



## بررسی تجربی فرآیند جوشکاری نقطه‌ای در اهداف فلزی تحت ضربه با پرتابه‌های مسطح و مخروطی

صدیقه حسین‌زاده صالحکوه<sup>۱</sup>، توحید میرزابابای مستوفی<sup>۲</sup> و هاشم بابایی<sup>۳\*</sup>

<sup>۱</sup> دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

<sup>۲</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه ایوان‌کی، ایوان‌کی، ایران

<sup>۳</sup> استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه گیلان، رشت، ایران

مقاله مستقل، تاریخ دریافت: ۱۳۹۷/۰۹/۰۴؛ تاریخ بازنگری: ۱۳۹۷/۱۱/۲۳؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۸/۰۴/۰۳

### چکیده

در سال‌های اخیر، فرآیند جوشکاری نقطه‌ای به دلیل قابلیت ایجاد اتصالی باکیفیت بین صفحات فلزی، به‌خصوص صفحات با خواص مکانیکی بسیار متفاوت، مورد توجه قرار گرفته است. در این روش، هنگامی که دو صفحه فلزی تحت فشار اعمالی بالا به یکدیگر جوش می‌خورند، در سطح صفحات اتصال اتمی ایجاد می‌شود. در پژوهش حاضر، از سامانه تفنگ گازی تک‌مرحله‌ای برای انجام آزمایش‌های جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای استفاده شده است. در این مطالعه، ورق فولادی با ضخامت ۴ میلی‌متر، به‌عنوان ورق پایه و ورق‌هایی از جنس مس، برنج و آلومینیوم به‌عنوان لایه جلویی تحت برخورد مستقیم پرتابه‌های فلزی با شکل دماغه مسطح و مخروطی با سرعتی در محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر بر ثانیه قرار گرفته‌اند. به‌منظور بررسی اثر عوامل مختلف در این فرآیند، از ترکیب‌بندی‌های مختلف دولایه فلزی با فواصل بین لایه‌های ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ میلی‌متر استفاده شده است. فصل مشترک جوش با استفاده از میکروسکوپ الکترونی، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج این تحقیق نشان می‌دهد که در ناحیه‌ی برخورد خصوصاً در نواحی مرکزی اتصال کاملی رخ داده است.

**کلمات کلیدی:** اتصال حالت جامد؛ تفنگ گازی؛ جوش ضربه‌ای نقطه‌ای؛ میکروسکوپ الکترونی.

## Experimental Investigation of Spot Welding Process on Metallic Targets Impacted by Flat and Conical Projectiles

S. Hosseinzadeh Salehkouh<sup>1</sup>, T. Mirzababaie Mostofi<sup>2</sup>, H. Babaei<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup> Ph.D. Candidate, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

<sup>2</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Eyvanekey, Eyvanekey, Iran.

<sup>3</sup> Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering, University of Guilan, Rasht, Iran.

### Abstract

Due to the ability of the spot-welding process to create a quality connection between metal plates, especially those with very different mechanical properties, this process has been taken into consideration in recent years. In this method, when two metallic plates welded together under high applied pressure, an atomic bonding is created at the surface of the plates. A single stage compressed gas gun impact test facility was used for carrying out Impact Spot Welding tests. In this study the steel plate with a thickness of 4 mm was considered as a base plate and copper, brass, and aluminum plates were used as front layers and they are under direct contact with flat- and conical-nosed metallic projectiles within the velocity ranging from 100 to 150 m/s. In order to investigate the effect of various parameters in this process, different combination of bilayer metals with 0.1, 0.2 and 0.5 mm gaps were used. The welded interface was studied by Scanning Electron Microscopy (SEM). The results of this study showed that in the collision zone, especially in the central areas a complete bonding has occurred.

**Keywords:** Bonding in the Solid Phase; Gas Gun; Impact Spot Welding; Scanning Electron Microscopy.

## ۱- مقدمه

امروزه جوشکاری یکی از فرآیندهای پرکاربرد تولیدی در صنایع مختلف است. جوشکاری حالت جامد، یکی از روش‌های جوشکاری غالب و پرکاربرد است [۱-۲۴]. در این فرآیند نیازی به ذوب قطعات نیست و تنها یک اتصال متالورژیکی بین آن‌ها رخ می‌دهد. یکی از روش‌های جوشکاری حالت جامد، جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای است. این روش، یک فرآیند دینامیکی سرعت‌بالا بوده و زمانی اتفاق می‌افتد که پرتابه‌ای به دو فلز- که در فاصله مشخصی نسبت به یکدیگر قرار دارند- ضربه بزند. بین دو ورق جداگانه که در تماس با یکدیگر قرار می‌گیرند، اتصال متالورژیکی برقرار می‌شود. آزمایش‌های بسیاری در زمینه جوشکاری نقطه‌ای انجام شده است.

طی سال‌های ۱۹۶۵ تا ۱۹۸۰ برخی از محققان آزمایش‌های خود را با پرتابه‌های مختلفی از قبیل، میکروفیلیم‌ها و جت‌های آب انجام دادند [۲-۴]؛ درحالی‌که برخی دیگر، از تفنگ‌های مخصوصی برای حرکت یک ورق به‌سوی ورق دیگر استفاده نموده‌اند [۵].

در سال‌های ۱۹۹۵ تا ۱۹۹۷ تورگوتلو و الحسنی از پرتابه‌های نرم با شکل دماغه‌های مختلف که دارای سرعت‌های بالاتر از ۷۵۰ متر بر ثانیه بود، برای انجام آزمایش‌های خود استفاده نمودند [۶-۷]. این محققان نشان دادند که این فرآیند، جوشی را ایجاد می‌کند که مشابه جوش انفجاری با زاویه برخورد یکتا بوده و در نهایت موجب اتصال متالورژیکی بین صفحات می‌گردد. در این فرآیند، پرتابه با ورق پرنده برخورد کرده و تغییر شکل می‌دهد. سپس ورق پرنده در زاویه برخورد مشخصی به ورق پایه ضربه می‌زند و موجب گسترش تغییر شکل پلاستیک می‌گردد و در فضای بین صفحات جت ایجاد می‌شود [۸]. واکنش بین جت‌ها از هر دو سطح، به‌طور مؤثری دو ورق را به یکدیگر متصل می‌سازد. ناحیه جوش دارای شکل ظاهری موجی شکل است. نواحی مجاور ناحیه موجی شکل، استحکام و تغییر شکل پلاستیک بیشتری را نشان می‌دهند. تورگوتلو و همکارانش ادعا کردند که استحکام ناحیه جوش به میزان قابل‌توجهی به وجود این

الگوی موجی شکل مرتبط است. مطالعه روی شکل دماغه-پرتابه، تأثیر آن را روی خواص اتصال نشان می‌دهد. مقایسه‌ی هندسه دماغه‌ی پرتابه‌ها نشان داد که پرتابه‌هایی با دماغه مسطح، نواحی جوش نخورده‌ای را در مرکز ضربه نتیجه می‌دهند؛ درحالی‌که در دماغه‌های مخروطی ناحیه جوش نخورده‌مرکزی حذف می‌شود و الگوی موجی شکلی در سرتاسر ناحیه جوش ایجاد می‌شود. نتایج مطالعات نشان می‌دهد که پرتابه با دماغه ۱۲۰ درجه، بهترین نتیجه را ارائه می‌دهد [۹۲].

در سال ۲۰۰۹، چیدری و همکاران مطالعه آزمایشگاهی و شبیه‌سازی عددی جوشکاری ضربه‌ای با استفاده از ورق‌های آلومینیومی تک لایه و دولایه با استفاده از دستگاه تفنگ گازی را مورد بررسی قرار دادند. مطالعه آن‌ها تفاوت در کیفیت اتصال صفحه پرنده دولایه را نشان می‌دهد. در حالت کلی مساحت اتصال بین دو صفحه پرنده، کمتر از صفحه پرنده پیشرو و صفحه هدف است. شبیه‌سازی‌ها نشان می‌دهد که زبری سطح صفحه پرنده پس از ضربه به صفحه هدف، افزایش می‌یابد. تطابق مدل‌سازی عددی با آزمایش‌ها نشان می‌دهد که سطح تماس بین دو صفحه پرنده در لحظه تماس، صاف نیست [۱۰].

همچنین طی سال‌های ۲۰۰۹ تا ۲۰۱۵ فنلی و ویویو رفتار الاستیک-پلاستیک اتصالات جوش نقطه‌ای را مورد مطالعه قرار دادند [۱۱-۱۵]. با توجه به تحقیقات اشاره شده می‌توان به این نکته اشاره نمود که برخلاف نتایج آزمایش‌های تورگوتلو و الحسنی که وجود نقاط جوش نخورده در مرکز ناحیه برخورد پرتابه با دماغه‌ی مسطح را نشان می‌دهد، در این مطالعه مشخص می‌شود که اگر پرتابه صلب باشد، حتی زمانی که از پرتابه با شکل دماغه مسطح استفاده شود، اتصال یکنواختی در طول ناحیه برخورد ایجاد خواهد شد. در این مقاله فرآیند جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای به کمک سامانه تفنگ گازی مورد بررسی قرار گرفته است. به‌منظور بررسی تأثیر متغیرهایی مانند سرعت و شکل هندسی دماغه‌ی پرتابه بر فصل مشترک اتصال، از پرتابه‌های فلزی با شکل دماغه مسطح و مخروطی (با زاویه‌ی رأس ۱۵۰ درجه) با سرعت‌های

<sup>3</sup> Fanelli

<sup>4</sup> Vivio

<sup>1</sup> Turgutlu

<sup>2</sup> Al-Hassani

نماید. مقدار زمان شمارش شده پردازش می‌شود و برحسب میکروثانیه روی صفحه‌نمایش، به نمایش درمی‌آید. حال با داشتن زمان و فاصله حس‌گرهای نوری می‌توان سرعت برخورد پرتابه را محاسبه نمود که در این مطالعه در حدود ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر بر ثانیه محاسبه شده است. شایان ذکر است که جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای به کمک ۴ نوع ورق شامل فولاد، مس، برنج و آلومینیوم انجام می‌گیرد. ضخامت ورق‌ها ۰/۵، ۱، ۴ میلی‌متر و فاصله بین ورق‌ها ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ میلی‌متر است.



شکل ۱- سامانه تفنگ گازی [۱۶ و ۱۷]

### ۳- تشریح و دسته‌بندی آزمایش‌ها

#### ۳-۱- تشریح آزمایش‌ها

به‌منظور آماده‌سازی نمونه‌ها برای آزمون ضربه، ابتدا سطح نمونه‌ها به‌طور کامل و یکنواخت به کمک سنباده P1000 و سپس P2000 سنباده کاری و سپس پرداخت می‌شود. به‌منظور پاک‌سازی چربی و مواد روغنی از سطح ورق‌ها از محلول استون استفاده می‌شود. این امر موجب از بین رفتن سریع کلیه مواد اضافی روی سطح می‌شود. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده از تحقیقات تورگوتلو و همکاران، در سرعت‌های بالا (حدود ۷۵۰ متر بر ثانیه) استفاده از پرتابه‌های نرم و سبک نتایج بهتری را در بر دارد [۶]؛ اما از آنجایی که در این مقاله سرعت پرتابه در محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر بر ثانیه

برخورد در محدوده ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر بر ثانیه استفاده شده است. همچنین به‌منظور بررسی شکل موج‌های ایجاد شده در اثر جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای، فصل مشترک اتصال توسط میکروسکوپ الکترونی، مورد بررسی قرار گرفته است. بعلاوه به‌منظور مطالعه تأثیر لایه‌بندی‌های مختلف بر شکل‌گیری جوش نقطه‌ای ضربه‌ای، ترکیبات مختلفی از ورق شامل مس-فولاد، آلومینیوم-فولاد، مس-برنج و مس-مس تحت جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای قرار گرفته‌اند؛ همچنین به‌منظور بررسی تأثیر ضخامت صفحات بر شکل‌گیری جوش نقطه‌ای ضربه‌ای، ورق با ضخامت‌های مختلف، مورد استفاده قرار گرفته است و میزان جابجایی پرتابه در ورق‌ها اندازه‌گیری شده است.

### ۲- مواد و تجهیزات

همان‌طور که در شکل ۱ مشاهده می‌شود، آزمون ضربه توسط سامانه تفنگ گازی موجود در آزمایشگاه ضربه دانشکده‌ی فنی دانشگاه گیلان انجام شده است. تجهیزات سامانه تفنگ گازی شامل، لوله اصلی دستگاه، کپسول هوا با فشار ماکزیمم ۲۰۰ بار، کپسول هوای ثانویه با قابلیت شارژ توسط کپسول اصلی با فشارهای متفاوتی که برای آزمایش نیاز است، کمپرسور، شیرهای کنترل، حس‌گر فشار (صفر تا ۲۵ بار)، لوله با قطر داخلی ۱۴ میلی‌متر و طول یک متر، سرعت‌سنج و نگاه‌دارنده ورق است. اطلاعات فشار به کمک حس‌گر فشار خوانده می‌شود که در لوله تفنگ گازی تعبیه شده است. اطلاعات مربوط به سرعت پرتابه به کمک سرعت-سنج لیزری که در قسمت خروجی لوله نصب شده است، دریافت و توسط نمایشگر دیجیتال نشان داده می‌شود. نحوه محاسبه سرعت به کمک سرعت‌سنج لیزری بدین صورت است که در این سیستم از دو عدد دیود ساطع‌کننده پرتوی نور منفرد و دو عدد آشکارساز پرتو نور استفاده شده است که در قسمت خروجی لوله روبروی یکدیگر قرار می‌گیرند و با خروج پرتابه از لوله، ابتدا پرتابه پرتو نور لیزر اول را قطع می‌نماید که این عمل موجب تغییر در ولتاژ می‌شود. با تغییر ولتاژ، پیغامی برای زمان‌سنج ارسال شده که در این لحظه زمان‌سنج شروع به شمارش می‌نماید. هنگامی که پرتابه نور لیزر دوم را قطع کند، با تغییر ولتاژ مجدد پیغام مجددی به زمان‌سنج فرستاده شده و زمان‌سنج شمارش را قطع می‌کند.

#### ۴- نتایج آزمایشگاهی

به‌منظور بررسی تأثیر ضخامت ورق جلویی نتایج آزمایش‌های قسمت اول جدول ۱ در شکل ۲ نشان داده شده است. این شکل تأثیر ضخامت ورق جلویی در جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های مسی با دو ضخامت ۰/۵ و ۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد که در فاصله ۰/۲ میلی‌متر از ورق فولادی قرار دارند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، با کاهش ضخامت ورق جلویی، میزان جابجایی پرتابه در ورق افزایش یافته است؛ بنابراین نتیجه می‌شود که در نمونه‌هایی با سرعت و فواصل بین لایه‌ای یکسان، با کاهش ضخامت ورق جلویی می‌توان میزان نفوذ ورق‌ها در یکدیگر را افزایش داد و به اتصال مطلوب‌تری دست یافت. از طرفی مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پرتابه، میزان جابجایی پرتابه در ورق افزایش می‌یابد، از این رو ورق‌ها به میزان بیشتری در یکدیگر نفوذ کرده و احتمال شکل‌گیری الگوی موجی شکل در فصل مشترک اتصال دو ورق و دستیابی به اتصال مطلوب افزایش می‌یابد.

به‌منظور بررسی اثر جنس ورق جلویی بر میزان جابجایی پرتابه در جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای در سرعت‌های مختلف، نتایج آزمایش‌های قسمت اول و دوم جدول ۱ در شکل ۳ نشان داده است.

شکل ۳ تأثیر جنس ورق جلویی بر میزان فرورفتگی داخل ورق جلو در جوشکاری نقطه‌ای ترکیب ورق‌های مس- فولاد و آلومینیوم- فولاد با ضخامت ۰/۵ میلی‌متر و فاصله بین لایه‌های ۰/۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. همان‌طور که در شکل ۳ مشاهده می‌شود، میزان فرورفتگی داخل ورق جلو در جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های آلومینیومی به فولادی در تمامی سرعت‌های نشان داده شده، بیشتر از میزان فرورفتگی داخل ورق جلو در جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های مسی به فولادی است. به‌عبارت‌دیگر در جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های آلومینیومی به فولادی، تغییر مکان دائمی بیشتری رخ داده است. از این رو ورق آلومینیومی به میزان بیشتری داخل ورق فولادی نفوذ کرده و در نتیجه در سطح صفحات اتصال اتمی قوی‌تری ایجاد می‌گردد؛ بنابراین می‌توان نتیجه گرفت که در نمونه‌هایی با سرعت، فواصل بین لایه‌ای و ضخامت یکسان، با انتخاب ورق آلومینیوم به‌عنوان ورق جلویی اتصال مطلوب-تری نسبت به ورق مسی نتیجه شده است.

است، پرتابه‌ی فولادی از جنس VCN200 دارای سختی حدود ۳۰ راکول در حالت خام و بدون عملیات حرارتی، با جرم‌های ۳۸ گرم (پرتابه با شکل دماغه‌ی مسطح) و ۴۱ گرم (پرتابه با شکل دماغه‌ی مخروطی) مورد استفاده قرار گرفته است. ورق فولادی St-37 با ابعاد ۶۵×۶۵ میلی‌متر و ضخامت ۴ میلی‌متر به‌عنوان ورق پایه و ورق‌هایی از جنس مس، برنج و آلومینیوم برای جوشکاری روی این ورق انتخاب شدند. فاصله بین ورق‌ها ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شده است.

#### ۳-۲- دسته‌بندی آزمایش‌ها

آزمایش‌ها با توجه به نوع ورق‌های مورد استفاده به چهار قسمت به‌صورت جدول ۱ تقسیم‌بندی شدند. همان‌طور که مشاهده می‌شود، به منظور بررسی تأثیر جنس ورق بر جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای، جنس‌های مختلفی از ورق شامل مس، فولاد، آلومینیوم و برنج، مورد آزمایش قرار گرفته‌اند؛ همچنین به منظور بررسی تأثیر ضخامت ورق، از ورق‌هایی با ضخامت‌های مختلف استفاده شده است. در این آزمایش‌ها پرتابه‌های مسطح و مخروطی بکار گرفته شده‌اند. میزان جابجایی پرتابه در ورق، یکی از خروجی‌های این فرآیند است. آگاهی از میزان جابجایی پرتابه در ورق پایه می‌تواند در انتخاب ضخامت آن مؤثر باشد. بعلاوه با محاسبه میزان جابجایی پرتابه در ورق می‌توان دریافت که پرتابه با سرعت‌های مختلف تا چه میزان در ورق نفوذ می‌کند، به‌نحوی که ورق در ناحیه برخورد پاره نشود و اتصال اتفاق بیفتد. با توجه به جدول ۱ مشاهده می‌شود که به‌منظور بررسی اثر ضخامت ورق جلویی بر میزان جابجایی پرتابه در جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای در سرعت‌های مختلف، ورق‌هایی از جنس مس با ضخامت‌های مختلف برای جوشکاری روی ورق‌های فولادی انتخاب شدند (آزمایش‌های قسمت اول جدول ۱). در ادامه برای بررسی اثر جنس ورق جلویی بر میزان جابجایی پرتابه، ورق‌هایی از جنس مس و آلومینیوم برای جوشکاری روی ورق‌های فولادی انتخاب شدند (آزمایش‌های قسمت اول و دوم جدول ۱)؛ همچنین به‌منظور مقایسه تأثیر جنس ورق پایه بر میزان جابجایی پرتابه در آزمایش‌های قسمت ۱ و ۳ و ۴، جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای ورق مس روی ورق‌هایی از جنس فولاد، برنج و مس مورد بررسی قرار گرفت.

ترکیب ورق‌های مس- فولاد و مس- مس بسشتر است. از این رو انتظار می‌رود، نفوذ بیشتر پرتابه در ورق موجب تقویت الگوی موجی شکل در فصل مشترک اتصال ورق‌ها شده و در نتیجه جوش مطلوب‌تری ایجاد گردد.

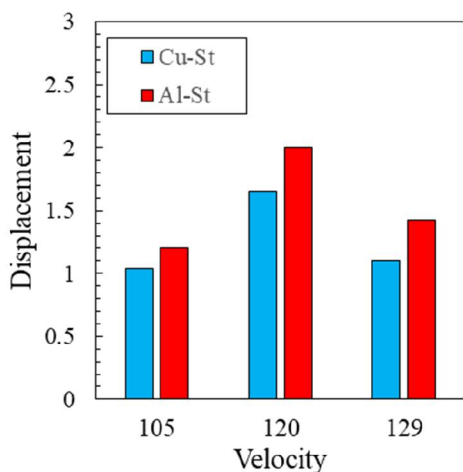
#### ۵- بررسی فصل مشترک اتصال نمونه‌ها

نمونه‌های جوش‌خورده به منظور مشاهده و بررسی ناحیه جوش به کمک میکروسکوپ الکترونی موجود در آزمایشگاه علم مواد دانشکده‌ی فنی دانشگاه گیلان مورد بررسی قرار گرفتند.

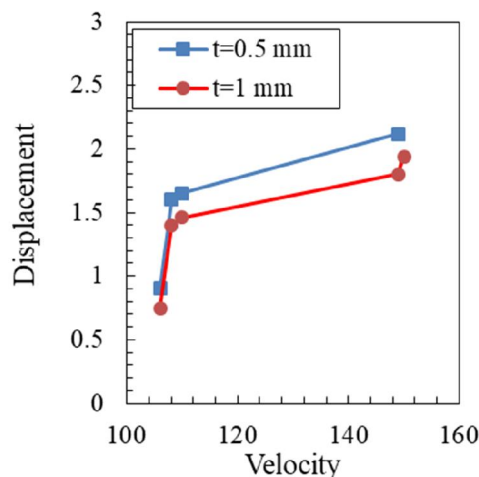
به منظور مقایسه تأثیر جنس ورق پایه بر میزان فرورفتگی داخل ورق جلو، نتایج آزمایش‌های قسمت ۱ و ۳ و ۴ جدول ۱ در شکل ۴ با یکدیگر مقایسه شده است. شکل ۴ تأثیر جنس ورق پایه بر میزان فرورفتگی داخل ورق جلو در سرعت ۱۵۰ متر بر ثانیه را نشان می‌دهد. در این شکل، میزان فرورفتگی در داخل ورق جلو برای سه ترکیب مختلف شامل مس- فولاد، مس- مس و مس- برنج مقایسه گردیده است. ضخامت ورق مس ۰/۵ میلی‌متر و فاصله‌ی بین ورق‌ها ۰/۲ میلی‌متر در نظر گرفته شده است. همان‌طور که مشاهده می‌شود، در جوشکاری نقطه‌ای ترکیب ورق‌های مس- برنج میزان فرورفتگی داخل ورق جلو در مقایسه با

جدول ۱- تقسیم‌بندی آزمایش‌های انجام شده

شماره	جنس ورق‌ها	ضخامت ورق‌ها	فاصله‌ی بین ورق‌ها	نوع پرتابه
۱	مس- فولاد	مس: ۰/۵ و ۱ میلی‌متر فولاد: ۰/۵ و ۴ میلی‌متر	۰/۱ و ۰/۲ و ۰/۵ میلی‌متر	مسطح و مخروطی
۲	آلومینیوم - فولاد	آلومینیوم: ۰/۵ و ۱ و ۱/۵ میلی‌متر فولاد: ۴ میلی‌متر	۰/۱ و ۰/۲ میلی‌متر	مسطح و مخروطی
۳	مس- برنج	مس: ۱ میلی‌متر برنج: ۰/۵ میلی‌متر	۰/۲ و ۰/۵ میلی‌متر	مسطح
۴	مس- مس	مس: ۰/۵ و ۱ میلی‌متر	۰/۲ میلی‌متر	مسطح



شکل ۳- مقایسه‌ی تأثیر جنس ورق جلویی بر میزان جابجایی پرتابه در جوشکاری نقطه‌ای مس- فولاد و آلومینیوم- فولاد در سرعت‌های مختلف

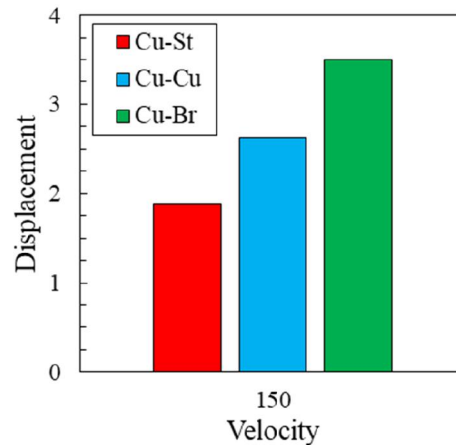


شکل ۲- مقایسه‌ی تأثیر ضخامت ورق جلویی بر میزان جابجایی پرتابه در جوشکاری نقطه‌ای ورق‌های فولادی و مسی

برای بررسی رفع می‌شود. مراحل آماده‌سازی نمونه‌های فلزی که در آزمایش‌های این مقاله مورد استفاده قرار گرفته‌اند، شامل برش نمونه برحسب جنس و سایز نمونه، سنگ زنی، سنباده‌زنی، تمیزکاری سطوح و خشک کردن نمونه است. از این رو نمونه‌هایی با طول ۳۰ میلی‌متر و عرض ۲۰ میلی‌متر برش داده شده سپس به‌منظور برطرف نمودن خطوط و ناهمواری‌های سطحی، نمونه‌ها سنباده زده شدند. پس از آن پولیش زده شده و سطح نمونه‌ها با الکل شسته و خشک شدند. با انجام مراحل فوق، نمونه‌ها برای بررسی با میکروسکوپ الکترونی آماده شدند.

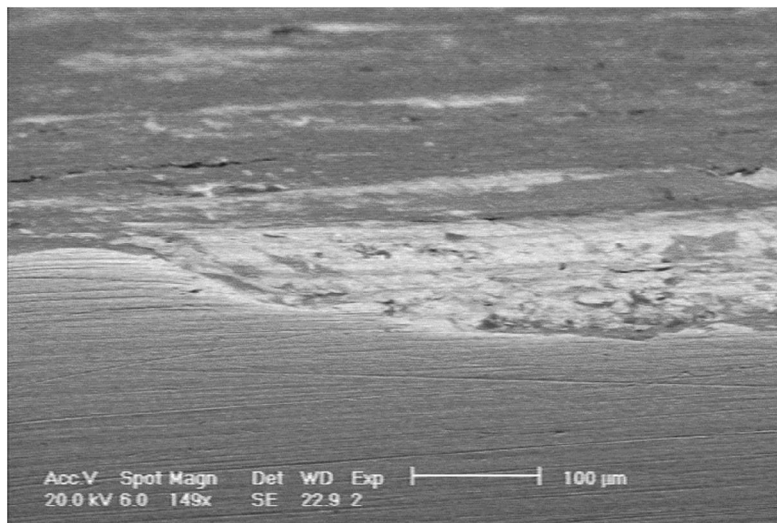
برخی از این نمونه‌ها دارای فصل مشترک اتصال موجی شکل و برخی دیگر دارای فصل مشترک اتصال مسطح بودند. شکل‌های ۵ تا ۷ تصاویر به‌دست‌آمده از نمونه‌های با فاصله بین لایه‌ای ۰/۱ میلی‌متر را نشان می‌دهد.

در شکل ۵ از پرتابه‌ی مخروطی با سرعت ۱۳۰ متر بر ثانیه برای جوشکاری نقطه‌ای ورق آلومینیومی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است که در فاصله ۰/۱ میلی‌متر از ورق فولادی قرار دارد. در این تصویر، فصل مشترک اتصال ورق‌های فولادی و آلومینیومی قابل‌مشاهده است. مشاهده می‌شود که فصل مشترک اتصال دارای الگوی موجی شکل بوده و اتصال کامل رخ داده است.

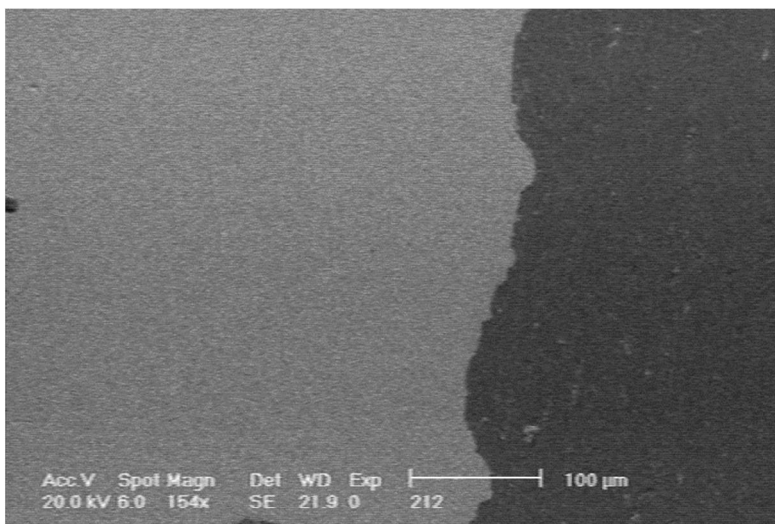


شکل ۴- مقایسه‌ی تأثیر جنس ورق پایه بر میزان جابجایی پرتابه

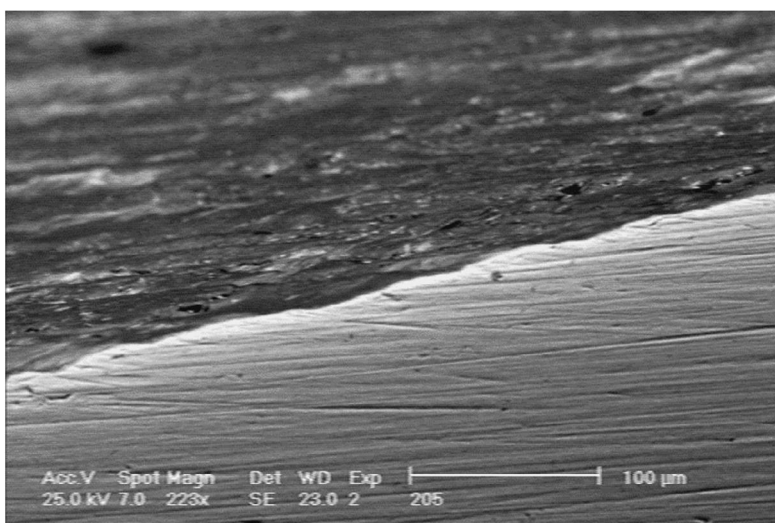
از آنجایی که یکی از مهم‌ترین مسائل در استفاده از دستگاه میکروسکوپ الکترونی، آماده‌سازی نمونه‌ها است؛ بطوریکه بهره‌گیری از روش‌های نامناسب آماده‌سازی نمونه می‌تواند نتایج را به شکل قابل‌توجهی تحت تأثیر قرار دهد. نمونه‌های این میکروسکوپ باید اندازه‌ی مناسبی داشته، در شرایط خلاء پایدار بوده و هادی جریان الکتریکی باشند. بیشتر فلزات این خواص را دارا هستند و در خصوص سرامیک‌ها و پلاستیک‌ها، با اعمال پوشش هادی مشکلات



شکل ۵- جوش خوردن ورق آلومینیومی به فولادی با پرتابه مخروطی ( $V=130 \text{ m/s}$ ,  $t=1.5 \text{ mm}$ ,  $SD=0.1 \text{ mm}$ )



شکل ۶- جوش خوردن ورق آلومینیومی به فولادی با پرتابه با دماغه‌ی مسطح ( $V=130$  m/s,  $t=1.5$  mm,  $SD=0.1$  mm)



شکل ۷- جوش خوردن ورق آلومینیومی به فولادی با پرتابه مخروطی ( $V=105$  m/s,  $t=1$  mm,  $SD=0.1$  mm)

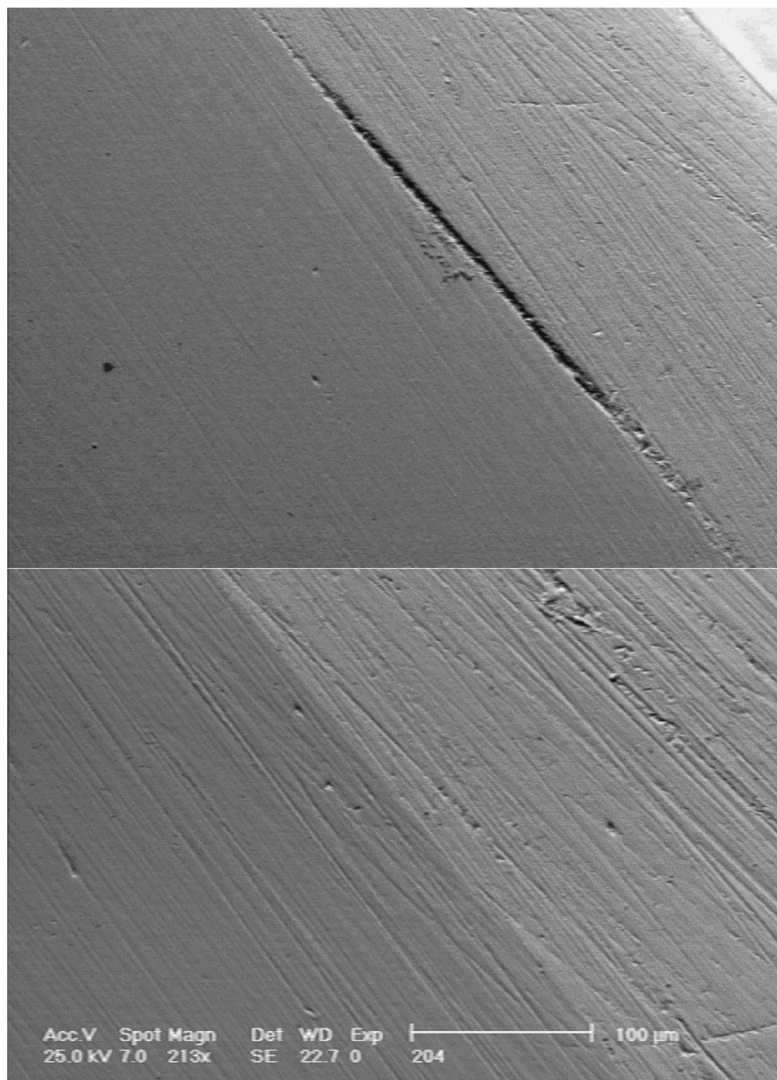
در شکل ۶ مشابه شکل ۵ از پرتابه با سرعت ۱۳۰ متر بر ثانیه برای جوشکاری نقطه‌ای ورق آلومینیومی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است که در فاصله ۰/۱ میلی‌متر از ورق فولادی قرار دارد. با این تفاوت که در این شکل پرتابه‌ای با دماغه‌ی مسطح بکار گرفته شده است. با مقایسه این دو شکل نتیجه می‌شود که در جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با پرتابه‌ی صلب، حتی برای حالتی که از پرتابه با دماغه مسطح استفاده شود، در سرتاسر فصل مشترک اتصال، الگوی موجی

در شکل ۵ از پرتابه‌ی مخروطی با سرعت ۱۳۰ متر بر ثانیه برای جوشکاری نقطه‌ای ورق آلومینیومی با ضخامت ۱/۵ میلی‌متر استفاده شده است که در فاصله ۰/۱ میلی‌متر از ورق فولادی قرار دارد. در این تصاویر، فصل مشترک اتصال ورق‌های فولادی و آلومینیومی قابل مشاهده است. مشاهده می‌شود که فصل مشترک اتصال دارای الگوی موجی شکل بوده و اتصال کامل رخ داده است.

تصاویر به‌دست‌آمده از فصل مشترک اتصال ورق‌های آلومینیومی و فولادی مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت پرتابه می‌توان به اتصال مطلوب‌تری دست یافت. شکل‌های ۸ و ۹ تصاویر به‌دست‌آمده از جوشکاری نقطه‌ای ورق مسی به ورق فولادی برای نمونه‌هایی با فاصله بین لایه‌های ۰/۲ میلی‌متر را نشان می‌دهد. ضخامت ورق مس مورد استفاده برای نمونه‌های نشان داده شده در شکل‌های ۸ و ۹ به ترتیب، یک و ۰/۵ میلی‌متر است. در شکل ۸ پرتابه‌ای

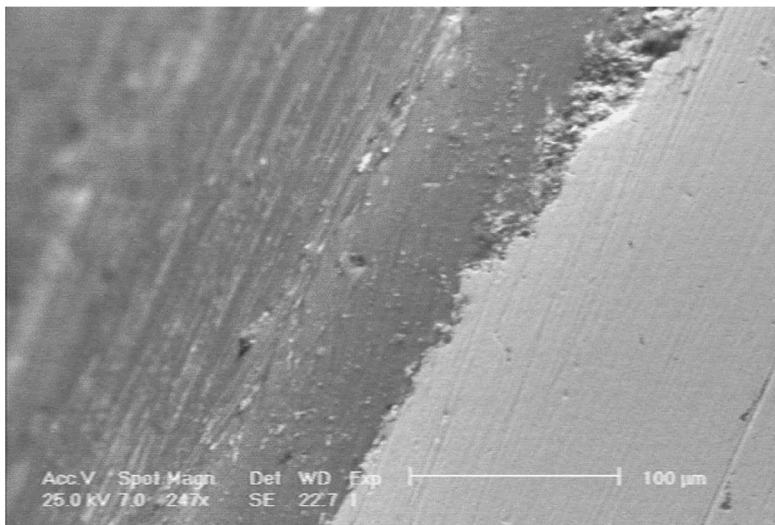
شکل ایجاد می‌شود و ناحیه جوش نخورده‌ی مرکزی مشاهده نمی‌گردد.

در شکل ۷ از پرتابه مخروطی با سرعت ۱۰۵ متر بر ثانیه برای جوشکاری نقطه‌ای ورق آلومینیومی با ضخامت یک میلی‌متر استفاده شده است که در فاصله ۰/۱ میلی‌متر از ورق فولادی قرار دارد. با مقایسه شکل‌های ۵ و ۷ نتیجه می‌شود که کاهش سرعت پرتابه موجب تضعیف الگوی موجی شکل در فصل مشترک اتصال می‌شود؛ بنابراین با مقایسه



شکل ۸- جوش خوردن ورق مسی به فولادی با پرتابه‌ی مخروطی (V=108 m/s, t=1 mm, SD=0.2 mm)





شکل ۹- جوش خوردن ورق مسی به فولادی با پرتابه با دماغه‌ی مسطح (V=129 m/s, t=0.5 mm, SD=0.2 mm)

بنابراین طبق مرجع [۴] در این نمونه‌ها جوش، دارای استحکام قابل قبولی است.

#### ۶- نتیجه‌گیری

در این مقاله جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای با استفاده از دستگاه تفنگ‌گازی به‌صورت تجربی مورد مطالعه قرار گرفته است. ورق فولادی St-37 با ضخامت چهار میلی‌متر به‌عنوان ورق زیرین و ورق‌هایی از جنس مس، برنج و آلومینیوم برای جوشکاری روی این ورق انتخاب شده‌اند. فاصله بین ورق‌ها ۰/۱، ۰/۲ و ۰/۵ میلی‌متر در نظر گرفته شد. پرتابه‌های فلزی با شکل دماغه مسطح و مخروطی به ترتیب با جرم‌های ۳۸ گرم و ۴۱ گرم با سرعت‌های برخورد در محدوده‌ی ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است. میزان جابجایی پرتابه در این ورق‌ها محاسبه گردیده است؛ همچنین شکل فصل مشترک اتصال توسط میکروسکوپ الکترونی مورد بررسی قرار گرفته است. بررسی نتایج آزمایشگاهی نشان می‌دهد:

۱- استفاده از پرتابه‌های صلب امکان جوشکاری ورق‌های مس، برنج و آلومینیوم به ورق فولادی در سرعت‌هایی در محدوده‌ی ۱۰۰ تا ۱۵۰ متر بر ثانیه را فراهم می‌آورد.

مخروطی با سرعت ۱۰۸ متر بر ثانیه مورد استفاده قرار گرفته است. با بررسی تصاویر به‌دست آمده از میکروسکوپ الکترونی می‌توان دریافت که فصل مشترک اتصال ورق‌های مسی و فولادی در شکل ۸ دارای الگوی موجی شکل نمی‌باشد؛ زیرا در این نمونه سرعت در محل برخورد به‌منظور دستیابی به اتصال کامل مناسب نبوده است. با توجه به این امر که استحکام ناحیه جوش به میزان قابل‌ملاحظه‌ای به وجود این الگوی موجی شکل بستگی دارد [۴]. از این‌رو در این نمونه اتصال قابل قبولی رخ نداده و اتصالی ناقص مشاهده می‌شود.

در شکل ۹ از پرتابه با دماغه مسطح و سرعت ۱۲۹ متر بر ثانیه استفاده شده است. ایجاد الگوی موجی شکل در فصل مشترک اتصال این نمونه، حاکی از شکل‌گیری اتصال کامل بین دو ورق است؛ بنابراین مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت در محل برخورد و کاهش ضخامت ورق جلویی (مس) در شکل ۹، فصل مشترک اتصال، از حالت مسطح به حالت موجی شکل تغییر می‌یابد؛ بنابراین با مقایسه شکل‌های ۸ و ۹ نتیجه می‌شود که برای نمونه‌هایی با فواصل بین لایه‌های یکسان، با افزایش سرعت در ناحیه برخورد و کاهش ضخامت ورق جلویی، امکان دستیابی به اتصال قابل‌قبول فراهم می‌گردد. فصل مشترک اتصال تمامی این نمونه‌ها به‌جز نمونه نشان داده‌شده در شکل ۸، دارای الگوی موجی شکل بوده

[2] Rolsten RF, Dean WA, O'Neil RW (1965) Hypervelocity impact and spot welding. AIAA J 3.

[3] Erdmann-Jesnitzer F, Louis H, Wiedemeier J (1977) Spot welding of thin metal foils with the fluid impact welding process. Machinery Market 85: 1907-1909.

[4] Erdmann-Jesnitzer F, Louis H, Wiedemeier J (1978) Fluid impact welding, explosive cladding. IIW Document 5: 248-278.

[5] Botros KK, Groves TK (1980) Fundamental impact-welding parameters - an experimental investigation using a 76-mm powder gun. J Appl Phys 51: 3706-3714.

[6] Turgutlu A, Al-Hassani STS, Akyurt M (1997) Assessment of bond interface in impact spot welding. Int J Impact Eng 19: 755-767.

[7] Turgutlu A, Al-Hassani STS, Akyurt M (1995) Experimental investigation of deformation and jetting during impact spot welding. Int J Impact Eng 16: 789-799.

[8] Turgutlu A, Al-Hassani STS, Akyurt M (1996) Impact welding of foils by water jets. Weld J 41-45.

[9] Turgutlu A, Al-Hassani STS, Akyurt M (1996) The influence of projectile nose shape on the morphology of interface in impact spot welds. Int J Impact Eng 18: 657-669.

[10] Chizari M, Barrett LM (2009) Single and double plate impact welding: Experimental and numerical simulation. Comp Mater Sci 46: 828-833.

[11] Vivio F (2009) A new theoretical approach for structural modelling of riveted and spot welded multi-spot structures. Int J Solids Struct 46: 4006-4024.

[12] Vivio F, Fanelli P (2009) A new analytical model for the elastic-plastic behavior of spot welded joints subjected to orthogonal load. Int J Solids Struct 46: 572-586.

[13] Fanelli P, Vivio F (2014) Analytical characterization of plastic flow in spot welded joints. Theor Appl Fract Mec 74: 48-54.

[14] Fanelli P, Fino A, Vivio F (2015) Analysis of elastic-plastic behavior and plastic front evaluation in spot welded joints. J Mech Sci Technol 90: 122-132.

[15] Fanelli P, Vivio F (2015) A general formulation of an analytical model for the elastic-plastic behavior of a spot weld finite element. Mech Res Commun 69: 54-65.

[16] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Hosseinzadeh S (2017) On dimensionless numbers for predicting large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. Thin Walled Struct 112: 118-24.

۲- شکل‌گیری الگوی موجی شکل در ناحیه جوش، به متغیرهایی مانند سرعت پرتابه، جنس و ضخامت ورق بستگی دارد.

۳- اگر پرتابه صلب باشد، حتی هنگام استفاده از پرتابه‌های با دماغه مسطح، اتصال یکنواختی در طول ناحیه‌ی برخورد مشاهده می‌شود.

۴- هر قدر میزان جابجایی پرتابه در ورق جلویی افزایش یابد، موجب حرکت ورق جلویی به سمت ورق زیرین شده و در نتیجه سطح تماس بین ورق جلویی و ورق زیرین شده و در نتیجه موجب افزایش در هم فرو رفتگی ورق مسطح، موجب افزایش در هم فرو رفتگی ورق جلویی و ورق زیرین شده و در نتیجه موجب شکل‌گیری و تقویت اتصال اتمی در سطح صفحات می‌گردد؛ بنابراین نتیجه می‌شود که افزایش میزان جابجایی پرتابه در ورق موجب افزایش در هم فرو رفتگی صفحات و در نتیجه تقویت الگوی موجی شکل و به دنبال آن افزایش استحکام جوش خواهد شد.

تمیزی سطوح تأثیر قابل توجهی در نتایج نهایی دارد؛ بنابراین سطوح ورق‌ها باید عاری از هرگونه چربی و مواد اضافی باشد؛ زیرا در فرآیند جوشکاری نقطه‌ای ضربه‌ای در سطح صفحات اتصال اتمی ایجاد می‌شود؛ بنابراین تمیزی سطح در ایجاد اتصال اتمی در سطح صفحات و در نتیجه شکل‌گیری جوش نقطه‌ای مطلوب مؤثر است.

## ۷- فهرست علائم

سرعت پرتابه،	$V$	m/s
ضخامت ورق،	$t$	mm
فاصله‌ی بین دو ورق،	$SD$	mm

## ۸- مراجع

[۱] سخایی، ا.، جلالی آقچای، ع.، کاظمی نصرآبادی، م. (۱۳۹۶) بررسی تجربی تأثیر پارامترهای فرآیند جوشکاری اصطکاکی اغتشاشی نقطه‌ای بر استحکام برشی اتصال ایجاد شده در آلیاژ آلومینیوم ۷۰۷۵-T6. مجله علمی پژوهشی مکانیک سازها و شماره ۶۶-۵۳ (۳): ۷.

- Mechanical Engineering 15(4): 361-368. (In Persian)
- [21] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2017) Experimental and theoretical study of large deformation of rectangular plates subjected to water hammer shock loading. Proc Inst Mech Eng-Part E: J Process Mech Eng 231(3):490-496.
- [22] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Study on the response of circular thin plate under low velocity impact. Geomech Eng 9(2): 207-218.
- [23] Mostofi TM, Babaei H, Alitavoli M, Lu G, Ruan D (2019) Large transverse deformation of double-layered rectangular plates subjected to gas mixture detonation load. Int J Impact Eng 125: 93-106.
- [24] Rezasefat M, Mirzababaie Mostofi T, Babaei H, Ziya-Shamami M, Alitavoli M (2018) Dynamic plastic response of double-layered circular metallic plates due to localized impulsive loading. Proc Inst Mech Eng-Part L J Mater Des Appl 1464420718760640.
- [17] Babaei H, Mostofi TM, Alitavoli M (2017) Experimental and analytical investigation into large ductile transverse deformation of monolithic and multi-layered metallic square targets struck normally by rigid spherical projectile. Thin Walled Struct 107: 257-265.
- [18] Babaei H, Jamali A, Mirzababaie Mostofi T, Ashraf Talesh S H (2015) Experimental study and mathematical modeling of deformation of rectangular plates under impact load. Journal of Solid and Fluid Mechanics 6(1): 143-152. (In Persian)
- [19] Babaei H, Darvizeh A, Alitavoli M, Mirzababaie Mostofi T (2015) Experimental and analytical investigation into plastic deformation of circular plates subjected to hydrodynamic loading. Journal of Modares Mechanical Engineering 15(2): 305-312. (In Persian)
- [20] Babaei H, Mirzababaie Mostofi T, Alitavoli M (2015) Experimental study and analytical modeling for inelastic response of rectangular plates under hydrodynamic loads. Journal of Modares