

## بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری درپوش زیر کونیومی میله سوخت به روش پرتوالکترونی

قربان محمدیان دوآب\* - منوچهر روشن‌ضمیر - نظامعلی بختیاری

سازمان انرژی اتمی ایران، شرکت تولید مواد اولیه و سوخت هسته‌ای ایران

**چکیده:** آلیاژ زیرکونیوم-نیوبیوم جزء مواد اصلی مورد استفاده در تولید سوخت هسته‌ای است. این ماده به دلیل پایین بودن سطح مقطع جذب نوترون حرارتی و مناسب بودن خصوصیات مکانیکی و شیمیایی برای شرایط کاری راکتورهای قدرت سودمند است. این ماده به طور وسیعی در راکتورهای آب سبک و سنگین استفاده می‌شود. درپوش آلیاژ زیرکونیومی با استفاده از جوشکاری پرتوالکترونی تحت شرایط خلاء به لوله به ضخامت نازک از جنس خود درپوش جوش داده می‌شود. آزمایش‌های صنعتی برای این فرایند جوشکاری اعمال می‌شود و پاسخ مربوط به نتایج بازرسی چشمی، آزمایش رادیوگرافی، آزمایش متالوگرافی، آزمایش خوردگی و آزمایش کشش ثبت می‌شود و این نتایج با معیارهای ارایه شده در استانداردهای مربوط به هر آزمایش مقایسه و بررسی می‌شود تا نقطه بهینه پارامترهای جوشکاری به روش پرتوالکترونی مشخص شود.

**کلید واژه:** میله سوخت، بهینه‌سازی، جوشکاری پرتوالکترونی، آزمایش‌های متالوگرافی، خوردگی، کشش، رادیوگرافی

### مقدمه:

اجزاء میله سوخت شامل غلاف، درپوش پایینی، قرص‌های جداکننده، قرص‌های دی اکسید اورانیوم، فنر نگهدارنده و درپوش بالایی می‌باشد. برای تولید یک میله سوخت ابتدا درپوش پایینی به غلاف جوش داده می‌شود. سپس بعد از قرار دادن قرص‌های دی اکسید اورانیوم در داخل غلاف، قرص‌های جداکننده در داخل غلاف قرار داده می‌شوند و سپس فنر برای نگه داشتن قرص‌ها در داخل غلاف استفاده می‌شود و در آخر درپوش بالایی به غلاف جوش داده می‌شود. میله‌های سوخت حاوی مواد شکافت‌پذیر می‌باشد از اینرو با قرار گرفتن این میله‌ها در داخل راکتور و وقوع واکنش هسته‌ای حجم عظیمی از مواد رادیواکتیو تولید می‌شوند. جوش درپوش باید با دقت و کیفیت بالایی انجام شود برای اینکه اولاً فعالیت مجتمع در طول کارکردش در راکتور رضایت‌بخش باشد و ثانیاً هر نقصی در جوش منجر به پخش مواد رادیواکتیو در خنک‌کننده راکتور می‌گردد. روش‌های جوشکاری درپوش میله سوخت محدود می‌باشند. علت محدودیت این است که اولاً فلز زیرکونیوم در دمای بالا نسبت به اتمسفر حساسیت زیادی دارد و ثانیاً به جوشی با کیفیت بالا به خاطر کاربردش نیاز است. در حال حاضر جوشکاری درپوش میله سوخت به سه روش انجام می‌شود که این روش‌ها شامل جوشکاری تیگ، جوشکاری مقاومتی و جوشکاری پرتوالکترونی می‌باشند. اولین روشی که برای جوشکاری درپوش میله سوخت استفاده می‌شد روش جوشکاری تیگ بوده است ولی با پیشرفت تکنولوژی و علم و همچنین مزایای دو روش جوشکاری پرتوالکترونی و مقاومتی نسبت به جوشکاری تیگ این دو روش به مرور زمان جایگزین جوشکاری تیگ شدند. در حال حاضر در دنیا درپوش پایینی به روش مقاومتی و درپوش بالایی به

روش پرتوالکترونی به غلاف جوشکاری می‌شود. در این مقاله به بهینه‌سازی پارامترهای جوشکاری پرتوالکترونی پرداخته می‌شود.

### تئوری:

انتخاب پارامترهای جوشکاری بر اساس انرژی وارد شده به قطعه کار می‌باشد که انرژی تولید شده در فرایند جوشکاری به روش پرتوالکترونی از فرمول ۱ پیروی می‌کند.

$$E\left(\frac{j}{in}\right) = \frac{V \cdot I}{S} = \frac{P}{S}$$
 فرمول ۱:

I: جریان پرتو (A)

V: ولتاژ شتاب دادن پرتو

P: قدرت پرتو (w)

S: سرعت جوشکاری (in/s)

همانطور که از فرمول ۱ مشخص است انرژی ورودی به قطعه کار در روش جوشکاری به روش پرتوالکترونی با ولتاژ شتاب دهنده، جریان پرتو و قدرت پرتو رابطه مستقیم دارد و با سرعت جوشکاری رابطه معکوس دارد. علاوه بر موارد فوق، میزان خلاء، عوامل دیگری نظیر فاصله کناره گیری (فاصله ستون تفنگ تا قطعه کار)، جریان متمرکز کننده (کانونی)، ابعاد اتصال، تمیزکاری و شرایط و کیفیت سطحی قطعات حین جوشکاری بر روی کیفیت جوش، نحوه انجام فرایند و نرخ تولید تاثیرگذار خواهند بود.

کیفیت جوش عمدتا بستگی به کاربرد جوش دارد مثلا اگر جوش ایجاد شده در صنایع هوافضا، هسته‌ای و هواپیمایی کاربرد داشته باشد باید در کنترل آن یک سری استانداردهای سخت گیرانه تری اعمال گردد. در سایر کاربردها، مانند صنایع خودروسازی، سخت گیری کمتری وجود دارد. بازرسی و کنترل کیفیت جوش دارای مراحل مختلفی می‌باشد که هر مرحله باید با دقت کافی انجام شود. بازرسی و کنترل کیفیت جوش شامل سه مرحله است:

۱. کنترل اجزاء قبل از جوشکاری

۲. کنترل در حین جوشکاری

۳. کنترل بعد از جوشکاری

کنترل قبل از جوشکاری شامل تمیزکاری قطعات، مغناطیس زدایی قطعات و نگهدارنده‌ها در صورت نیاز و دقت توهم رفتن می‌باشد. کنترل در حین جوشکاری شامل کنترل سطح خلاء، کنترل برنامه جوش و بازرسی درز جوش می‌باشد. کنترل بعد از جوشکاری شامل کنترل دقت ابعادی بعد از جوش و کنترل عیوب جوش از قبیل تخلخل، ترک و غیره با استفاده از آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب می‌باشد.

هر چند کنترل نمونه‌ها قبل و در حین جوشکاری دارای اهمیت هستند، اما مهمترین مرحله کنترل و بازرسی برای بهینه‌سازی، کنترل نمونه بعد از جوشکاری است. بنابراین برای بهینه‌سازی فرایند جوش درپوش بر روی یک سری از

نمونه‌ها جوشکاری انجام می‌شود و هر نمونه بعد از جوشکاری با آزمایش‌های مخرب و غیرمخرب مورد بررسی قرار می‌گیرد. انجام آزمایش‌های مخرب بر روی نمونه‌های جوش به منظور بررسی کنترل فرایند از نظر استحکام مکانیکی، خصوصیات فیلم خوردگی، اندازه دانه ناحیه جوش و منطقه مجاور جوش می‌باشد. آزمایش‌های غیرمخرب بر روی تمامی جوش‌های میله سوخت به منظور بررسی عمق نفوذ و ناپیوستگی در ناحیه جوش انجام می‌پذیرد. بر روی جوش پرتو الکترونی آزمایش‌های کنترل کیفی زیر انجام می‌شود:

- بازرسی چشمی
- آزمایش خوردگی
- آزمایش متالوگرافی
- آزمایش سختی سنجی
- آزمایش رادیوگرافی
- آزمایش کشش
- آزمایش تعیین فاز
- آزمایش نشت هلیوم

### روش انجام آزمایش:

جدول مشخصات پارامترهای جوشکاری از قبیل ولتاژ شتاب‌دهنده، جریان پرتو (جریان جوشکاری)، سرعت جوشکاری، میزان خلاء تفنگ الکترونی و اتاقک جوش، زمان مراحل پیش‌گرم، جوشکاری و پس‌گرم و در نهایت مدت زمان خنک‌کاری برای هر آزمایش را نشان می‌دهد. در تمام آزمایش‌ها فاصله تفنگ الکترونی تا سطح قطعه کار و جریان کانونی ثابت است. مشخصات متغیرهای جوشکاری (WPS) پنج نمونه اول بر اساس نتایج مطالعه مقالات پیشنهاد شده است. مشخصات متغیرهای جوشکاری پنج نمونه دوم بر اساس نتایج آزمایش‌های چشمی و متالوگرافی صورت گرفته بر روی پنج نمونه اول پیشنهاد شده‌اند. مشخصات متغیرهای جوشکاری سه نمونه سوم بر اساس نتایج آزمایش‌های چشمی و متالوگرافی صورت گرفته بر روی پنج نمونه دوم پیشنهاد شده‌اند. مشخصات متغیرهای جوشکاری سه نمونه چهارم بر اساس نتایج آزمایش‌های چشمی و متالوگرافی و رادیوگرافی صورت گرفته بر روی سه نمونه سوم پیشنهاد شده‌اند. در تمام این آزمایش‌ها، انتخاب مقادیر جریان جوشکاری، ولتاژ شتاب‌دهنده و سرعت جوشکاری بر اساس انرژی ورودی (فرمول ۱) می‌باشد و مقادیر میزان خلاء اتاقک جوش و مدت زمان خنک‌کاری نیز بر اساس بازرسی چشمی نمونه جوشکاری شده قبلی برای نمونه بعدی انتخاب می‌شود. در تمام این آزمایش‌ها، سیکل جریان به صورت مرحله‌ای بر حسب محیط لوله اعمال می‌شود. در مرحله اول که همان مرحله پیش‌گرم است، جریان به صورت خطی از صفر تا جریان جوشکاری افزایش می‌یابد. در مرحله دوم که مرحله جوشکاری است میزان جریان ثابت است. در مرحله سوم که مرحله پس‌گرم است، میزان جریان به صورت خطی کاهش یافته تا به صفر برسد. زمان مراحل پیش‌گرم، جوشکاری و پس‌گرم در این آزمایش‌ها نیز بر حسب ثانیه بیان شده است. انتخاب مقادیر زمان پیش‌گرم بر اساس انرژی ورودی (فرمول ۱) و کاهش تنش‌های پسماند می‌باشد. انتخاب زمان جوشکاری بر اساس کامل جوش خوردن نمونه می‌باشد و معیار انتخاب زمان پس‌گرم بر اساس انرژی ورودی (فرمول ۱)، کاهش

تنش‌های پسماند و عدد اندازه دانه می‌باشد. مدت زمانی را که بعد از اتمام مرحله پس‌گرم نمونه در داخل محفظه در خلاء بالا باقی می‌ماند تا سرد شود، زمان خنک‌کاری می‌گویند.

جدول ۱: مشخصات متغیرهای آزمایش

آزمایش هشتم	آزمایش هفتم	آزمایش ششم	آزمایش پنجم	آزمایش چهارم	آزمایش سوم	آزمایش دوم	آزمایش اول	شماره آزمایش	
								نوع پارامتر	
۲۰	۱۰	۱۰	۵	۵	۵	۱۰	۱۷	mA	جریان پرتو
۴۵	۵۴	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۵۰	۳۰	KV	ولتاژ شتاب‌دهنده
۱۰	۱۵	۹/۶	۹/۶	۹/۶	۴/۲	۹/۶	۹/۶	mm/s	سرعت
۱/۲ $\times 10^{-4}$	۱/۵ $\times 10^{-4}$	۱/۵ $\times 10^{-4}$	۲ $\times 10^{-4}$	۲ $\times 10^{-4}$	۵ $\times 10^{-4}$	۷ $\times 10^{-4}$	۹ $\times 10^{-4}$	mbar	میزان خلاء اتاقک جوش
۳/۲ $\times 10^{-6}$	۴ $\times 10^{-6}$	۴ $\times 10^{-6}$	۲/۳ $\times 10^{-6}$	۲/۲ $\times 10^{-6}$	۲/۲ $\times 10^{-6}$	۲/۳ $\times 10^{-6}$	۲/۲ $\times 10^{-6}$	mbar	میزان خلاء تفنگ
۲۵	۱۰	۱	۷	۵	۲	۲	۱	min	زمان خنک‌کاری
۱/۱	۰/۹۸	۱/۵۳	۱/۱۵	۰/۵۷	۱/۳۱	۰/۵۷	۰/۵۷	s	زمان پیش‌گرم
۵/۸۶	۳/۹۱	۶/۱۱	۶/۱۱	۶/۱۱	۱۰/۴۷	۴/۵۸	۴/۵۸	s	زمان جوشکاری
۱/۱	۰/۹۸	۱/۵۳	۱/۱۵	۱/۱۵	۲/۶۲	۱/۱۵	۱/۱۵	s	زمان پس‌گرم
۲/۱۸								mA	جریان کانونی

ادامه جدول ۱: مشخصات متغیرهای آزمایش

آزمایش شانزدهم	آزمایش پانزدهم	آزمایش چهاردهم	آزمایش سیزدهم	آزمایش دوازدهم	آزمایش یازدهم	آزمایش دهم	آزمایش نهم	شماره آزمایش	
								نوع پارامتر	
۱۱-۱۸	۱۴	۱۱	۱۱	۱۱	۵	۱۵	۲۰	mA	جریان پرتو
۵۰	۵۰	۵۵	۵۵	۵۵	۵۰	۵۵	۴۵	KV	ولتاژ شتاب دهنده
۱۵	۹/۶	۱۵	۱۵	۱۵	۹/۶	۹/۶	۹/۶	mm/s	سرعت
۱/۱ $\times 10^{-4}$	۱/۵ $\times 10^{-4}$	۱/۳ $\times 10^{-4}$	۹/۶ $\times 10^{-5}$	۱/۳ $\times 10^{-4}$	۱/۲ <sup>-۴</sup> $\times 10$	۱/۲ $\times 10^{-4}$	۱/۲ $\times 10^{-4}$	mbar	میزان خلأ اتاقک جوش
۲/۲ $\times 10^{-6}$	۲/۹ $\times 10^{-6}$	۲/۵ $\times 10^{-6}$	۲/۸ $\times 10^{-6}$	۵/۷ $\times 10^{-6}$	۲/۷ <sup>-۶</sup> $\times 10$	۳/۲ $\times 10^{-6}$	۳/۲ $\times 10^{-6}$	mbar	میزان خلأ تفنگ
۳۰	۲۵	۲۰	۲۰	۲۰	۲۶	۱۵	۲۰	min	زمان خنک کاری
۰/۳۷	۰/۵۷	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	S	زمان پیش گرم
۵/۸۶	۵/۷۳	۳/۹۱	۳/۹۱	۳/۹۱	۴/۸۴	۷/۶۴	۴/۵۸	S	زمان جوشکاری
۰/۷۳	۱/۱۵	۰/۹۸	۰/۹۸	۰/۹۸	۱/۱۵	۱/۱۵	۱/۱۵	S	زمان پس گرم
۲/۱۸								mA	جریان کانونی

نتایج:

۱- بعد از بررسی نتایج تمام آزمایش‌های انجام شده بر روی نمونه‌های جوشکاری شده بهترین مقادیر پارامترها برای جوشکاری درپوش میله سوخت به روش پرتوالکترونی به صورت زیر است:

ولتاژ پرتو: ۵۵ کیلوولت (KV)

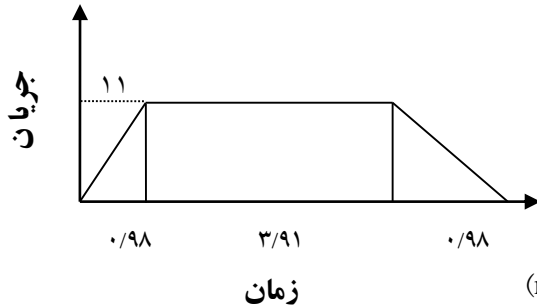
جریان پرتو: ۱۱ میلی‌آمپر (mA)

سرعت جوشکاری: ۱۵ میلیمتر بر ثانیه (mm/s)

میزان خلاء اتاقک جوش:  $1 \times 10^{-4}$  میلی‌بار (mbar)

میزان خلاء تفنگ الکترونی:  $2/2 \times 10^{-6}$  میلی‌بار (mbar)

مدت زمان خنک‌کاری: ۲۰ دقیقه (min)



- ۲- با افزایش  $V.I/S$  اندازه ناحیه جوش و ناحیه مجاور جوش افزایش می‌یابد.
- ۳- پارامتر ولتاژ نسبت به دو پارامتر جریان و سرعت جوشکاری تاثیر بیشتری بر عمق نفوذ دارد.
- ۴- پارامتر جریان نسبت به پارامتر ولتاژ تاثیر بیشتری بر اندازه پهنای جوش دارد.

#### پیشنهادها:

- ۱- پارامترهای گوناگونی بر روی کیفیت جوش در روش جوشکاری پرتوالکترونی تاثیر می‌گذارند. در این پروژه فقط تعدادی از پارامترها بهینه شدند و پارامترهای دیگری از قبیل جریان کانونی، نوسان پرتو، هندسه درپوش و مدت زمان خنک‌کاری ثابت نگه داشته شدند. پیشنهاد می‌شود ضمن تحقیق، این پارامترها نیز بهینه شوند.
- ۲- برای بهینه سازی پارامترهای فوق تست‌های زیر از قبیل بازرسی چشمی، رادیوگرافی، متالوگرافی، کشش و خوردگی بر روی نمونه‌ها انجام شد. پیشنهاد می‌شود بر روی پارامترهای بهینه شده آزمایش‌های نشت هلیوم، سختی سنجی و تعیین فاز انجام شود.
- ۳- از یک طرف برای هر نمونه مدت زمانی برای خنک‌کاری بعد از اتمام عملیات جوشکاری لازم است از طرف دیگر مدت زمانی نیز برای خلاء کردن محفظه اتاقک جوش لازم است پس بهتر است برای افزایش نرخ تولید سیستمی طراحی شود که امکان جوشکاری چند میله در اتاقک ایجاد گردد.
- ۴- دو نوع ماشین جوشکاری پرتوالکترونی وجود دارد. ماشین جوشکاری ولتاژ بالا ( $V < 150 \text{ kV}$ ) و ماشین جوشکاری ولتاژ پایین ( $V < 60 \text{ kV}$ ) در حال حاضر در صنعت استفاده می‌شوند. برای بهینه سازی این پارامترها از ماشین جوشکاری ولتاژ پایین استفاده شده است. حال پیشنهاد می‌شود برای بهینه سازی پارامترها از ماشین ولتاژ بالا استفاده شود.

۵- بعد از اتمام زمان خنک‌کاری، به دلیل اختلاف فشار زیاد بین داخل محفظه با اتمسفر لازم است فشار داخل محفظه به تدریج به فشار اتمسفر برسد که بتوان نمونه را بیرون آورد. در این پروژه برای رساندن فشار داخل محفظه به فشار اتمسفر از هوا استفاده می‌شود ولی بهتر است به جای هوا از گاز آرگون استفاده شود.

۶- ناحیه جوش دارای فاز بتا است. استحکام تسلیم و کششی در فاز بتا به اندازه دانه وابسته است. اندازه دانه‌ها هر چه چقدر کوچکتر باشند استحکام تسلیم و کشش بیشتر می‌شود. در این پروژه تا حدودی اندازه دانه‌ها کوچکتر شدند ولی با این وجود باز هم اندازه دانه‌ها بزرگ است بهتر است بر روی پارامترها تحقیق شود تا اندازه دانه کوچکتری به دست آید.

### مراجع:

[۱] American Vacuum Society. " Glossary ". ۲۰۰۶, Available:

<http://www.aip.org/avsguide/refguide/glossary.html>.

[۲] National Physical Laboratory, UK. " FAQ on Pressure and Vacuum". ۲۰۰۶, Available:

<http://www.npl.co.uk/pressure/faqs/vacuum.html>.

[۳] Cary, Howard B and Helzer, Scott C. "Modern Welding Technology", Pearson Education: Upper Saddle River, New Jersey, ۲۰۰۵.

[۴] ه. یزدان فر، " طراحی تفنگ الکترونی برای کاربرد در دستگاه جوشکاری باریکه الکترونی"، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه آزاد اسلامی، ۱۳۸۴.

[۵] م. ساعدی، " تکنیک های جوشکاری"، موسسه انتشارات علمی، تهران، ۱۳۷۰.

[۶] الف. کوکبی، م. محمودی غزنوی، " تکنولوژی جوشکاری"، موسسه انتشارات علمی دانشگاه شریف، تهران، ۱۳۸۴.

[۷] E. Koleva, G. Mladenov, K. Vutova, "Calculation of Weld Parameters and Thermal Efficiency in Electron Beam Welding", Vacuum ۵۳, pp. ۶۷-۷۰, ۱۹۹۹.

[۸] G. Mladenov, K. Vutova and S. Wojcicki, "Experimental investigation of the weld depth and thermal efficiency during electron beam welding", ۱۹۹۸.

[۹] T. K. Saha and A. K. Ray, "Vacuum – The Ideal Environment for Welding of Reactive Materials", Journal of Physics, Conference Series ۱۱۴, ۲۰۰۸.

[۱۰] Specification of Zirconium Alloy EH-۱۱۰ Sheet for IR-۴۰ Fuel Components.

[۱۱] ASTM G۲M, "Test Method For Corrosion Testing of Product of Zirconium", Hafnium and Their Alloys in Water at ۶۳۳K or in steam at ۶۷۳K.

[۱۲] ASTM B۸۱۱-۹۰, "Standard Specification For Wrought zirconium Alloy", Seamless Tubes For Nuclear Reactor Fuel cladding.

[۱۳] Technical Reports Series No. ۲۲۱, "Guidebook on Quality Control of Water Reactor Fuel", IAEA, ۱۹۸۳.



- [۱۴] ASTM E۳, "Practice for Preparation of Metallographic Specimens".
- [۱۵] ASTM E۱۱۲-۹۶, "Standard Test Method for Determining Average Grain Size".
- [۱۶] ASM Handbook, Vol.۹, "Metallography and Microstructure", ۱۹۹۹.
- [۱۷] ASTM EAM-۰۴, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials".
- [۱۸] <http://www.joiningtech.com/>
- [۱۹] Ganguly, c., "Advances in Zirconium Technology for Nuclear Reactor Applications". Proceedings of the Symposium Zirconium, Zirc, India, ۲۰۰۲.
- [۲۰] Dieter, J. E., "Mechanical Metallurgy", McGraw-Hill Book Co. UK Ltd, ۱۹۸۸.
- [۲۱] Sharma, I. G., "Electron Beam Melting of Reactive and Refractory Metals and Their Alloys", Nov ۱۹-۲۱, ۲۰۰۳.
- [۲۲] H. S. Kalish, "Electron Beam Welding of Zircaloy-۲", Metals Eng. Quarterly, ۱۹۶۳.
- [۲۳] I. Amota and G. Carerna, "Some Developments in the End Closure Welding Technology for Zircaloy Cladded Fuel Rods", EnergiaNucleari, ۱۹۷۰.
- [۲۴] R. Bakish, J. Wiley and Sons, "Introduction to Electron Beam Technology", New York, ۱۹۶۲.
- [۲۵] Arata, Y., "Development of Ultra High Energy Density Heat Source and Its Application to Heat Processing". Okada Memorial Japan Society, Tokyo, ۱۹۸۵.
- [۲۶] Welding Handbook, Vol. ۳, ۷th Ed. "American Welding Society", Maimi, FL, ۱۹۷۶.
- [۲۷] د. ورکیانی، "متالورژی جوشکاری"، انتشارات شهرآب، تهران، ۱۳۸۱.
- [۲۸] الف. خاکزاد، "متالوگرافی، مفاهیم و آزمایشگاهها"، نشر طراح، تهران، ۱۳۸۷.
- [۲۹] Glen L. M, Robert E. A., "Electron Beam Welding Fundamentals and Applications", Chiago, ۱۹۷۵.
- [۳۰] D. Milosavljevic, "Electron Beam Welding of Zircaloy-۲", Institute of Nuclear Sciences, Beograd.
- [۳۱] Y.S. Tarng, H.L. Tsai and S.S. Yeh, "Modeling, Optimization and Classification of Weld Quality in Tungsten Inert Gas Welding", ۱۹۹۸.
- [۳۲] Dipl. Lng. H. Schultz, "Electron Beam Welding", page ۳-۴, ۲۰۰۴.
- [۳۳] ح. اسکندری، "جزوه تکنولوژی جوشکاری تیگ زیرکونیوم و آلیاژهای آن و کاربرد آن در اتصال درپوش میله سوخت"، اصفهان، ۱۳۸۴.
- [۳۴] ح. فلعه شرق، "جزوه مشخصات فنی و توصیف بهینه سازی دستگاه جوش اشعه الکترونی"، اصفهان، ۱۳۸۴.
- [۳۵] ع. توکلی، "جزوه بررسی خوردگی در منطقه جوش"، اصفهان، ۱۳۸۶.
- [۳۶] ع. توکلی، "جزوه ارزیابی مقاومت به خوردگی آلیاژ Zr-Nb"، اصفهان، ۱۳۸۴.
- [۳۷] ح. فلعه شرق، "جزوه جوشکاری به روش پرتوالکترونی"، اصفهان، ۱۳۸۳.
- [۳۸] ح. اسکندری، "جزوه گزارش مطالعات پروژه جوشکاری مقاومتی زیرکونیوم"، اصفهان، ۱۳۸۶.