

## بررسی فصل مشترک جوشکاری انفجاری اتصال سه لایه ورق های آلومینیم ۵۰۸۳ / آلومینیم ۱۲۵۰ / فولاد دریایی

سید علی اصغر اکبری موسوی<sup>۱\*</sup>، محمد نوروزپور<sup>۲</sup>، امین مکی<sup>۳</sup>

۱- تهران - دانشگاه تهران - دانشکده مهندسی متالورژی و مواد

۲- تهران - ستاد نیروی دریایی آجا - فرماندهی فنی واحد طراحی

(تاریخ وصول: ۸۷/۵/۱۹، تاریخ پذیرش: ۸۷/۱۱/۴)

### چکیده

جوش انفجاری، در اثر برخورد مورب و با سرعت بالای صفحه ی پرنده به صفحه ی ساکن، بوجود می آید، که با تغییر شکل پلاستیک موضعی بسیار شدید صفحات در نقطه ی برخورد همراه است. در این روش به کمک نیروی موج انفجار، اتصال بین دو فلز انجام می شود. این نیرو، باید با زاویه و اندازه ی مناسب، به سطح قطعه اعمال شود تا اتصال مناسب و کاملی به دست آید. بنابراین تعیین پارامترهای جوشکاری بهینه، حساسیت بیشتری نسبت به روش های دیگر دارد. از انواع این متغیرها می توان، بار انفجاری و اندازه ی فاصله ی توقف بین صفحات را نام برد. در این پژوهش، تاثیر بار انفجاری و فاصله ی توقف بین آلومینیم ۱۲۵۰ / فولاد دریایی، بر خواص اتصال سه لایه ورق های آلومینیم ۵۰۸۳ / آلومینیم ۱۲۵۰ / فولاد دریایی بررسی شده است. نمونه ها برای بررسی ریزساختار متالورژیکی اتصال، توسط میکروسکوپ های نوری و الکترونی (SEM) مورد ارزیابی قرار گرفتند. همچنین در این پژوهش، فواصل توقف بهینه، بین آلومینیم ۱۲۵۰ و فولاد دریایی، با توجه به آزمایش ها تعیین شدند. نتایج، حاکی از آن بود که با افزایش فاصله توقف و بار انفجاری، شاهد تبدیل فصل مشترک، از حالت صاف به موجی و در نهایت، ایجاد تکه های مذاب بوده که با آنالیز EDS آنها، ترکیبات ترد بین فلزی، شناسایی شدند.

**واژه های کلیدی:** جوشکاری انفجاری، اتصال لایه ی کامپوزیتی، فولاد دریایی، ترکیبات بین فلزی، اتصال مواد غیر همجنس

### ۱. مقدمه

آلیاژهای آلومینیم به جای فولاد، در نواحی روسازه کشتیها تا حدود زیادی مرتفع گردیده است. اتصال آلومینیم و فولاد، با روشهای جوشکاری معمولی بدلیل اختلاف درجه حرارت آنها، بسیار مشکل است. همچنین، در حین جوشکاری ذوبی، ترکیبات بین فلزی ترد، در منطقه ی اتصال، ایجاد می شود

نتایج پیشرفتهای اخیر در تکنولوژی کشتی سازی، بیانگر این نکته است که با افزایش وزن در ناحیه ی فوقانی و سنگین شدن ماشین آلات، حرکت شناور را کند و تعادل شناور را کاهش می دهد. این محدودیت، با استفاده از

\* E-mail: akbarimusavi@ut.ac.ir

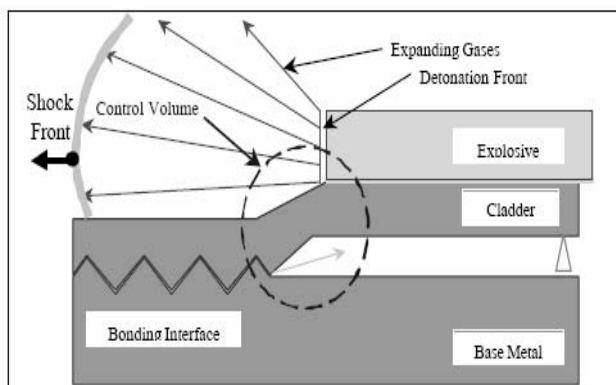
۱- دانشیار دانشگاه تهران

۲- کارشناس ارشد معماری

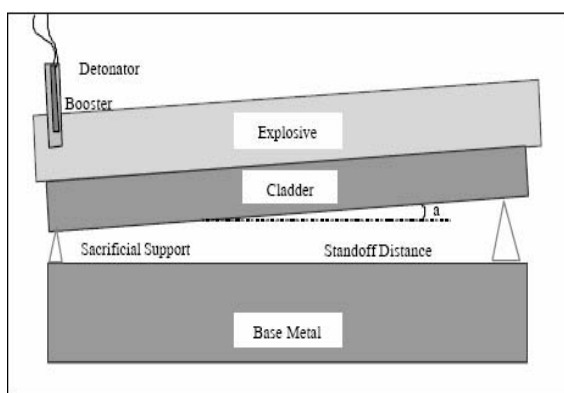
۳- دانشجوی کارشناسی مهندسی متالورژی و مواد

۲) چیدمان موازی [۱۱].

این چیدمانها در اشکال (۱) و (۲) نشان داده شده است. با توجه به چیدمانهای موجود و توصیف شده برای جوشکاری انفجاری، مکانیزمهای سینماتیکی مختلفی برای نحوه ی برخورد قطعات به یکدیگر، ارائه شده است [۱۱-۸، ۵ و ۴]. در جوشکاری های ذوبی، انرژی حرارتی، سبب ذوب شدن لایه های واسط بین فلزات می شود و حتی سبب تغییر ساختار فلزات می گردد، در حالی که در جوشکاری انفجاری، که نوعی جوشکاری فشاری می باشد، فقط ساختار ریز فلزات در ناحیه فصل مشترک، دچار تغییرات متالورژیکی می گردد و این یک فرایند حالت جامد می باشد. فلزات در ناحیه واسط بین خودشان، با تشکیل یک موج و گاهاً موج و گردابه به شدت فرو می روند. دانشمندان معتقدند که سطوح میانی بین دو فلز با تشکیل جت، تمیز و عاری از هر گونه آلودگی و اکسید می گردند [۱۲ و ۹].



شکل ۱- چیدمان موازی در جوشکاری انفجاری حین انفجار [۵].



شکل ۲- چیدمان زاویه ای در جوشکاری انفجاری [۵].

که خواص مکانیکی اتصال را کاهش می دهد. استفاده از این آلیاژ کامپوزیتی در محیط شور دریایی، سبب خوردگی گالوانیکی می شود، چرا که این دو فلز در مجاورت محیط خورنده ای چون آب دریا، با میزان شوری بالا، تشکیل پیل دو فلزی را داده و با سرعت زیادی شروع به خورده شدن می کنند [۱۲ و ۱]. یکی از روشهای سنتی مقابله با این عیب، استفاده از لاستیک یا واشرهای نئوپرن بین آلومینیم و فولاد می باشد. این نوع اتصال، توسط پرچ یا پیچ های قفل شونده و قرار دادن واشر لاستیکی بین دو فلز، برقرار می گردد. واشرهای لاستیکی یا نئوپرن که به عنوان عایق جدا کننده ی دو فلز هستند، با گذشت زمان و از دست دادن خاصیت خود و همچنین حرکات کشتی در امواج، پاره شده و تماس دو فلز به صورت مستقیم در محیط خورنده (آب دریا) برقرار می گردد که منجر به خوردگی گالوانیکی خواهد شد. برای مرتفع نمودن این عیوب، بهترین راه حل اتصال سه لایه کامپوزیت، روش جوشکاری انفجاری می باشد. در این تحقیق، تاثیر تغییر فواصل توقف و بار انفجاری، در جوشکاری انفجاری سه لایه ی ورقهای کامپوزیتی مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین، از طریق موقعیت نقاط در پنجره جوشکاری می توان، نوع ساختار فصل مشترک اتصال (صاف-موجی) را بر اساس زاویه دینامیکی برخورد-سرعت برخورد پیشگوئی نمود [۶-۳].

### ۱-۱- مکانیزم جوشکاری انفجاری

بنا به نظریه های مختلف، مکانیزم جوشکاری انفجاری مبتنی بر پدیده ی تشکیل جت می باشد [۱۱-۸]. در اثر برخورد صفحه پرنده به صفحه مادر با سرعت زیاد، فشار اعمالی در نقطه برخورد، به میزانی در حد گیگا پاسکال می رسد که سبب می شود تا فلزات، رفتاری سیال گونه بیابند و شبیه به سیالاتی با لزجت پایین عمل کنند [۱۲ و ۹، ۱۱]. بروز تغییر شکل پلاستیک در فصل مشترک، باعث شکسته شدن اکسیدها و افزایش درگیری در سطح تماس می شود. جت تشکیل شده در فصل مشترک، باعث خروج اکسیدها و سایر آلودگیهای موجود در سطوح فصل مشترک بین فلزات می گردد. با پاکسازی سطوح در محل برخورد، در صورت کافی بودن انرژی انفجاری برخوردی، دو سطح تحت فشار زیاد، در یکدیگر فرو رفته و اتصال به خوبی برقرار می گردد. در صورتی که در صفحه ی پرنده و مادر، در یک فاصله بین اتمی مناسبی قرار گیرند، انرژی پتانسیل حداقل و نیروهای جاذبه و دافعه به تعادل رسیده و یک پیوند متالورژیکی یا بین فلزی تشکیل می شود [۹].

چیدمانهای جوشکاری انفجاری عبارتند از:

(۱) چیدمان زاویه ای

## ۲. مواد و روش تحقیق

سطوح بعد از عملیات سند بلاست و زنگ زدایی و بریده شدن، در قطعات با ابعاد قید شده، با عملیات و سنگ زنی صاف شده و پس از پرداخت سطوح با سمباده های شماره ی ۶۰۰، ۸۰۰ و در نهایت ۱۲۰۰، پرداخت کاری گردیده و با محلول Ca OH همچنین با محلول اتانول ۹۵٪ شستشو و تمیز کاری گردیدند.

## ۲-۱- مراحل فرآیند جوشکاری انفجاری

مراحل انجام جوشکاری به ترتیب زیر می باشد:

- انتخاب فلزات متصل شونده، سند بلاست و زنگ زدایی و برش و پرداخت قطعات، جهت انجام آزمایشات صنعتی؛
- تعیین سرعت انفجار برای انجام آزمایش بر اساس فرمولهای موجود و تعیین مخلوط ترکیب انفجاری و میزان دانه بندی مورد نیاز؛
- ساخت مخلوط ترکیب انفجاری مناسب و انجام تست سرعت سنجی انفجار.
- انجام تست جوشکاری.

## ۲-۲- مراحل تهیه ی مواد منفجره

مراحل تهیه ی مواد منفجره عبارتند از:

- مخلوط کردن مواد با هاونی از جنس یاقوت؛
- مخلوط کردن بسیار ریز مواد با مخلوط کن مخصوص؛
- دانه بندی مورد نظر مواد با سرند مخصوص؛
- آنالیز مواد با دستگاه آنالیز الکترونیکی.

عموماً کشتی ها دارای عرشه هایی از جنس فولاد دریایی هستند و در ناحیه ی روسازه یا سوپرستراکچر، از آلومینیم های دریایی سری ۵۰۰۰ استفاده می شود. در اتصال نوارهای Tri-clad، از آلومینیم دریایی سری ۵۰۰۰ به عنوان فلز پرنده و آلومینیم سری ۱۰۰۰ به عنوان فلز واسط و فولاد دریایی با استحکام بالا (High strength steel یا Hts)، به روش جوشکاری انفجاری، استفاده می شوند. آلومینیم سری ۱۰۰۰، به عنوان لایه ی میانی، جهت از بین بردن فازهای بین فلزی، به کار می رود. ضخامت فلزات استفاده شده و جنس آنها در این مطالعه ی تجربی، بر اساس جنس و ضخامت ورقهای کامپوزیتی استفاده شده در کشتی انتخاب شده است. برای حصول اطمینان از اینکه فلزات انتخاب شده دقیقاً همان فلزات مورد نظر باشند، نمونه هایی از آنها توسط دستگاه گیوتین بریده شده و آنالیز شدند. نتایج در جدول شماره ی (۱) آمده است. جدول شماره ی (۲)، مقادیر فواصل توقف و مقدار ماده منفجره ی مورد استفاده در مراحل مختلف جوشکاری انفجاری در فاز عملی را نمایش می دهد. در این جدول، به جای استفاده از بار انفجاری از ضخامت مواد منفجره استفاده شده است. فلزات مورد نظر، ابتدا سند بلاست بوده و زنگ زدایی شده و به صورت قطعات مربع شکل به ابعاد زیر برش داده شدند.

- ابعاد فلز مادر یا پایه، از جنس فولاد دریایی (۳۰۰ × ۳۰۰ × ۶ mm)؛
- ابعاد فلز واسط، از جنس آلومینیم ۱۲۵۰ (۳۰۵ × ۳۰۵ × ۲/۵ mm)؛
- ابعاد لایه سوم، از جنس آلومینیم ۵۰۸۳ (۳۱۰ × ۳۱۰ × ۴/۵ mm).

جدول ۱- آنالیز شیمیایی مواد مورد استفاده.

Aliaهای مورد استفاده	Ti	V	Zn	Ni	Cr	Al	Mg	Mn	Cu	Fe	C	Si
آلومینیم ۵۰۸۳	-	-	۰/۱۲۶۸	۰/۰۰۲۷	۰/۱۹۸۸	بالانس	۰/۷۷۷	۰/۰۲۲	۰/۳۸۰	۰/۴۰۶۶	-	۰/۷۴۷۶
آلومینیم ۱۲۵۰	۰/۰۳	۰/۰۵	۰/۰۵	-	-	بالانس	۱/۰۳	۰/۰۱	۰/۰۴	۰/۴	-	۰/۴
فولاد دریایی	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۰۷	۰/۰۰۴	۰/۰۳۰۶	۰/۰۲۷۸	۰/۰۲۸۴	-	۱/۲۶۷	۰/۰۳۴	بالانس	۰/۱۱۲۷	۰/۱۵۰۱

جدول ۲- آزمایشهای جوشکاری انفجاری.

شماره ی نمونه	فاصله توقف Al-۵۰۸۳ و Al-۱۲۵۰ (mm)	فاصله توقف - Al-۱۲۵۰ و فولاد دریایی (mm)	ضخامت ماده ی منفجره (mm)
AAS-۱۹	۴	۴	۱۵
AAS-۲۰	۴	۲	۲۵
AAS-۲۲	۴	۴	۲۵
AAS-۲۴	۴	۴	۳۰

### ۲-۳- سنجش سرعت انفجار

سرعت مورد نظر برابر  $2480 \text{ m/s}$  می باشد که توسط دستگاه مجهز به فیبر نوری و ثبات الکترونیکی سنجیده شده است. برای بدست آوردن سرعت فوق الذکر، هشت مرحله سرعت سنجی انفجاری طولی با دستگاه اندازه گیرنده ی سرعت ماده ی منفجره (VOD meter) به انجام رسید. خصوصیات ماده منفجره ی به کار رفته در این تحقیق که مخلوط آنفو-تی ان تی، به صورت پودری بوده، در جدول (۳) بیان گردیده است.

اثرات لبه ها در حین عملیات انفجار جلوگیری به عمل آید، به همین دلیل، ابعاد آنها از پائین به بالا افزایش یافته است (یعنی ورق مادر یا زیرین با ابعاد  $305 \times 305 \times 6 \text{ mm}$ ) و ورق فوقانی یا پرند با ابعاد  $305 \times 305 \times 6 \text{ mm}$ ) و ورقهای ابعاد لایه ی سوم، از جنس آلومینیم ۵۰۸۳  $4/5 \text{ mm}$   $310 \times 310$ ). شکل (۳)، تصویری از انجام عملیات و ترتیب قرارگیری فلزات و مواد منفجره و چاشنی بروی آنها را نمایش می دهد.

### ۲-۴- طراحی جوشکاری انفجاری افزودن مواد منفجره و چاشنی

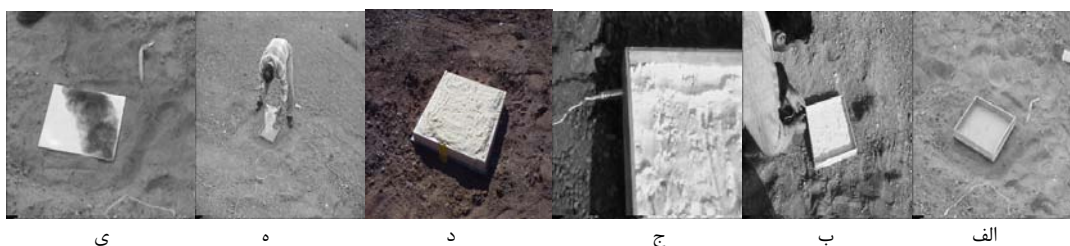
در این پژوهش، از چیدمان موازی برای اتصالات سه لایه استفاده شده است. برای ایجاد فاصله توقف بین لایه ها، از واشرهای بسیار نازک مسی که به اندازه ی فاصله توقف ها تنظیم شده به گونه ای استفاده شده است که ضربه ی جت سیال، آنرا به سمت بیرون پرتاب نماید. شکل (۳) ترتیب چیدمان و افزودن مواد منفجره به همراه چاشنی گذاری یا مسلح نمودن قطعه کار و تنظیم فواصل توقف را نشان می دهد. فلزات بگونه ای چیده شده اند که از

### ۳- رسم پنجره ی جوشکاری

پنجره ی جوشکاری، تعیین کننده ی محدوده ی برای اجرای فرایند جوشکاری انفجاری است که با انتخاب متغیرهای فرایند، بر طبق پنجره ی جوشکاری، اتصالی مناسب و موفقیت آمیز به دست می آید. برای رسم پنجره ی جوشکاری، باید مرزهای پنجره مشخص شوند، که این مرزها از روی روابط موجود، قابل دستیابی است. در این تحقیق، پنجره ی جوشکاری، بر اساس  $\beta/V_w$  رسم شده است.

جدول ۳- مشخصات ماده منفجره استفاده شده در این تحقیق.

ماده منفجره	چگالی $(\text{kg/m}^3)$	سرعت انفجار $\text{m/s}$	انرژی انفجاری (گرنی) $\text{kJ/kg}$	حجم مخصوص $\text{kg/m}^3$	ثابت ماده منفجره
پودر تی ان تی + آنفو	۹۰۰	۲۴۸۰	۳۶۰۰	۷۸۰	۱/۳۶۷



شکل ۳- مراحل چیدمان جوشکاری انفجاری: الف) تنظیم ورق ها و فاصله ی توقف، ب) چاشنی گذاری، ج) پرکردن مواد منفجره، د) هم سطح کردن مواد منفجره با ضخامت مورد نیاز به کمک محفظه ی چوبی نگهدارنده ماده منفجره، ه) خارج کردن نمونه از زیر خاک پس از انفجار، ی) محصول نهایی

(۵) و آلومینیم ۵۰۸۳ / آلومینیم ۱۲۵۰ (رابطه ۶)، با جایگزین کردن

پارامترهای مربوطه در رابطه (۴)، ب صورت زیر بدست آمده است:

$$\sin \frac{\beta}{2} = \frac{k_3}{t_1^{0.25} V_W^{1.25}} \quad (4)$$

(۵)

$$\beta_{\max, Sea Steel} = 2 \sin^{-1} \left[ \frac{2507}{(4.5 \times 10^{-3})^{0.25} \times V_W^{1.25}} \right]$$

$$\beta_{\max, Al1250} = 2 \sin^{-1} \left[ \frac{2500}{(2.5 \times 10^{-3})^{0.25} \times V_W^{1.25}} \right]$$

(۶)

$$\beta_{\max, Al 5053} = 2 \sin^{-1} \left[ \frac{2580}{(6 \times 10^{-3})^{0.25} \times V_W^{1.25}} \right]$$

$$\beta_{\max, Al 1250} = 2 \sin^{-1} \left[ \frac{2500}{(2.5 \times 10^{-3})^{0.25} \times V_W^{1.25}} \right]$$

بر اساس پیشنهاد Crossland و Bahrani [۹ و ۱۱] حداکثر زاویه ی برخورد برای ایجاد اتصال، برابر ۳۱ درجه است که در این تحقیق، از این پیشنهاد نیز برای رسم پنجره ی جوشکاری استفاده شده است.

### ۳-۳- تعیین مرز سمت راست پنجره ی جوشکاری

مرز سمت راست، حد فاصل تشکیل و عدم تشکیل جت می باشد. عدم تشکیل جت زمانی حاصل می شود که سرعت جوشکاری از سرعت صوت در مواد جوش شونده، بیشتر شود. بدین ترتیب سرعت صوت در صفحه ی پرنده در جوشکاری دوجزبی صفحه ها به عنوان مرز سمت راست پنجره جوشکاری در نظر گرفته شده است. مقدار سرعت صوت در آلیاژهای آلومینیم ۵۰۸۳، آلومینیم ۱۲۵۰ و فولاد دریایی به ترتیب برابر ۵۰۱۴ m/s، ۵۰۰۰ m/s و ۵۱۶۰ m/s است. بنابراین مرز سمت راست برای هر دو حالت جوشکاری آلومینیم ۱۲۵۰ / فولاد دریایی و آلومینیم ۵۰۸۳ / آلومینیم ۱۲۵۰ برابر ۵۰۰۰ m/s، در نظر گرفته می شود.

### ۳-۴- تعیین مرز سمت چپ پنجره ی جوشکاری

برای تعیین مرز سمت چپ پنجره ی جوشکاری از رابطه ی ارائه شده توسط Simonov، [۹ و ۱۱]، (رابطه ۱۰) استفاده شده است. مقدار حداقل سرعت

### ۳-۱- تعیین مرز پایینی پنجره ی جوشکاری

حذف آلودگیهای سطحی، رطوبت جذب شده و اکسیدهای فلزی، از طریق جت ایجاد شده در فصل مشترک اتصال صورت می گیرد. لذا تشکیل جت، یکی از پارامترهای اساسی در جوشکاری انفجاری می باشد. از طرف دیگر، ضخامت جت تشکیل شده ارتباط مستقیمی با زاویه ی دینامیکی دارد، بدین ترتیب که با افزایش زاویه ی تورب، ضخامت جت افزایش می یابد. بنابراین یک مقدار حداقل برای زاویه ی دینامیکی وجود دارد تا تشکیل جت را تضمین کند. طبق رابطه ی (۱)، زاویه ی دینامیکی حداقل، توسط Deribas و همکارانش ارائه شده است [۹ و ۱۱]. در رابطه (۱)،  $H_p$ ، مقدار سختی صفحه ی پرنده بر حسب MPa، و  $\rho$ ، دانسیته صفحه ی پرنده بر حسب  $kg/m^3$  و  $V_w$ ، سرعت جوشکاری می باشد. با جایگزین کردن پارامترهای مورد نیاز در رابطه ی (۴)، برای جوشکاری دوجزبی آلومینیم ۵۰۸۳ / آلومینیم ۱۲۵۰ (رابطه ۲) و آلومینیم ۱۲۵۰ / فولاد دریایی (رابطه ۳)، حاصل می شود که تعیین کننده حد پایینی پنجره ی جوشکاری می باشند:

$$\beta = k_1 \sqrt{\frac{H_p}{\rho V_W^2}} \quad (1)$$

(۲)

$$\beta_{\min} = \frac{180}{\pi} (0.6 - 1.2) \sqrt{\frac{1020 \times 10^6}{2700 \times V_W^2}} = \frac{(21153 - 42306)}{V_W} \quad (3)$$

$$\beta_{\min} = \frac{180}{\pi} (0.6 - 1.2) \sqrt{\frac{1080 \times 10^6}{2640 \times V_W^2}} = \frac{(22010 - 44020)}{V_W}$$

قابل ذکر است که با توجه به دامنه ی تغییرات k که در محدوده ۰/۶-۱/۲ می باشد، مرز پایینی به صورت یک منطقه ظاهر می شود.

### ۳-۲- تعیین مرز بالایی پنجره ی جوشکاری

برای به دست آوردن مرز بالایی پنجره ی جوشکاری، از رابطه ی Deribas و همکارانش [۹ و ۱۱] استفاده شده است (رابطه ۴)، استفاده گردید. در رابطه ی (۴)،  $t_1$ ، ضخامت صفحه ی مورد بررسی و پارامتر  $k_3$  برابر نصف سرعت صوت در ماده ی مورد بررسی می باشد. روابط حاصل شده برای مرز بالایی پنجره در جوشکاری دوجزبی آلومینیم ۱۲۵۰ / فولاد دریایی (رابطه ی

آلومینیم ۵۰۸۳/ آلومینیم ۱۲۵۰ و آلومینیم ۱۲۵۰/ فولاد دریایی، به ترتیب برابر  $2887 \text{ m/s}$  و  $2470 \text{ m/s}$  می باشد.

رابطه‌ی دیگری که از آن برای تعیین فصل مشترک صاف به موجی استفاده شده است، رابطه‌ی Al-Hassani [۱۳ و ۱۴]، است. برای به دست آوردن رابطه‌ی بر اساس  $V_w$  و  $\beta$ ، رابطه‌ی زیر در فرمول Al-Hassani (۱۰)، جایگزین شده است: در رابطه فوق، مقدار  $D$ ، متغیر ثابت، در دامنه تغییرات بین  $1/5 - 1/7$ ، پیشنهاد شده است.  $\sigma_y$ ، مقدار تنش تسلیم صفحه پرند و  $\rho$ ، دانسیته‌ی صفحه‌ی پرند و  $V_p$  و  $V_w$ ، بترتیب، سرعت برخورد و سرعت جوشکاری می باشند.

$$\tan \beta = \frac{V_p}{V_w} \quad (9)$$

$$\tan \beta = \sqrt{\frac{3D\sigma_y}{\rho V_w^2}} \quad (10)$$

با جانشین کردن داده های مربوط به جوشکاری آلومینیم ۵۰۸۳/ آلومینیم ۱۲۵۰ و آلومینیم ۱۲۵۰/ فولاد دریایی، ناحیه‌ی انتقال فصل مشترک صاف به موجی در پنجره‌ی جوشکاری نشان داده شده است.

پنجره های جوشکاری بدست آمده برای جوشکاری آلومینیم ۱۲۵۰/ فولاد دریایی و آلومینیم ۵۰۸۳/ آلومینیم ۱۲۵۰ به ترتیب در شکل‌های ۴ و ۵ نشان داده شده اند که نتایج حاصل از شبیه سازی جوشکاری انفجاری به صورت خط توپر و نتایج شبیه سازی فرایند، به صورت نقاط پراکنده در پنجره ها نشان داده شده اند. بدین ترتیب از روی پنجره های جوشکاری و نتایج بدست آمده، می توان مقبول بودن کیفیت جوشهای شبیه سازی شده را پیش بینی نمود که مشاهده می شود که تمام آزمایشهای انجام شده برای شبیه سازی جوشکاری انفجاری در پنجره‌ی جوشکاری، واقع شده‌اند. از نتایج شبیه سازی، پیش بینی می شود که در سرعت‌های انفجار زیر  $450 \text{ m/s}$  و زوایای برخورد ۵ درجه، اتصالی ایجاد نمی شود. حتی با زاویه‌ی برخورد ۱۰ درجه و سرعت‌های برخورد  $200 \text{ m/s}$ ، موجب ایجاد اتصال نخواهند شد.

همچنین با در نظر گرفتن منطقه‌ی مرزی بین فصل مشترک صاف و موجی، می توان پیش بینی نمود که کدامیک از جوشهای شبیه سازی شده، دارای فصل مشترک صاف، کدامیک دارای فصل مشترک موجی و کدامیک در منطقه‌ی انتقال از فصل مشترک صاف به موجی است.

بدست آمده برای آلیاژهای ۴۳۰ فولاد دریایی، آلومینیم ۵۰۸۳، آلومینیم ۱۲۵۰ به ترتیب برابر  $1217 \text{ m/s}$  و  $1266 \text{ m/s}$  است. بنابراین مرز سمت چپ برای جوشکاری آلومینیم ۵۰۸۳/ آلومینیم ۱۲۵۰ و آلومینیم ۱۲۵۰/ فولاد دریایی، به ترتیب برابر  $1266 \text{ m/s}$  و  $1289 \text{ m/s}$  می باشد.

$$V_w = k_4 \left( \frac{2H_p}{\rho} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

در این رابطه، متغیر  $k_4$  برابر  $1/8$ ، نظر گرفته شده است.

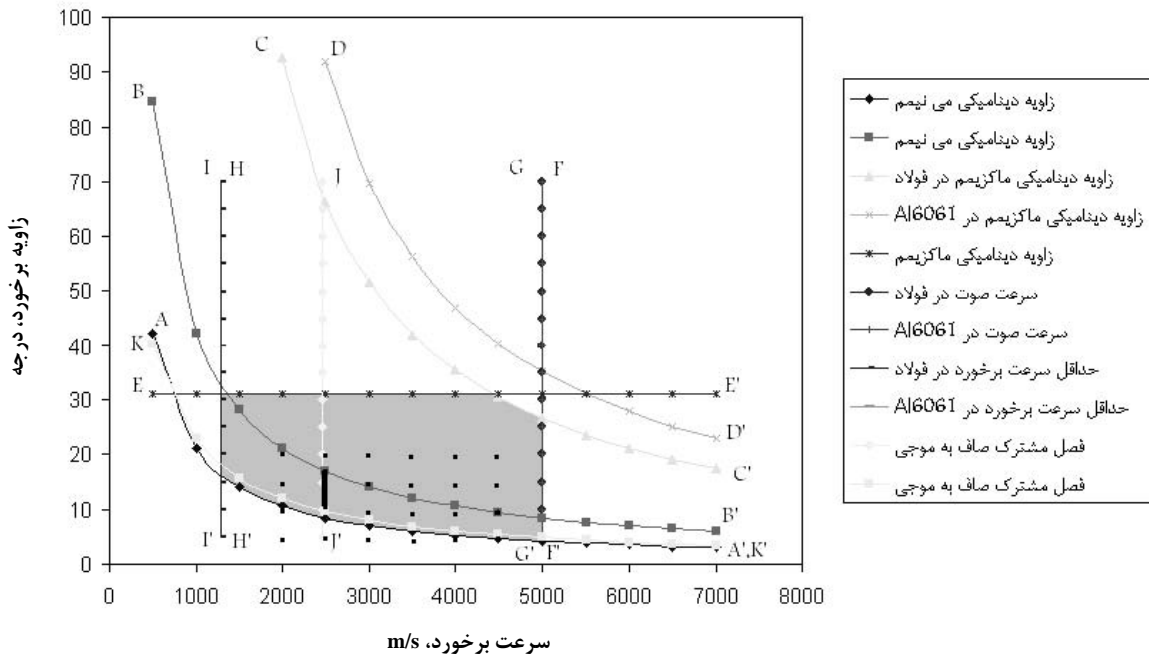
### ۳-۵- مرز انتقال فصل مشترک صاف به موجی

انتقال از فصل مشترک صاف به موجی نیز از مناطقی است که مورد بررسی قرار گرفته است و مرز این منطقه در پنجره‌ی جوشکاری، لحاظ می شود. با توجه به اینکه فلزات در نقطه‌ی برخورد، به علت فشار دینامیکی بالا به صورت سیالات رفتار می کنند و الگوی فصل مشترک جوش در پشت نقطه‌ی برخورد، مانند رفتار جریان سیال در پشت یک مانع می باشد، پیشنهاد Cowan و همکارانش [۹ و ۱۱]، می تواند برای پیش بینی انتقال فصل مشترک صاف به فصل مشترک موجی به کار رود. چنانچه عدد  $10/6$  بعنوان عدد رینولدز در فلزات استفاده شود و خواص مواد جوش شونده در رابطه‌ی (۸) جایگزین شود، سرعت انتقال از فصل مشترک صاف به موجی حاصل می شود که در برخی پنجره های جوشکاری پیشنهادی، به عنوان مرز سمت چپ پنجره برگزیده شده است.

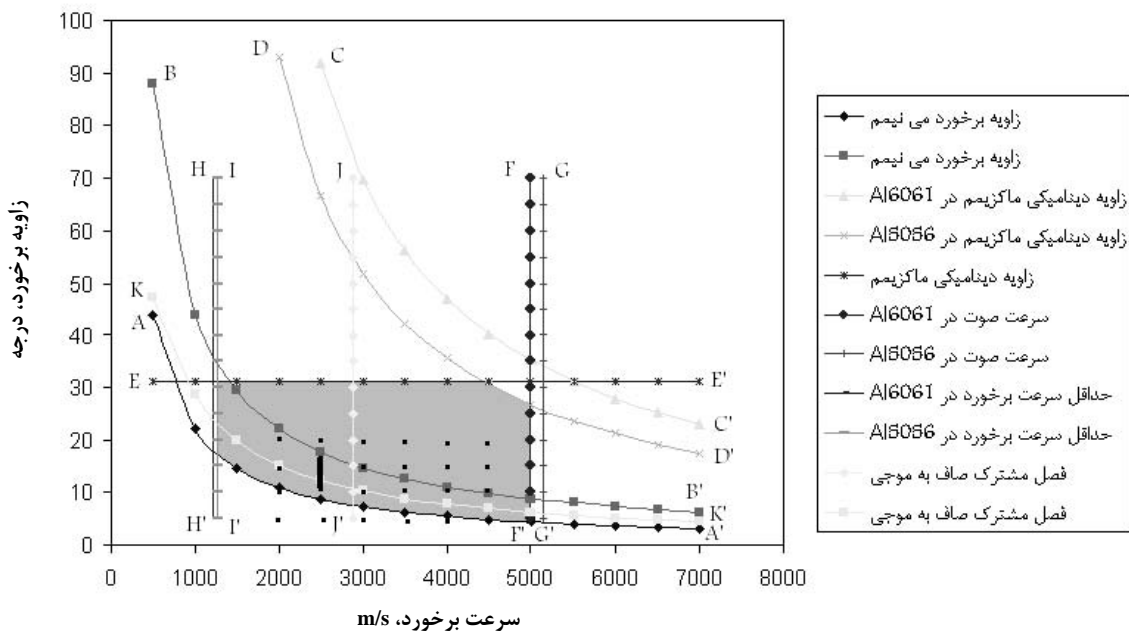
$$R_t = K_{E-P} = \frac{(\rho_p + \rho_b)V_t^2}{2(H_p + H_b)} \quad (8)$$

که در آن  $\rho_b$ ،  $\rho_p$ ، دانسیته‌ی صفحات پرند و مادر و  $H_p$  و  $H_b$ ، سختی صفحات پرند و مادر، بر حسب ویکرز، می باشند.

نظر به اینکه جوشهای با فصل مشترک صاف نیز می توانند از کیفیت مناسب برخوردار باشند، رابطه‌ی Cowan و همکارانش، (رابطه‌ی (۹))، تعبیر درستی برای مرز سمت چپ پنجره‌ی جوشکاری ارائه نمی دهد. ضمناً باید در نظر داشت که عدد پیشنهادی  $10/6$  تنها در مورد زوایای برخورد  $12^\circ$  به دست آمده است و بدین ترتیب الگوی صحیحی برای پیش بینی انتقال فصل مشترک صاف به موجی نیست. با این حال، سرعت بحرانی انتقال فصل مشترک صاف به موجی طبق رابطه‌ی Cowan برای جوشکاری دوجزبی



شکل ۴- پنجره‌ی جوشکاری به دست آمده برای جوشکاری آلومینیم ۱۲۵۰/ فولاد دریایی و مقایسه با نتایج شبیه سازی.



شکل ۵- پنجره‌ی جوشکاری به دست آمده برای جوشکاری آلومینیم ۵۰۸۳/ آلومینیم ۱۲۵۰ و مقایسه با نتایج شبیه سازی.

افزار در دریافت برنامه فرعی به زبان برنامه نویسی فرترن، می توان در نرم افزار کد گذاری نمود. بنابر این به منظور اعمال بارگذاری انفجاری برای ماده ی منفجره با سرعت انفجار پائین، از معادله ی (۱۳) استفاده گردید. فشار حاصل که از رابطه ی (۱۳)، معادل فشار حاصل از معادله ی ویلیا مزبرگ قرار گرفته و بدین ترتیب مقدار ثابت ماده ی منفجره بدست می آید. پس از آن روابط (۱۳) و (۱۴)، به صورت معادله ی فشار وابسته به زمان و مکان از طریق برنامه ی فرترن در برنامه ی Vdload، با اعمال بار بر روی سطح ورق پرنده، اعمال می گردد. ماده منفجره ی به کار رفته در این تحقیق، آنفو تی ان تی دار به صورت پودری است که خصوصیات آن در جدول (۳)، بیان گردیده است [۱۶].

$$P = P_0 \exp\left(\frac{-t}{\theta}\right) \quad (13)$$

$$P_0 = \frac{\rho_e V_d^2}{1 + k_e} \quad (14)$$

در روابط (۱۳) و (۱۴)، پارامترهای  $\theta$ ،  $\rho_e$ ،  $t$ ،  $k_e$ ،  $P$ ، به ترتیب عبارتند از: ثابت زمانی، چگالی ماده ی منفجره، ثابت ماده ی منفجره، زمان انجام انفجار، نیرو یا فشار حاصل از انفجار و  $V_d$  سرعت انفجار ماده ی منفجره می باشد.

#### ۴. نتایج آزمایش های متالوگرافی، سختی سنجی و برش

آزمایش برش بر اساس استاندارد ASTM-A۲۶۴ انجام گردیده است. نتایج آزمون برش و مقایسه با استاندارد در جداول (۴) و (۵)، نتایج سختی سنجی، در شکل (۶) و نتایج متالوگرافی کلیه ی نمونه های آزمایش جوشکاری انفجاری سه لایه آلومینیم ۵۰۸۳- آلومینیم-۱۲۵۰ با فولاد دریایی و آلومینیم ۵۰۸۳ در دو جهت طولی و عرضی، در شکل های ۷ و ۸ نشان داده شده است.

جدول ۴- پارامترهای مربوط به مواد مورد استفاده مورد نیاز در معادله ی جانسون- کوک رابطه ی (۱۱) [۱۷].

نام آلیاژ	A (MPa)	B (MPa)	C	n	m
فولاد دریایی	۳۱۰	۳۵۰	۰/۰۲	۰/۳	۰/۵
آلومینیم ۵۰۸۳	۵۵۰	۴۸۶	۰/۰۲	۰/۳	۱
آلومینیم ۱۲۵۰	۱۸۰	۳	۰/۰۱۵	۰/۳۴	۱

میزان ممان و جابجایی در سه جهت برای سطوح زیرین ورق مادر، صفر در نظر گرفته شود:  $U_x = U_y = U_z = M_{xy} = M_{yz} = M_{xz} = 0$ .

#### ۳-۶- مدل نمودن مواد مورد استفاده در جوشکاری و شرایط

##### مرزی

معادله ساختاری استفاده شده معادله ی جانسون کوک رابطه (۱۱) می باشد [۱۵] و پارامترهای مربوط به این معادله در جدول (۴) آمده است. مدل پلاستیسیته جانسون- کوک برای مدل کردن تغییر شکل با نرخ کرنش بالای فلزات، به کار می رود. این مدل، نوع ویژه ای از پلاستیسیته فون مایسز می باشد که شامل شکل های تحلیلی قانون سخت شدن و وابستگی به نرخ می باشد. این مدل معمولاً در تحلیل دینامیکی آدیاباتیک گذرا استفاده می شود. در این رابطه، تنش تسلیم، تابعی از کرنش پلاستیک معادل، نرخ کرنش و دما می باشد. در رابطه زیر  $T$  درجه حرارت مطلق می باشد.

$$\sigma = (A + B\varepsilon^n)(1 + C \ln \dot{\varepsilon}_p)(1 - T^{*m}) \quad (11)$$

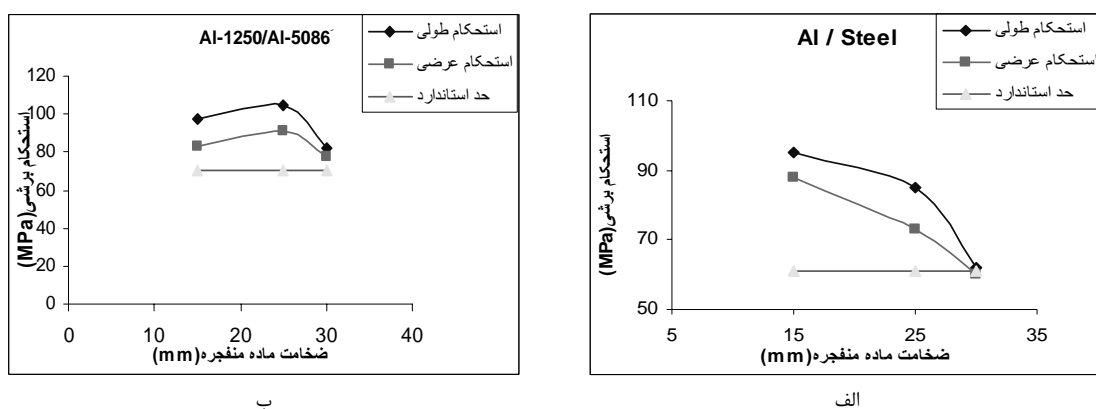
$$T^* = \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \quad (12)$$

در رابطه ی بالا،  $\dot{\varepsilon}_p$  میزان نرخ کرنش پلاستیک برای  $\dot{\varepsilon}_0 = 1 s^{-1}$  و  $\varepsilon_0$  کرنش پلاستیک می باشد.

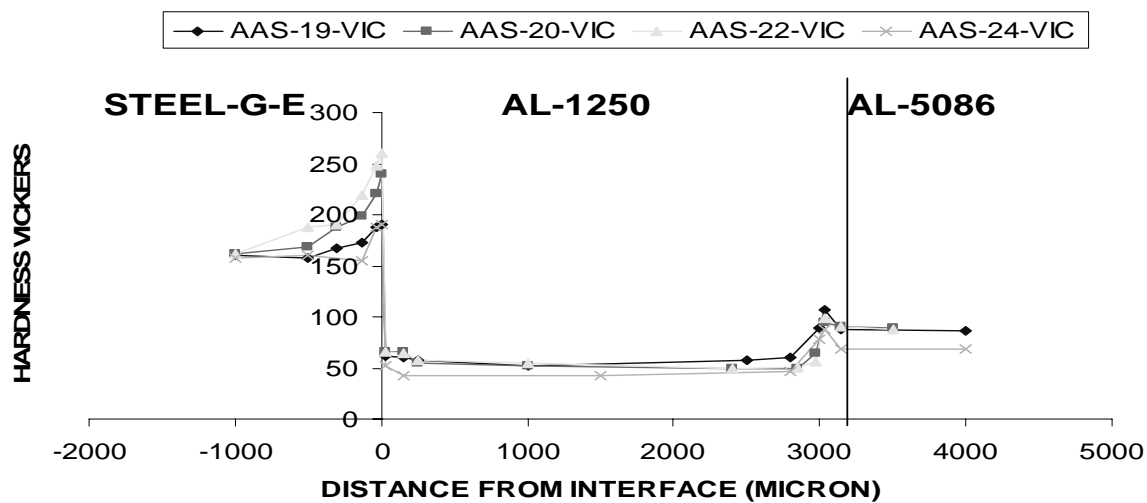
#### ۳-۷- مدل کردن بارگذاری انفجاری

معادله حالت JWL برای بررسی رفتار ماده ی منفجره در نرم افزار آباکوس موجود می باشد. لیکن این معادله برای مواد منفجره ی با سرعت انفجار زیاد کاربرد دارد، حال آنکه در جوشکاری انفجاری، عملاً از مواد منفجره ی با سرعت پائین استفاده می شود [۱۴ و ۱۳]. لذا این معادله نمی تواند در شبیه سازی جوشکاری انفجاری استفاده شود. معادله ای که برای سرعت های پائین و بالا کاربرد دارد، معادله ی حالت ویلیامزبرگ [۱۴ و ۱۳] است. با توجه به اینکه این معادله، در نرم افزار آباکوس موجود نیست، با استفاده از قابلیت نرم

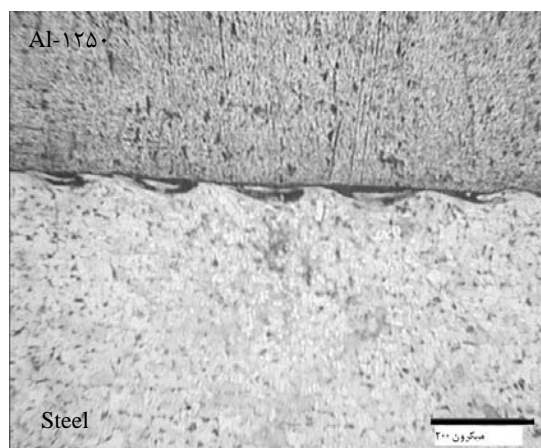




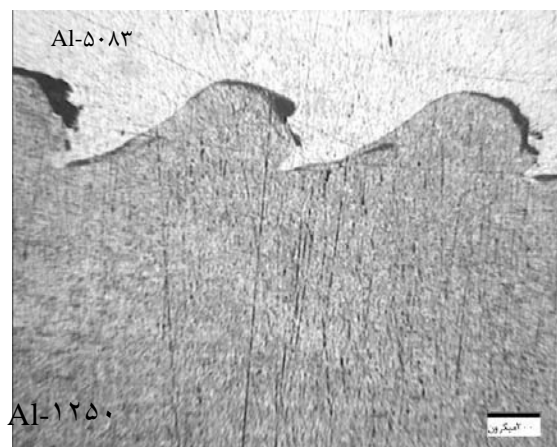
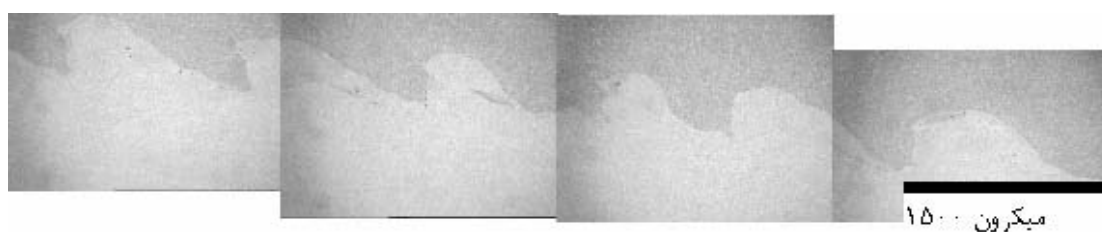
شکل ۶- مقادیر استحکام برشی بر حسب بار انفجاری الف) آلومینیم ۱۲۵۰ به فولاد دریایی ب) آلومینیم ۱۲۵۰ با آلومینیم ۵۰۸۶ و مقایسه با حدود استاندارد.



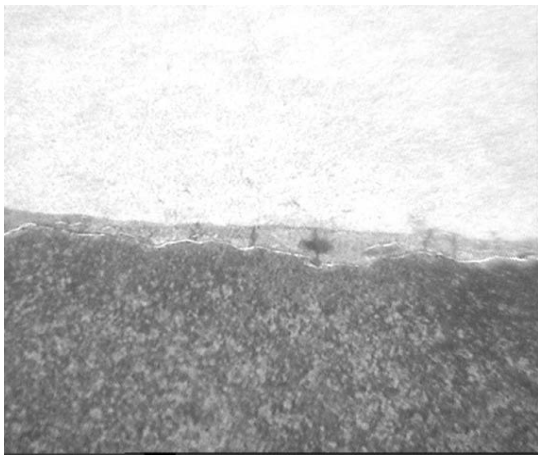
شکل ۷- نتایج حاصل از تست سختی سنجی نمونه های اتصال آلومینیم-۱۲۵۰ با فولاد دریایی.



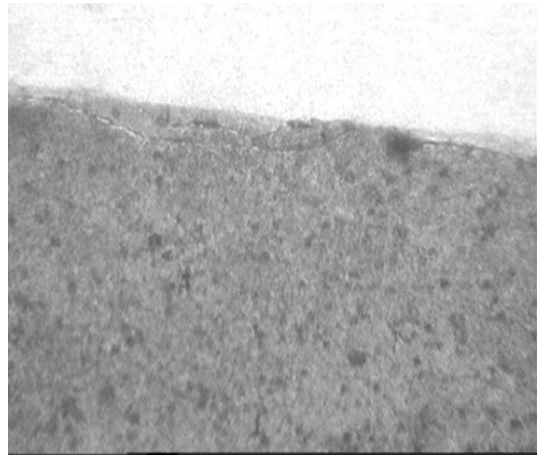
شکل ۸- الف) فصل مشترک نمونه ی سه لایه AAS-۱۹ با ضخامت ماده ی منفجره ۱۵mm، طولی Al/S.



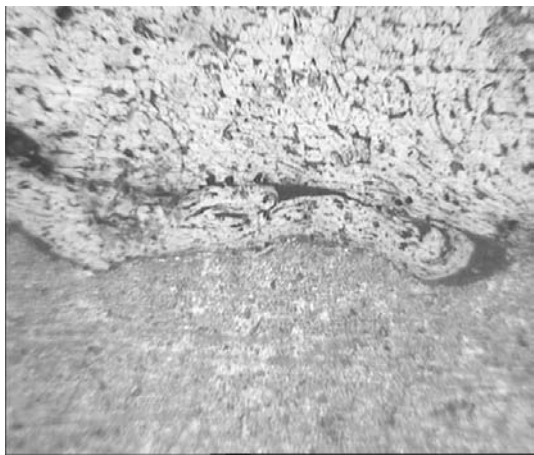
شکل ۸- ب) فصل مشترک نمونه ی AAS-۲۴ با ضخامت ماده ی منفجره ۳۰mm، طولی Al/St.



ب



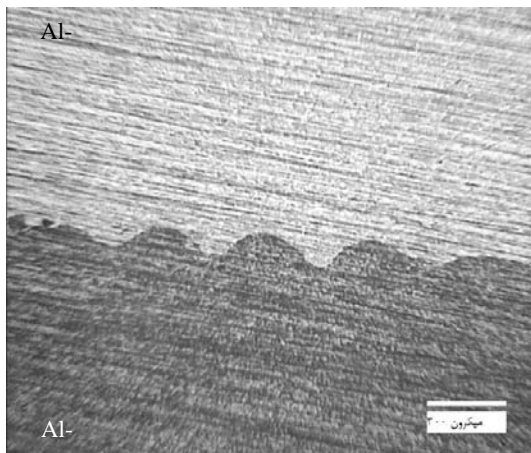
الف



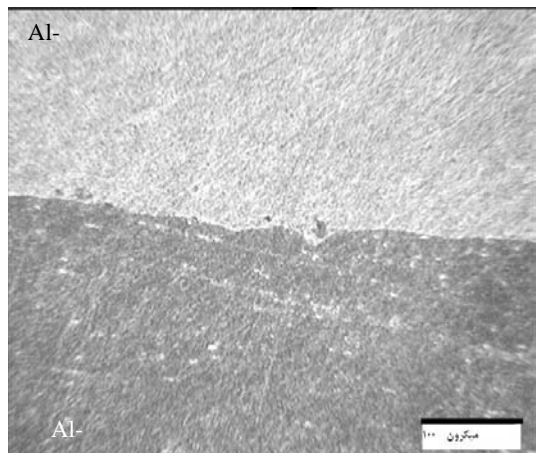
د



ج

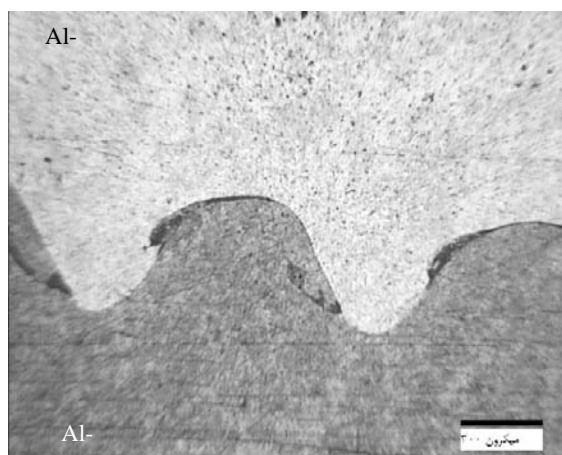


ن

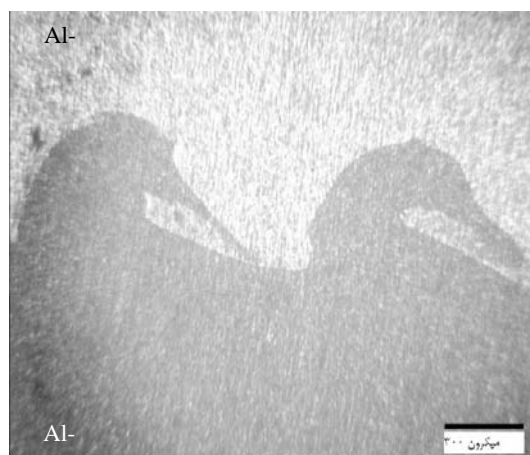


م

شکل ۹- الف) نمونه‌ی طولی آلومینیم ۱۲۵۰ فولاد از AAS-۲۰ بزرگنمایی ۵۰۰X، ب) نمونه‌ی عرضی آلومینیم ۱۲۵۰ فولاد از AAS-۲۰ بزرگنمایی ۲۰۰X، ج) نمونه‌ی طولی آلومینیم ۱۲۵۰ فولاد از AAS-۲۲ بزرگنمایی ۲۰۰ X، د) نمونه‌ی عرضی آلومینیم ۱۲۵۰ فولاد از AAS-۲۲ بزرگنمایی ۲۰۰X، م) نمونه‌ی طولی آلومینیم ۱۲۵۰ به آلومینیم ۵۰۸۳ از AAS-۲۰ بزرگنمایی ۲۰۰X، ن) نمونه‌ی عرضی آلومینیم ۱۲۵۰ به آلومینیم ۵۰۸۳ از AAS-۲۰ بزرگنمایی ۲۰۰X.



ی



ه

شکل ۹- (ه) نمونه‌ی طولی آلومینیم ۱۲۵۰ به آلومینیم ۵۰۸۳ از AAS-۲۲ (ی) نمونه‌ی عرضی آلومینیم ۱۲۵۰ به آلومینیم ۵۰۸۳ از AAS-۲۲ بزرگنمایی ۵۰x، (ی) نمونه‌ی عرضی آلومینیم ۱۲۵۰ به آلومینیم ۵۰۸۳ از AAS-۲۲ بزرگنمایی ۲۰۰x.

که در بعضی تصاویر متالوگرافی دیده می‌شوند (شکل ۷)، برای جوش، مضر می‌باشد. موارد بیشینه ی سختی موجود در جدول (۴) بیانگر آن است که میزان بیشینه ی سختی در کلیه ی اتصالات جوشکاری شده، در حقیقت زیر عدد ۳۰۰ ویکرز هستند. آزمایش برش بر اساس استاندارد ASTM-۲۶۴، مطابق با شکل‌های (۴) و (۵)، انجام شده است. نتایج آزمون برش در جدول (۴) آورده شده است. براساس استاندارد نظامی (MIL-۲۴۴۴۵A) [۱]، حداقل میزان استحکام برشی طولی لازم برای اتصال آلومینیم به فولاد، ۶۰/۴۹ مگاپاسکال می‌باشد. در همین رابطه نیز، موسسه‌ی رده بندی لویوز، بر اساس استاندارد ASTM ۲۶۴، میزان استحکام برشی طولی را ۸۹/۵ مگاپاسکال و میزان استحکام برشی عرضی لازم را ۷۵/۴ مگاپاسکال اعلام نموده است [۲]. با توجه به استاندارد ASTM ۲۶۴، نتایج بعضی از آزمایشهای آلومینیم-۱۲۵۰ با فولاد دریایی که در جدول (۴) آمده است، در حد قابل قبول و حتی بالاتر از آنها می‌باشد. در حالیکه استحکام تمام نمونه ها، به علت بالاتر بودن از استاندارد نظامی (MIL-۲۴۴۴۵A)، قابل قبول است. در صورتیکه بار انفجاری بیش از حد اعمال شود، دما در محل برخورد، بسیار افزایش می‌یابد و باعث نزدیک شدن دمای محل برخورد به دمای نقطه‌ی ذوب فلزات برخوردی و درنهایت تشکیل گرده‌های مذاب می‌شود. با انجماد گرده‌های مذاب، سختی منطقه اتصال به دلیل تشکیل فازهای بین فلزی ترد، افزایش می‌باشد. همان‌گونه که تصاویر متالوگرافی نشان می‌دهند، مقدار و حجم گرده‌های مذاب، کوچک و محدود می‌باشند.

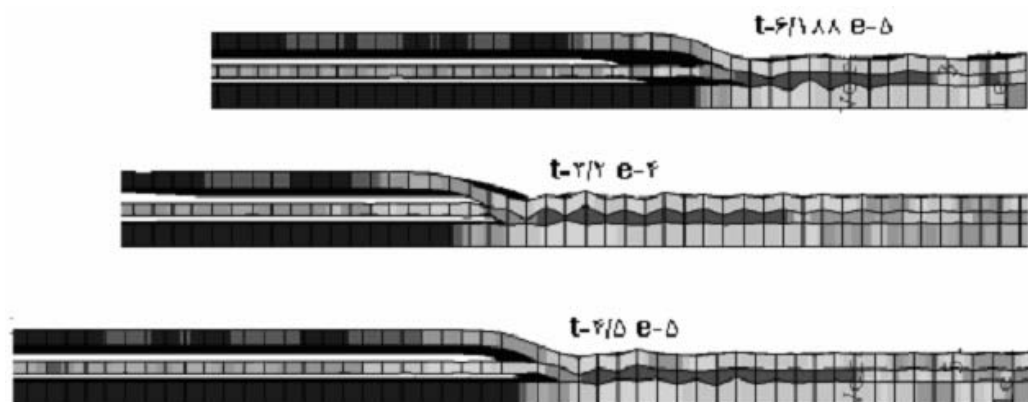
## ۵. نتایج شبیه سازی

مدل چیدمان هندسه‌ی تخت سه لایه ورقها در این شبیه‌سازی استفاده شده است و تصاویر زیر، نمایش پیشرفت جوشکاری در حالت سه لایه به صورت دو بعدی، مربوط به آزمایش AAS-۱۹ را در سه زمان مختلف نشان می‌دهد. شماتیک فرآیند جوشکاری برای نمونه‌ی شماره‌ی AAS-۱۹، به صورت سه بعدی، در شکل ۱۰، نشان داده شده است.

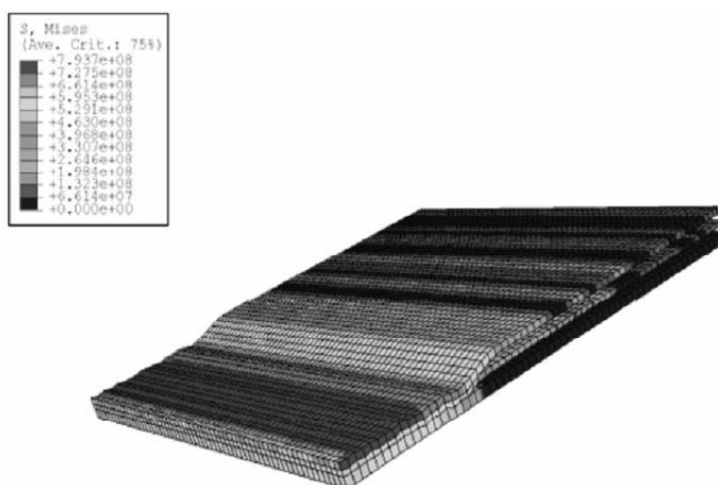
## ۶. نتایج و بحث

### ۶-۱- تصاویر متالوگرافی و آزمایشهای مکانیکی

آزمایشهای آلتراسونیک کلیه‌ی نمونه‌ها انجام شد که حاکی از باند اتصالی مناسب بود. اما در حاشیه‌ی نمونه‌ها به دلیل گیرکردن بعضی از فاصله دهنده‌ها، در بعضی از نمونه‌ها اتصال به انجام نرسیده بود. شکل (۶) نمایش ریز سختی بدست آمده نمونه‌های جوشکاری شده‌ی سه لایه آلومینیم ۵۰۸۳، آلومینیم-۱۲۵۰ با فولاد دریایی گرید E می‌باشد. در آزمایش‌های سختی سنجی، از بار ۲۰۰ گرمی با زمان توقف ۳۰ ثانیه استفاده شده است. نتایج سختی سنجی، بیانگر افزایش سختی در فصل مشترک اتصال می‌باشد. دلیل افزایش سختی تغییرات ساختار متالورژیکی به علت بروز امواج تنشی شدید در نقطه ی برخورد می‌باشد. در هنگام برقراری اتصال در صورتی که امواج شوکی شدیدی تولید شود، احتمال بروز فازهای بین فلزی، زیاد شده و با تولید گرده‌های مذاب، استحکام اتصال کم می‌شود. تولید گرده‌های مذاب



شکل ۱۰- مدل چیدمان دو بعدی سه لایه با هندسه‌ی تخت، برای نمونه‌ی شماره‌ی AAS-۱۹.



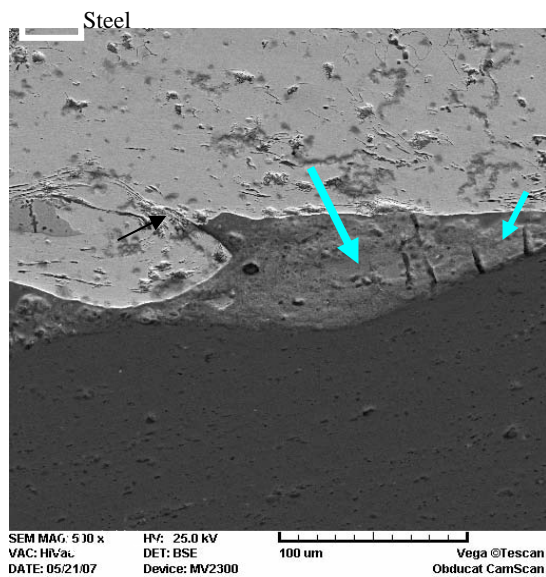
شکل ۱۱- نمایش جوشکاری انفجاری سه لایه بعدی نمونه‌ی شماره‌ی AAS-۱۹، با نرم افزار آباکوس.

ترتیب مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت ماده‌ی منفجره، به تدریج تکه‌های مذاب در فصول مشترک بزرگتر می‌شود. در شکل (۱۱)، یک موج کامل نشان داده شده است، در شروع موج کشیدگی دانه‌های فولاد و لغزش آنها را روی هم می‌توان مشاهده کرد (پیکان سمت چپ) که موجب پدیده سخت شدن شوکی و یا (Shock Hardening) و افزایش سختی در فصل مشترک می‌شود. ضخامت این ناحیه، حدود ۶۰ میکرون در قله می‌باشد. در سمت راست هم پیکانی دیده می‌شود که میکرو ترک‌های در امتداد عمود بر فصل مشترک را نشان می‌دهد. این میکرو ترک‌ها، بعلاوه حضور ترکیبات ترد بین فلزی  $FeAl_2$  اتفاق می‌افتد. همچنین، مقایسه‌ی شکل‌های ۸ الف و ج، نشان می‌دهد که با افزایش فاصله‌ی توقف از ۲ به ۴ میلیمتر، فصل مشترک از حالت صاف به موجی تبدیل می‌شود.

در فصل مشترک اتصال بین فولاد- آلومینیم، به علت ماهیت ترد ترکیبات بین فلزی تشکیل شده، ترک‌های ریزی در فصل مشترک اتصال، ایجاد می‌شود. تشکیل این ترکیبات بین فلزی، به علت تبدیل انرژی جنبشی حاصل از برخورد دو صفحه در نقطه‌ی برخورد، به گرما و متعاقب آن ایجاد فرایند ذوب و انجماد و عدم انحلال آهن و فولاد می‌باشد. این پدیده، با افزایش انرژی انفجار، مانند نمونه آزمایش‌های AAS-۱۹ تا AAS-۲۴ تشکیل شده و تصاویر حاصل از میکروسکوپ الکترونی فصل مشترک، نیز تأیید کننده‌ی این مطلب می‌باشد (شکل‌های (۱۱) و (۱۲)). رشد این ترکیبات با افزایش انرژی انفجار به علت ترد بودن ماهیت آنها، سبب افت استحکام اتصال می‌شود. شکل (۵)، نشان می‌دهد که استحکام برشی اتصال آلومینیم ۱۲۵۰ / فولاد دریایی، با تشکیل ترکیبات بین فلزی ترد، کاهش می‌یابد. در شکل ۷ الف و ب به

این ترکها با پیکانهای تیره نشان داده شده است و دال بر آفت استحکام برشی در این نمونه ها است. همچنین در این نمونه، شکل ۱۲، سیلان شدید تکه های مذاب و تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی  $FeAl_3$ ،  $FeAl_7$  و  $MnSi_2$  در ناحیه ی تغییر شکل یافته را می توان ملاحظه نمود.

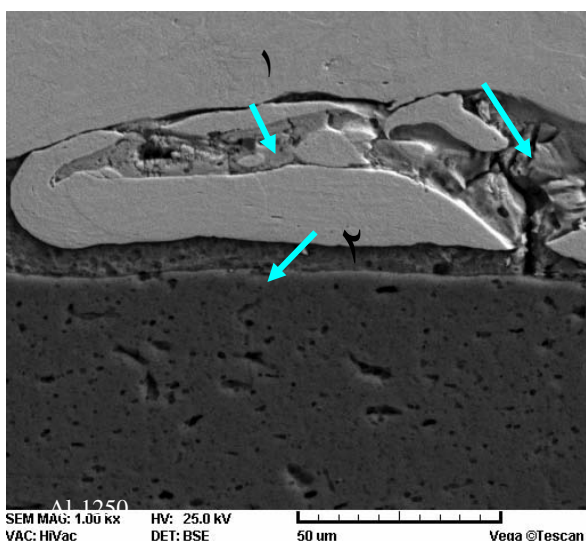
در شکل ۱۲ که جوشکاری با بیشترین ضخامت ماده منفجره است (۳۰mm) انجام شده است، تکه های مذاب دیده می شود. همچنین در این تصویر در لایه بین فصل مشترک ترکهای ریزی مشاهده می کنیم که به علت تشکیل ترکیبات ترد بین فلزی می باشد که ناشی از انرژی بالای انفجار یا بالا بودن ضخامت ماده منفجره است که در شکل به بیشترین مقدار خود رسیده است.



Element	Weight%
Mg	۰/۷
Al	۵۸/۸۵
Si	۰/۵۴
Cr	۰/۲۴
Mn	۰/۴۶
Fe	۲۸/۵

$FeAl_7$

شکل ۱۲- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ساختار شماره AAS-۲۲.



Element	Weight%
Al	۲۳/۶۹
Si	۲/۴۶
Mn	۱/۰۷
Fe	۶۵/۶

$MnSi_2$  و  $FeAl_7$  (۱)

Element	Weight%
Al	۷۵/۰۳
Fe	۲۴/۹۷

$FeAl_7$  (۲)

شکل ۱۳- تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ساختار شماره AAS۲۴.

است. حداقل سرعت برخورد برای آلومینیم ۵۰۸۳ به آلومینیم ۱۲۵۰ برابر ۳۳۷ متر بر ثانیه، و برای آلومینیم ۱۲۵۰ به فولاد دریایی برابر ۱۷۸ متر بر ثانیه، محاسبه شده است. حداقل زاویه برخورد برای آلومینیم ۵۰۸۳ به آلومینیم ۱۲۵۰ برابر ۸/۸ درجه، و برای آلومینیم ۱۲۵۰ به فولاد دریایی برابر ۸/۴۵ درجه، محاسبه شده است.

مقایسه‌ی سرعت های برخورد، در ستونهای ۴ و ۶، در جدول ۵ نشان می‌دهد که سرعت های پیش بینی شده به کمک شبیه سازی، همه از حداقل سرعت برخورد، بیشتر می باشند. مقایسه زاویه ی برخورد، در ستونهای ششم و هشتم، در جدول ۵ نشان می دهد که زاویه های برخورد پیش بینی شده به کمک شبیه سازی، همه از حداقل زاویه برخورد بیشتر می باشند و بنابراین می توانند قابل قبول باشند.

اگر مرز پایینی پنجره جوشکاری، مطابق بارابطه Wittman و Deribas [۹۱]، در نظر گرفته شود، مشاهده می شود که همه‌ی نمونه ها درون منطقه‌ی قابل جوشکاری قرار دارند. پس می توان گفت، نتایج شبیه سازی به خوبی با نتایج عملی مطابقت دارد و در منطقه ایمن در پنجره جوشکاری قرار دارد.

در جدول شماره‌ی ۵ نتایج شبیه سازی برای آزمایشها با بارهای انفجاری مختلف، نشان داده شده است. در ستون دوم و سوم به ترتیب ضخامت ماده‌ی منفجره و مقدار R، برای هر کدام از آزمایش ها، آورده شده است. R نشان دهنده نسبت جرم صفحه در واحد سطح به جرم بار منفجره در واحد سطح که به صورت زیر، تعریف میگردد.

$$R = \frac{m_c}{m_f} \quad (15)$$

بنابراین، با افزایش ضخامت بار انفجاری، نسبت R، افزایش یافته است. در ستون چهارم و پنجم و ششم، نتایج پیش بینی شبیه سازی برای سرعت برخورد صفحه پرنده، سرعت پیشروی جوشکاری و زاویه‌ی برخورد پیش بینی شده، آورده شده است. در اینجا برای به دست آمدن  $V_p$ ، مقدار حداکثر سرعت صفحه بعد از برخورد، به عنوان سرعت برخورد در نظر گرفته شده است. ستون هفتم و هشتم، حداقل سرعت برخورد و زاویه‌ی برخورد را نشان می دهد. همه این رابطه ها، اثر ضخامت صفحات و دانسیته آن‌ها را بر سرعت برخورد نشان می‌دهد. در نتیجه برای بارهای انفجاری متفاوت، مقادیر ثابت

جدول ۵- متغیرهای فرآیند برای نمونه های ۱ تا ۴

شماره‌ی نمونه	ضخامت ماده‌ی منفجره (mm)	R	سرعت برخورد پیش بینی شده (m/s)		سرعت پیشروی جوش پیش بینی شده ( $V_w$ ) (m/s)	زاویه برخورد پیش بینی شده (درجه)		حداقل سرعت برخورد (Kowalewskij) (m/s)		حداقل زاویه‌ی برخورد (Deribas) (m/s)	
			آلومینیم ۵۰۸۳	آلومینیم ۱۲۵۰		۲۸	۱۵	آلومینیم ۵۰۸۳	آلومینیم ۱۲۵۰	آلومینیم ۵۰۸۳	آلومینیم ۱۲۵۰
AAS-۱۹	۱۵	۱/۲۶	۹۳۷	۸۳۶	۲۴۸۰	۲۸	۱۵	۳۳۷	۱۷۸	۸/۸	۸/۴۵
AAS-۲۰	۲۰	۱/۶۹	۹۹۰	۷۵۰	۲۶۶۱	۲۸/۵	۱۵/۵	۳۳۷	۱۷۸	۸/۸	۸/۴۵
AAS-۲۲	۳۰	۲/۵۳	۱۰۶۱	۹۲۱	۲۸۵۰	۲۹	۱۶	۳۳۷	۱۷۸	۸/۸	۸/۴۵
AAS-۲۴	۲۵	۲/۱۱	۱۰۲۵	۷۱۰	۲۷۲۰	۲۲	۹	۳۳۷	۱۷۸	۸/۸	۸/۴۵

[۳]. لیاقت، غلامحسین؛ درویزه، ابوالفضل؛ نوری دامغانی، محمد؛ بزرسی مدل سینماتیکی

سطوح استوانه ای در فرایند جوشکاری انفجاری استوانه ها، دهمین کنفرانس سالانه مکانیک، ۱۳۸۱، ص ۷۹۳-۸۰۱.

[۴]. نوری دامغانی، محمد؛ نادری، غلامعلی؛ درویزه، ابوالفضل؛ بررسی تغییر شکل دینامیکی

ورق مستطیلی شکل در جوشکاری انفجاری به روش اجزاء محدود، دومین کنفرانس علمی کاربردی هوا فضا، ۱۳۸۱.

[۵]. دهقان منشادی، سید محمد؛ تدوین جوشکاری انفجاری لوله های دو جداره فولاد و آلیاژ

برنز، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۵.

[۶]. زمانی، احسان؛ مطالعه تجربی و تحلیلی جوشکاری انفجاری لوله های هم محور فولاد ضد

زنگ و فولاد کربنی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه تربیت مدرس، ۱۳۸۳.

[7]. Grignon, F.; Benson, D.; Vecchio, K. S.; Meyers, M. A.;

“Explosive Welding of Aluminum to Aluminum: Analysis, Computation and Experiments.”; Int. J. Imp. Eng. (2004), 30, 1331-1351.

[8]. Crossland, B.; “Explosive Welding of Metals and Its Application.”;

Oxford Clarendon Press: London, 1982.

[9]. ASM Committee on Explosion welding; “Explosion Welding”,

(1983).

[10]. Blazynski, T.Z.; “Explosive Welding, Forming and Compaction.”;

Applied Science publisher: London, 1983.

[11]. Patterson, R.A.; “Fundamentals of Explosion Welding.”; Los

Alamos Nat. Lab.(1985), U.S.A.

[12]. AL-Hassani, S.T.S.; Akbari Mousavi, S.A.A.; “Recent

Developments on the Response of Material and Structures to Impact and Explosion.”; 9<sup>th</sup> Ann. Mech. Eng. Conf. (2001), Gilan University.

[13]. Akbari Mousavi, S.A.A.; Burley, S. J.; AL-Hassani, S.T.S.;

“Simulation of Explosive Welding using the Williamsburg Equation of state to Model Low Detonation velocity Explosives.”; Int. J. Imp. Eng. (2005), 31, 719-734.

[14]. Johnson, R. G.; Cook, W. H.; “A Constitutive Model and Data for

Metals Subjected to Large Strains, High Strain-Rates and High temperature.”; Proc. 7<sup>th</sup> Int Symp Ball The Hague The Netherlands, (1983), 541-547.

[۱۵]. نوروزپور، محمد؛ شبیه سازی عددی و مطالعه تجربی اتصال جوش انفجاری بدنه و سوپر

استراکچر کشتی، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی کشتی سازی و صنایع

دریایی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، تیر ماه ۱۳۸۶.

## ۷. نتیجه گیری

۱- استحکام طولی اتصالات جوش شده بطور کلی از استحکام عرضی آنها در

کلیه ی آزمایش های استاندارد برشی بعمل آمده، بیشتر بوده و مقدار همگی آنها از حد استاندارد، بالاتر می باشد.

۲- با افزایش بار انفجاری، بدلیل افزایش تغییر فرم پلاستیک، اندازه ی عدد سختی ویکرز در لایه های مجاور فصل مشترک، افزایش می یابد.

۳- نتایج حاصل از آزمایش برش بر روی دو حالت اتصالات غیر هم جنس دو تایی و سه تایی، نشان می دهد که در نسبت های پایین بار انفجاری، بعلت افزایش تغییر فرم پلاستیک در لایه های مجاور فصل مشترک، استحکام برشی اتصال افزایش یافته و در نسبت های بالای ماده منفجره، بعلت افزایش انرژی جوشکاری و تشکیل بسته های انجمادی ترد در فصل مشترک اتصال، افت در استحکام اتصال وجود دارد.

۴- آزمایش های برش و آلتراسونیک و ریز سختی بر روی کلیه ی نمونه ها، نمایانگر کیفیت مناسب اتصال می باشد. همچنین بررسی های فلزننگاری نوری و الکترونی انجام گرفته بر روی فصل مشترک اتصال، نمایانگر تشکیل مراکز انجمادی متشکل از ترکیبات ترد بین فلزی در فصل مشترک اتصال بین فولاد دریایی و آلومینیم تجاری می باشد که با افزایش انرژی جوشکاری شاهد رشد در این مراکز می باشیم که سبب افت استحکام برشی در هر دو جهت طولی و عرضی می شود.

۵- مقادیر سرعت و زاویه های به دست آمده از نتایج شبیه سازی، برای همه ی نمونه ها به خوبی با روابط تئوری مطابقت دارند. به طوری که همه نمونه ها، درون منطقه قابل اتصال در پنجره جوش قرار میگیرند.

## ۸. مراجع

[1]. Young, G. A. Banker, J. G.; “Explosion Welded Bi-Metallic Solutions to Dissimilar Metal Joining.”; Society of Naval Architecture and Marine Engineer: Houston, Texas, 2004.

[2]. Trethewey, K. R. Chem, C.; Little, G. T.; “The USE of Explosion – Bounded Transition Joints for the Joining of Aluminum Superstructures to Steel.”; Royal Navy Engineering College: Manadon, (2004).