازه‌گیری شوند. با توجه به این نکته که خواص مکانیکی فولاد ضدزنگ با گرمای ناشی از لحیم‌کاری در کوره تغییر می‌کند، نمونه‌هایی از لوله و صفحه مطابق با استاندارد تهیه شده و همزمان با لحیم‌کاری نمونه‌های اصلی داخل کوره خلاء قرار می‌گیرند. بعد از اتمام لحیم‌کاری و سرد شدن قطعات، می‌توان آن‌ها را مطابق استاندارد آزمایش نمود و خواص مکانیکی آن‌ها را تعیین کرد.

برای تعیین خواص مکانیکی لوله‌ها از تعداد دو نمونه طبق استاندارد ASTM E8/E8M استفاده می‌شود. مطابق این استاندارد برای کلیه لوله‌ها مخصوصاً با قطرهای کمتر از یک اینچ بایستی از آزمون کشش نمونه‌ی لوله‌ای با همان مقطع استفاده کرد. بدین منظور ابتدا بایستی قسمتی از طول لوله

نسبت حجم لوله ها  $4V_t$  به حجم کلی سلول واحد  $V_{uc}$ :

$$\bar{\rho} = \frac{4V_t}{V_{uc}} \quad (1)$$

که در آن حجم لوله‌ها و سلول واحد به صورت زیر است:

$$V_t = \frac{\pi}{4}(D^2 - d^2)L \quad (2)$$

$$V_{uc} = a^2 L \sin w \quad (3)$$

بنابراین چگالی نسبی هسته مشبک به صورت زیر محاسبه خواهد شد:

$$\bar{\rho} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{a^2 \sin w} \quad (4)$$

با توجه به شکل 11 می‌توان اندازه  $a$  را به صورت زیر برحسب طول لوله نوشت:

$$a = 2(L \cos w \sin 45 + 2D) \quad (5)$$

بنابراین چگالی نسبی هسته مشبک برحسب طول لوله و زاویه محور آن‌ها با صفحه پائینی به صورت زیر ساده خواهد شد:

$$\bar{\rho} = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4(L \cos w \sin 45 + 2D)^2 \sin w} \quad (6)$$

جدول 1 ابعاد هندسی نمونه‌های ساخته شده جهت انجام آزمایش‌ها را به همراه چگالی نسبی هر یک از آنها نشان می‌دهد.

جدول 1 ابعاد هندسی نمونه‌های ساخته شده

Table 1 The geometric parameters of fabricated samples

نام‌گذاری نمونه	نسبت طول به قطر L/D	زاویه w	عرض a (mm)	چگالی نسبی $\bar{\rho}$ %
3-45	3	45	28/00	3/80
5-45	5	45	36/00	2/27
5-50	5	50	34/18	2/09
5-55	5	55	32/22	1/96
7-45	7	45	44/00	1/51

#### 4-1- رفتار مکانیکی نمونه‌ها تحت آزمون

در ابتدا خواص مکانیکی فولاد ضدزنگ 304 که لوله‌ها و صفحات تشکیل دهنده ساندویچ پانل از آن ساخته شده‌اند، پس از گذراندن عملیات حرارتی همزمان با فرآیند بریزینگ، مطابق استاندارد تعیین شد. نمودار نیرو-تغییر طول حاصل از تست کشش استاندارد برای لوله و صفحه برای بدست آوردن نمودار تنش- کرنش مهندسی استفاده شده که نتیجه آن در شکل 12 مشاهده می‌شود.

هرچند داده‌های فنی مربوط به لوله و صفحات برای تطبیق خواص مکانیکی آن‌ها در دسترس نبود و قطعات نیز از محل یکسانی تهیه نشده بود، اما نتایج آزمون کشش نمونه‌های



Fig. 10 a) Fabricated specimens b) compression test of specimen  
شکل 10 الف) تعداد نمونه‌های ساخته شده ب) آزمون فشار نمونه‌ها

آزمون‌های شبه-استاتیکی نمونه‌ها با استفاده از دستگاه یونیورسال سنتام و نرخ بارگذاری 1 میلی‌متر در دقیقه مطابق با استاندارد ASTM C365-0.5 روی نمونه‌های ساندویچ پانل با هسته‌ی هرمی ساخته شده از لوله‌های توخالی انجام گرفته است. بدین منظور از دو فک استوانه‌ای فولادی برای اعمال نیروی فشاری روی نمونه‌ها بهره گرفته شده است (شکل 10-11). نحوه‌ی تغییر شکل نمونه‌ها طی بارگذاری فیلمبرداری شده تا میزان استحکام اتصال در طول فرآیند تغییر شکل به وضوح قابل بررسی بوده و بتوان آن را با نمودار نیرو-تغییر شکل بدست آمده از دستگاه در مراحل مختلف تطبیق داد.

#### 4- بحث و نتایج

خواص مکانیکی سازه‌های مشبک در مقایسه با دیگر مواد و ساختارها زمانی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که سخن از خواص مکانیکی مخصوص آن‌ها باشد. ابعاد یک سلول واحد از هسته مشبک با لوله‌های فلزی توخالی در شکل 11 قابل مشاهده است.

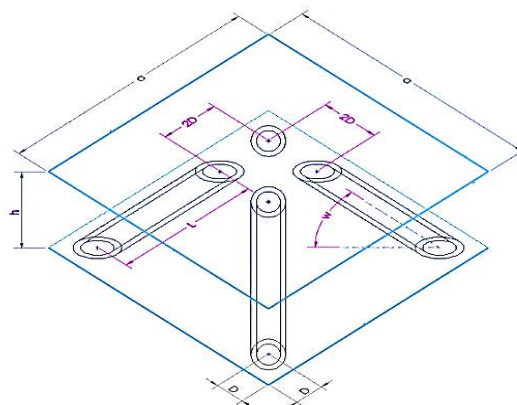


Fig. 11 Dimensions of the pyramidal lattice core of hollow tubes

شکل 11 ابعاد هسته مشبک هرمی با لوله‌های توخالی

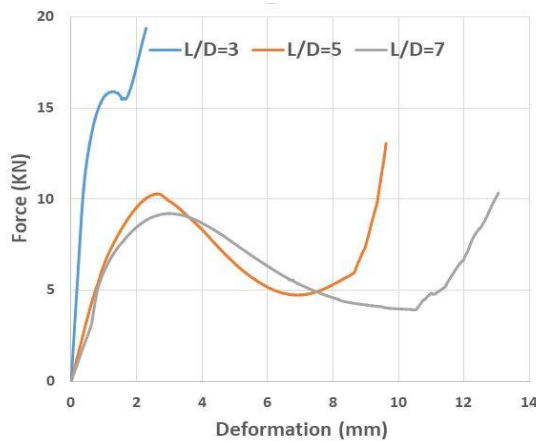
با توجه به شکل، چگالی نسبی هسته مشبک  $\bar{\rho}$  برابر است با

کشیدگی بیشتر نمودار نیز شده که نشان دهنده‌ی تغییر شکل بیشتر در حین تحمل نیرو تا قبل از نقطه‌ی تماس لوله‌ها با صفحات است (شکل 15).



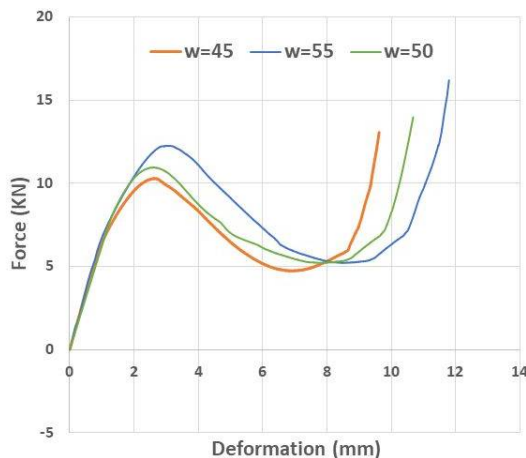
**Fig. 13** Deformation of sample with  $L/d = 5$  and  $w = 45$  a) just before local buckling b) just before condensing

شکل 13 نحوه تغییر شکل نمونه‌ای با  $L/d=5$  و  $w=45$  درست قبل از شروع کمانش (ب) درست قبل از شروع تراکم



**Fig. 14** Force-displacement diagram of samples with different  $L/d$  and  $w = 45$

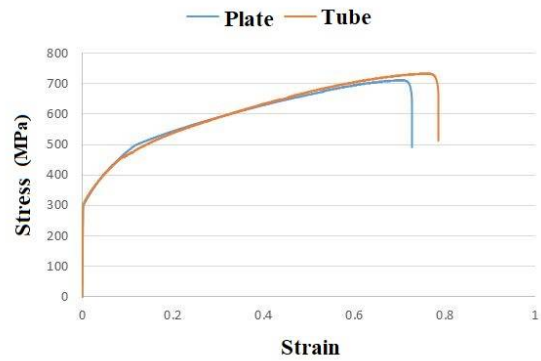
شکل 14 نمودار نیرو-تغییر ضخامت نمونه‌های با  $L/d$  مختلف و  $w=45$



**Fig. 15** Force-displacement diagram of samples with different  $w$  and  $L/d = 5$

شکل 15 نمودار نیرو-تغییر ضخامت نمونه‌های با  $w$  مختلف و  $L/d=5$

استاندارد بیانگر آن است که جنس لوله و صفحه تقریباً یکسان هستند (شکل 12). با توجه به داده‌های بدست آمده از نمودار مقدار مدول الاستیک  $207 \text{ GPa}$  و استحکام تسلیم  $297 \text{ MPa}$  تعیین می‌شود.



**Fig. 12** Engineering stress-strain diagram for the material of the tube and plate after heat treatment due to brazing

شکل 12 نمودار تنش-کرنش مهندسی برای جنس ماده لوله و صفحه بعد از طی عملیات حرارتی ناشی از بریزینگ

برای بررسی اثر پارامتر هندسی  $L/d$  در ابتدا سه نمونه با نسبت طول به قطر لوله 3، 5 و 7 مورد آزمون قرار گرفت که در هر سه نمونه زاویه قرارگیری لوله‌ها نسبت به صفحه پایینی برابر 45 درجه بود. همان‌طور که در شکل 13 مشاهده می‌شود، تغییر شکل نمونه‌ها پس از طی ناحیه الاستیک خطی به حداکثر نیروی قابل تحمل در هنگام ایجاد کمانش موضعی لوله‌ها می‌رسد (شکل 13-الف). با ادامه‌ی بارگذاری، رفتار پس-کمانش<sup>1</sup> نمونه‌ها ادامه پیدا کرده و با تماس لوله‌ها با صفحات، نیرو به‌طور ناگهانی افزایش پیدا می‌کند (شکل 13-ب).

با افزایش  $L/d$  به ازای یک نیروی ثابت، مقدار گشتاور خمشی که باعث کمانش موضعی در لوله‌ها می‌شود افزایش پیدا کرده و در نهایت استحکام نمونه‌ها کاهش پیدا کرده و در مقابل، تغییر شکل بیشتری در آن‌ها دیده می‌شود (شکل 14). طول کوتاه لوله‌ها در نسبت  $L/d=3$  باعث می‌شود که با کمانش موضعی و تغییر شکل اندک آن‌ها، لوله‌ها در تماس با صفحات قرار بگیرند و مرحله تراکم و افزایش ناگهانی نیرو در مقایسه با دو نسبت دیگر زودتر شروع شود.

همچنین نمونه‌هایی دارای زاویه قرارگیری 45، 50 و 55 درجه با نسبت  $L/d$  ثابت 5 برای مطالعه پارامتر  $w$  روی رفتار مکانیکی سازه‌های مشبک هرمی آزمایش شد. افزایش زاویه  $w$  باعث شده که نه تنها استحکام نمونه‌ها بیشتر گردد بلکه موجب

<sup>1</sup> Post-buckling



انرژی مخصوص برابر با  $24/5 \text{ M.J/Kg}$  مشاهده می‌شود.

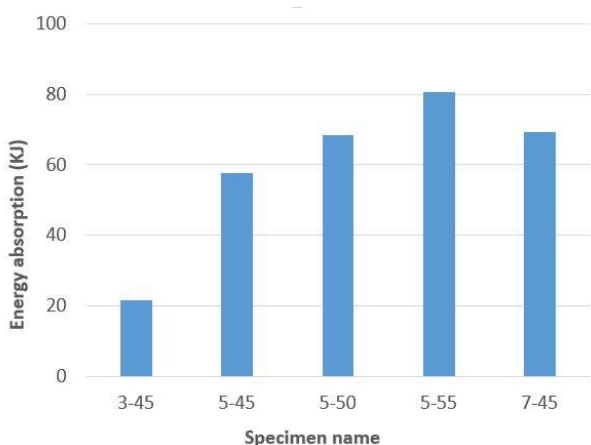


Fig. 16 Energy absorption capacity in all samples

شکل 16 ظرفیت جذب انرژی در همه نمونه‌ها

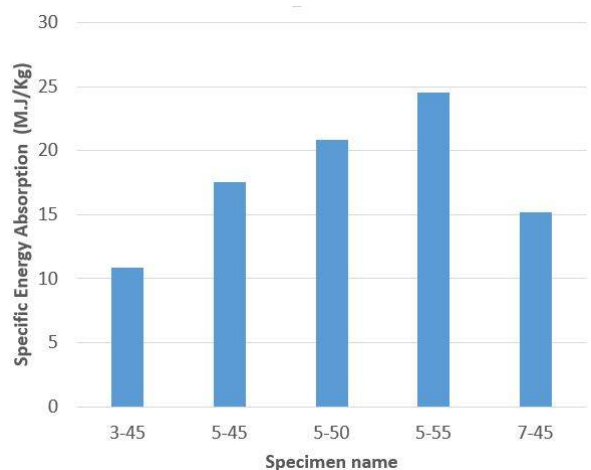


Fig. 17 Specific energy absorption (SEA) in all samples

شکل 17 جذب انرژی مخصوص (SEA) در همه نمونه‌ها

## 5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش ساندویچ پانل‌هایی با هسته مشبک هرمی از لوله‌های فولاد ضد زنگ 304 با روش ساده و کاربردی ساخته شد و رفتار مکانیکی آن‌ها تحت فشار و همچنین میزان جذب انرژی مورد مطالعه قرار گرفت. روش معرفی شده در این پژوهش در مقایسه با دو روش دیگر ساده‌تر، دقیق‌تر و سریع‌تر بوده که قابلیت بکارگیری برای تولید انبوه را نیز دارد.

نحوه تغییر شکل و تأثیر پارامترهای هندسی  $L/d$  و  $w$  روی رفتار مکانیکی و جذب انرژی مخصوص این سازه‌ها به صورت تجربی بررسی شد که با توجه به آن‌ها می‌توان نتایج زیر را بیان کرد:

- ثابت نگه داشتن لوله‌ها روی صفحه‌ها در طی فرآیند بریزینگ بسیار مهم بوده و باعث حصول اطمینان از ساختار

با افزایش زاویه‌ی  $w$  از 45 درجه به 55 درجه، به دلیل کاهش بازوی گشتاور بوجود آمده در لوله‌ها، گشتاور خمشی لازم برای تغییر شکل و ایجاد کمانش موضعی روی لوله کاهش می‌یابد. در نتیجه برای زوایای بیشتر، نیروی فشاری بالاتری برای تغییر شکل نمونه‌ها لازم است که به معنی افزایش استحکام نمونه‌ها است. رفتار پس-کمانش این نمونه‌ها تقریباً مشابه همدیگر بوده و فقط حداقل نیرو در این ناحیه برای زاویه 45 درجه اندکی کمتر از دو نمونه دیگر است.

## 4-2- تأثیر پارامترهای هندسی در جذب انرژی نمونه‌ها

انرژی مکانیکی ناشی از ضربه و یا انفجار، توسط تغییر شکل پلاستیک بوجود آمده در مواد مشبک بکار گرفته شده به عنوان هسته ساندویچ پانل‌ها جذب می‌شود. اگرچه ظرفیت جذب انرژی مواد وابسته به پارامترهای دینامیکی از جمله نرخ کرنش و اثرات اینرسی است اما آزمایش فشار شبه-استاتیکی و نحوه تغییر شکل این سازه‌ها نیز می‌تواند حاوی اطلاعات مفیدی در جهت درک رفتار این سازه‌ها و جذب انرژی آن‌ها باشد. مساحت زیر نمودار نیرو-جابجایی در آزمون فشار نشان دهنده ظرفیت جذب انرژی نمونه‌ها است. مقادیر جذب انرژی برای همه نمونه‌ها در شکل 16 نشان داده شده است.

همان‌طور که مشاهده می‌شود، ظرفیت جذب انرژی با افزایش هر یک از پارامترهای هندسی  $L/d$  و  $w$  افزایش پیدا کرده است. افزایش جذب انرژی از  $L/d=3$  به  $L/d=5$  به مراتب بیشتر از افزایش آن از 5 به 7 است. مقدار جذب انرژی مربوط به نمونه 5-55 برابر با  $80.5 \text{ K.J}$  است که بیشترین مقدار را در بین نمونه‌ها دارد.

اهمیت وزن سازه‌های جاذب انرژی در صنایع مختلف از جمله خودروسازی و هوافضا باعث شده تا از مقدار جذب انرژی بر واحد جرم به جای واحد حجم بعنوان معیار مؤثرتری استفاده شود. جذب انرژی مخصوص که از تقسیم ظرفیت جذب انرژی بر جرم هسته‌ی مشبک هرمی حاصل می‌گردد و به اختصار SEA نامیده می‌شود در شکل 17 نشان داده شده است. همان‌طور که ملاحظه می‌شود، SEA در زاویه ثابت  $w=45$  درجه برای  $L/d=5$  بیشترین مقدار را دارد. به عبارت دیگر مطابق با شکل 16 در زاویه ثابت  $w=45$  درجه، با وجود ظرفیت جذب انرژی بیشتر برای نسبت طول به قطر 7، مقدار جذب انرژی بر واحد جرم نمونه 5-45 از 3-45 و حتی 7-45 نیز بیشتر است (شکل 17). در نمونه‌های دارای  $L/d=5$  با افزایش زاویه  $w$  مقدار SEA افزایش می‌یابد به طوری که در نمونه 5-55 بیشترین مقدار برای جذب

## 6- مراجع

- [1] T. George, V.S. Deshpande, H.N.G. Wadley, Mechanical response of carbon fiber composite sandwich panels with pyramidal truss cores, *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 47, pp. 31-40, 2013.
- [2] Y. Sun, L. Gao, Mechanical behavior of all-composite pyramidal truss cores sandwich panels, *Mechanics of Materials*, Vol. 65, pp. 56-65, 2013.
- [3] J. Liu, S. Patoatto, D. Fang, F. Lu, H. Zhao, Impact strength enhancement of aluminum tetrahedral lattice truss core structures, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 79, pp. 3-13, 2015.
- [4] S.M. Pingle, N.A. Fleck, V.S. Deshpande, H.N.G. Wadley, Collapse mechanism maps for a hollow pyramidal lattice, *Royal Society*, Vol. 467, pp. 985-1011, 2011.
- [5] J.S. Park, J.H. Joo, B.C. Lee, K.J. Kang, Mechanical behavior of tube-woven Kagome truss cores under compression, *International Journal of Mechanical Sciences*, Vol. 53, pp. 65-73, 2011.
- [6] D.T. Queheillalt, H.N.G. Wadley, Hollow pyramidal lattice truss structures, *International Journal of Materials Research*, Vol. 102, pp. 389-400, 2011.
- [7] L. St-Pierre, N.A. Fleck, V.S. Deshpande, The predicted compressive strength of a pyramidal lattice made from case hardened steel tubes, *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 51, pp. 41-52, 2014.
- [8] S. Lee, F. Barthelat, J.W. Hutchinson, H.D. Espinosa, Dynamic failure of metallic pyramidal truss core materials – Experiments and modeling, *International Journal of Plasticity*, Vol. 22, pp. 2118-2145, 2006.
- [9] A.G. Evans, M.Y. He, V.S. Deshpande, J.W. Hutchinson, A.J. Jacobsen, W.B. Carter, Concepts for enhanced energy absorption using hollow micro-lattices, *International Journal of Impact Engineering*, Vol. 37, pp. 947-959, 2010.
- [10] G. Zhang, B. Wang, L. Ma, L. Wu, S. Pan, J. Yang, Energy absorption and low velocity impact response of polyurethane foam filled pyramidal lattice core sandwich panels, *Composite Structures*, Vol. 108, pp. 304-310, 2014.
- [11] B. G. Compton, J. A. Lewis, 3D-Printing of Lightweight Cellular Composites, *Advanced Materials*, Vol. 26, pp. 5930-5935, 2014.
- [12] Douglas T. Queheillalt, Haydn N.G. Wadley, Pyramidal lattice truss structures with hollow trusses, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 397, pp. 132-137, 2005.
- [13] B. Hu, L. Z. Wu, J. Xiong, L. Ma, W. Yang, Y. Jin, Mechanical properties of a node-interlocking pyramidal welded tube lattice sandwich structure, *Mechanics of Materials*, Vol. 129, pp. 290-305, 2019.

یکنواخت مشبک در این سازه‌ها می‌شود که با توجه به نتایج این پژوهش می‌توان گفت که روش ساخت معرفی شده کارایی قابل توجهی داشته و کاملاً کاربردی است.

- در طی عملیات حرارتی ناشی از بریزینگ خواص مکانیکی جنس مواد دچار تغییر می‌شوند. بهینه‌ترین دما برای بریزینگ فولاد ضد زنگ 304 دمای 1150 است که طی آن هم خمیر ناحیه اتصال کاملاً ذوب می‌شود و هم مقاومت جنس مواد به بالاترین مقدار نسبت به دماهای دیگر می‌رسد.

- افزایش  $L/d$  در یک زاویه  $w$  ثابت باعث کاهش استحکام فشاری هسته مشبک هرمی می‌شود. با این وجود میزان تغییر شکل سازه با افزایش  $L/d$  بیشتر شده و منحنی نیرو-جابجایی کشیدگی بیشتری خواهد داشت.

- افزایش زاویه  $w$  در نسبت طول به قطر ثابت باعث افزایش استحکام فشاری نمونه‌ها شد به طوری که استحکام نمونه 55-5 از بقیه نمونه‌ها بیشتر بود.

- اگرچه با افزایش  $L/d$  ظرفیت جذب انرژی ساندویچ پانل افزایش می‌یابد اما جذب انرژی مخصوص برای  $L/d=5$  بیشترین مقدار است.

- افزایش زاویه قرارگیری لوله‌ها نسبت به صفحه پایینی از 45 درجه به 55 درجه باعث افزایش 40 درصدی جذب انرژی مخصوص می‌گردد. با این وجود افزایش  $w$  باعث کاهش استحکام ساندویچ پانل در راستای مماس بر صفحه و در مقابل بارهای برشی می‌شود. بنابراین در طراحی این سازه‌ها بهتر است علاوه بر میزان جذب انرژی مخصوص، به همسانگردی خواص آن‌ها هم دقت نمود تا هم استحکام راستای عمود بر صفحات بالا باشد و هم راستای مماس بر صفحات.

- یکی از مکانیزم‌های خرابی رایج در ساندویچ پانل‌های با هسته مشبک فلزی از هم گسیختگی محل اتصال المان‌ها به صفحات و استحکام کم آن است. بکارگیری خمیر لحیم کاری با مقدار زیاد در محل اتصال هرچند باعث افزایش استحکام اتصال می‌شود اما معایبی از قبیل افزایش وزن سازه، افزایش هزینه و مشکلات حین بریزینگ را نیز به دنبال دارد. همچنین بکارگیری اندک لحیم نیز باعث استحکام اندک سازه در محل اتصال می‌شود. بنابراین افزایش استحکام محل اتصال با هر روش دیگر علاوه بر مقدار بهینه لحیم در بریزینگ، باعث حفظ استحکام کلی سازه و جذب انرژی بیشتر توسط آن خواهد شد.