



## پژوهش‌نامه ریخته‌گری

### مقاله پژوهشی:

# آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi: مطالعه و بررسی ریزساختار آلیاژ ساخته شده با فرآیند ذوب مجدد قوسی در خلاء

علیرضا زینعلی<sup>۱</sup>، حمید خرسند<sup>۲\*</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران،

۲- دانشیار، دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی تهران.

\* نویسنده مکاتبه کننده: hkhorsand@kntu.ac.ir

### چکیده:

تاریخ دریافت: ۲۴ مرداد ۱۴۰۳

تاریخ بازنگری: ۰۶ مهر ۱۴۰۳

تاریخ پذیرش: ۲۰ مهر ۱۴۰۳

مواد آنتروپی بالا دسته جدیدی از مواد پیشرفته هستند که با استفاده از حداقل پنج و حداکثر سیزده عنصر تشکیل دهنده آلیاژی در نسبت‌های هم‌اتمی یا نزدیک به هم‌اتمی هستند و در طول چند سال اخیر به دلیل داشتن خواص منحصر به فرد مورد توجه محققان قرار گرفتند. در میان روش‌های تولید آلیاژهای آنتروپی بالا، روش ذوب مجدد قوسی در خلاء (VAR) به دلیل کنترل فرآیند ذوب و انجماد سریع مذاب از اهمیت بالایی برخوردار است و منجر به همگنی ریزساختاری بهتر نسبت به ریخته‌گری می‌شود. هدف از این پژوهش، ساخت ترکیب شیمیایی همگن و یکنواخت از آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi با فرآیند (VAR) و بررسی ریزساختار، شناسایی و توزیع عناصر، ترکیب فازی و سختی آلیاژ با استفاده از میکروسکوپ نوری، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پراش سنجی اشعه ایکس، طیف‌سنجی پلاسمای جفت شده القایی و سختی‌سنج است. بررسی و نتایج نشان داد که آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi در محدوده تشکیل محلول جامد و دارای ساختار دو فازی BCC+FCC است. همچنین ساختار گلببری شکل با نواحی دندریتی و بین دندریتی در تصاویر مشخص شد. توزیع و پراکندگی عناصر تشکیل دهنده به صورت یکنواخت در تصاویر آنالیز MAP مشاهده شد. مقدار درصد وزنی عناصر تشکیل دهنده با درصد وزنی تئوری محاسبه شده هم‌خوانی داشت. پارامتر شبکه برای فاز BCC و FCC به ترتیب ۲/۸۶۸ و ۳/۵۷۸ آنگستروم محاسبه شد و سختی آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi برای نمونه بالک ۵۰۵ ویکرز گزارش شد.

### واژه‌های کلیدی:

آلیاژ آنتروپی بالا،  
ذوب مجدد قوسی در خلاء،  
مواد پیشرفته،  
گلببری شکل،  
دندریتی.

### ارجاع به این مقاله:

علیرضا زینعلی، حمید خرسند، آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi: مطالعه و بررسی ریزساختار آلیاژ ساخته شده با فرآیند ذوب مجدد قوسی در خلاء، پژوهش‌نامه ریخته‌گری، بهار و تابستان ۱۴۰۴، جلد ۹، شماره ۱، صفحات ۵-۱۷.

شناسه دیجیتال: (DOI): 10.22034/frj.2024.470403.1199

### ۱- مقدمه

منجر می‌شود، تغییر در خواص مکانیکی را به همراه دارد. به عنوان مثال، سختی آلیاژ آنتروپی بالا MoTiVFeNiZrCoCr بیش از ۸۰۰ HV و سختی فولاد زنگ‌نزن ۳۱۶ زیر ۲۰۰ HV است [۱-۴]. آلیاژ آنتروپی بالا AlCoCrFeNi (HEA) به دلیل خواص استثنایی خود در صنایع مختلف کاربرد دارد. در بخش هوافضا، مقاومت حرارتی بالای آن (تا ۱۰۰۰ درجه سانتیگراد) آن را برای اجزای موتور جت مناسب می‌کند، در حالی که

آلیاژهای آنتروپی بالا دسته جدیدی از مواد پیشرفته هستند که عموماً با هدف بهبود خواص مکانیکی و کارایی، به نسبت مساوی با هم مخلوط می‌شوند. این آلیاژها اولین بار توسط یه و همکارانش [۱] در سال ۲۰۰۴ معرفی شده‌اند. همچنین ترکیب اتمی این آلیاژها حداقل از پنج عنصر با نسبت اتمی بین ۵ تا ۳۵ درصد تشکیل می‌شوند [۱، ۲]. چینش اتم‌ها که به آنتروپی اختلاط بالا

منجر به نقص و عیب در آلیاژ آنتروپی بالا شود. روش ذوب مجدد قوسی در خلاء (VAR<sup>3</sup>) منجر به همگنی در ریزساختار نسبت به ریخته‌گری می‌شود و از نقص در آلیاژهای آنتروپی بالا جلوگیری می‌کند. این روش سختی و استحکام را نیز افزایش می‌دهد و بر اساس مطالعات و نتایج سایر محققان، شکل‌پذیری را در آزمایش کشش به طور قابل توجهی بهبود می‌بخشد [۷]. در جدول ۱ مزایا و معایب روش‌های اشاره شده به صورت مختصر نشان داده شده است [۱-۶].

ژانگ و همکارانش [۱۹] آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi را به روش ذوب قوسی با سرعت‌های انجمادی  $1800-2000 \mu\text{m/s}$  در گرادپان دمایی  $70 \text{ k/mm}$ ، با ساختار تک فاز BCC و ثابت شبکه  $0.05 \pm 2/890 \text{ \AA}$ ، چو و همکاران [۵]، به بررسی ساختار کریستالی در آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$  با مقادیر مختلف آلومینیوم پرداختند که در مقدار  $(0 < x < 0.375)$ ، تک‌فاز FCC،  $(0.2 < x < 0.5)$ ، تک‌فاز BCC و در  $(0.5 < x < 1)$  مخلوط دو فازی FCC+BCC را به دست آوردند. آلیاژهای آنتروپی بالایی که ساختار کریستالی FCC دارند، از استحکام کمی برخوردار هستند و آلیاژهایی که از فاز BCC تشکیل شده‌اند، انعطاف‌پذیری ضعیفی دارند [۳]. لو [۶]، آلیاژهای آنتروپی بالای یوتکتیک با فازهای FCC+BCC را پیشنهاد کرده بود که خواص مکانیکی عالی را نشان می‌دهند. بر این اساس محققان بر این باورند که در آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$  در  $(x=1)$  ساختار کریستالی دو فازی FCC+BCC خواص مناسبی دارند [۷].

با توجه به اهمیت روش سنتز بر ریزساختار و همگنی ترکیب در این پژوهش، برای نخستین بار این موضوع مورد مطالعه قرار گرفته است. به عبارت بهتر، با استفاده از روابط ترمودینامیکی و بهینه‌سازی ترکیب آلیاژ، سعی شده است تا شرایط تشکیل فاز محلول جامد ایجاد شود و از نقص و عیب در روش ساخت جلوگیری شود. از این رو هدف اصلی پژوهش حاضر، تشکیل فاز محلول جامد و همگنی ریزساختاری و جلوگیری از عیب و نقص در آلیاژ است که در ادامه، آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi با استفاده از روش ذوب مجدد قوسی در خلاء ساخته شد و ترکیب شیمیایی، ریزساختار، نوع فاز و سختی به صورت دقیق مورد بررسی قرار گرفت.

مقاومت در برابر خوردگی عالی (میزان خوردگی کمتر از  $0.1$  میلی‌متر در سال) در محیط‌های دریایی و کارخانه‌های فرآوری شیمیایی مناسب است. سختی بالای آلیاژ (تا  $700 \text{ HV}$ ) و مقاومت در برابر سایش آن را برای پوشش‌ها و مهندسی سطح ایده‌آل می‌کند و پایداری آن در برابر تشعشع برای کاربردهای صنعت هسته‌ای مناسب است. علاوه بر این، خواص مکانیکی آن، مانند استحکام بالا (مقاومت تسلیم حدود  $1500$  مگاپاسکال) و سختی مناسب، آن را برای ابزارسازی و کاربردهای دیگر مورد نیاز ساخته است [۱-۶].

محققان تلاش کردند که آلیاژهای آنتروپی بالا را با روش‌های مختلفی تولید کنند، یکی از این روش‌ها، ساخت افزودنی (AM<sup>1</sup>) است [۷-۱۰]. این روش در کنار موفقیت‌هایی که در عملکرد خود داشت ولی هزینه و مصرف انرژی بالا باعث شد تا روش (AM) تنها به عنوان یک مسیر امیدوار کننده برای ساخت آلیاژهای آنتروپی بالا باقی بماند. فو و همکاران [۱۱] آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{Al}_{0.6}\text{CoNiFe}$  را با روش پرس داغ تهیه کردند. اگر چه آلیاژ به دست آمده از استحکام و سختی بالایی برخوردار است اما چگالی کم و منافذ زیادی دارد. برای بهبود چگالی و حذف منافذ، جی و همکاران [۱۲]، آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrNiFe را با تف جوشی پلاسمای جرقه‌ای (SPS<sup>2</sup>) تهیه کردند و نتایج نشان دادند که آلیاژ حاصل از این روش، ساختار متراکم و خواص مکانیکی عالی از خود نشان می‌دهد. روش (SPS) پتانسیل بالایی را برای تولید با کیفیت این آلیاژها دارد ولی کاربرد صنعتی آن به دلیل دمای بالای فرآیند و مصرف انرژی بالا محدود شد. این مطالعات نشان داد که آلیاژهای آنتروپی بالای تولید شده توسط روش متالورژی پودر از نظر عملکرد، در مجموع از روش‌های دیگری همچون ریخته‌گری معمولی و (AM) بهتر عمل می‌کنند [۱۳]. با این حال، فناوری متالورژی پودر، هنوز هم نقص‌های زیادی در کنترل یکنواختی ریزساختار، چگالی و مصرف بالای زمان و انرژی دارد [۷].

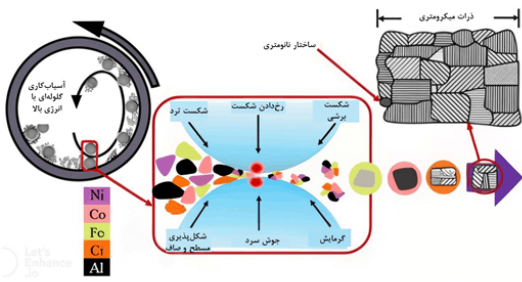
در حال حاضر، آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi با روش‌های مختلفی همچون ریخته‌گری، ساخت افزودنی و متالورژی پودر تهیه می‌شوند [۱۴-۱۶]. در شکل ۱ شماتیکی از روش‌های اشاره شده، نشان داده شده است [۱۷]. در بین روش‌های گفته شده، ریخته‌گری و متالورژی پودر دو روش رایج برای ساخت آلیاژهای آنتروپی بالا هستند. نقص در فرآیند ریخته‌گری ممکن است

<sup>3</sup>Vacuum Arc Remelting (VAR)

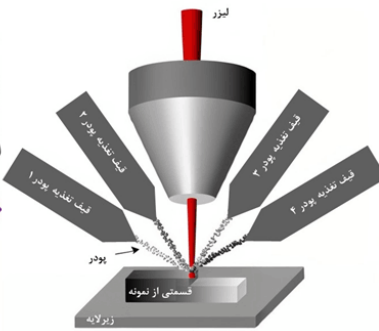
<sup>1</sup>Additive manufacturing (AM)

<sup>2</sup>Spark Plasma Sintering (SPS)

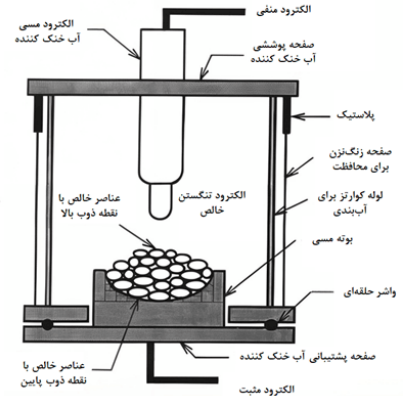
(ج) - متالورژی پودر (آلیاژسازی مکانیکی)



(ب) - ساخت افزودنی (رسوب گذاری مستقیم لیزری)



(الف) - ریخته‌گری (ذوب قوسی)



شکل ۱- فرآیندهای مختلف ساخت آلیاژهای آنتروپی بالا، (الف) ریخته‌گری (ذوب قوسی)، (ب) ساخت افزودنی (رسوب گذاری مستقیم لیزری) و (ج) متالورژی پودر (آلیاژسازی مکانیکی) [۱۷].

جدول ۱- مزایا و معایب روش‌های ساخت آلیاژ آنتروپی بالا [۱-۶]

روش	مزایا	محدودیت
ریخته‌گری (ذوب قوسی)	۱- ترکیب آلیاژی همگن ۲- ساده و مقرون به صرفه	۱- قطعات در مقیاس کوچک ۲- احتمال وارد شدن آلودگی و ناخالصی از بوته
ساخت افزودنی (رسوب گذاری مستقیم لیزری)	۱- آلیاژسازی دقیق ۲- امکان ساخت محصولات با شکل پیچیده	۱- تخلخل و حضور ذرات غیر آلیاژی ۲- اندازه محصول محدود به اندازه محفظه ۳- تنش‌های قابل توجه به علت وجود گرادیان حرارتی
متالورژی پودر (آلیاژسازی مکانیکی)	۱- با این روش همگنی بالایی برای ترکیب آلیاژ به دست می‌آید	۱- نیاز به تجهیزات فشار بالا ۲- تخلخل در قطعه ۳- مصرف بالای انرژی و زمان
ذوب مجدد قوسی در خلاء	۱- سادگی روش ۲- امکان عاری شدن نمونه از ناخالصی‌های گازی	۱- تخییر عناصر با نقطه ذوب پایین ۲- تولید قطعات در مقیاس کوچک

۲- روش تحقیق

۱-۲- راهبرد طراحی آلیاژ آنتروپی بالا رویکرد نظری

$$\delta = 100 \times \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i \left(1 - \frac{r_i}{r}\right)^2} \quad (2)$$

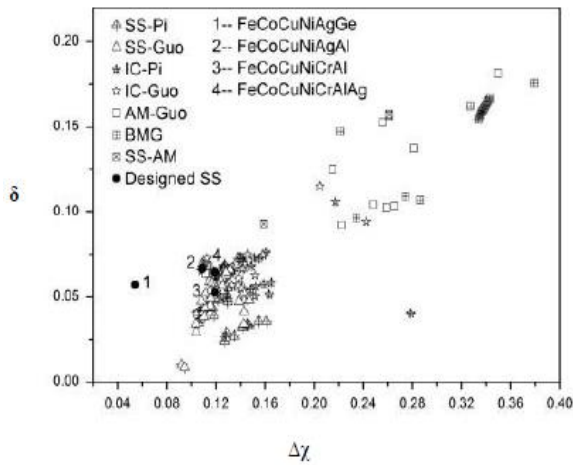
در این روابط  $T_m$ ،  $\Delta S_{mix}$  و  $\Delta H_{mix}$  به ترتیب دمای ذوب متوسط آلیاژ، آنتروپی اختلاط و آنتالپی اختلاط هستند که در رابطه ۳ الی ۵ محاسبه می‌شوند.  $C_i$  و  $C_j$  کسر غلظت اتمی عنصر  $i$ ام و  $j$ ام،  $r_i$  شعاع اتمی عنصر  $i$ ام و  $r$  شعاع متوسط اتمی سیستم مورد بررسی است [۲۰].

$$T_m = \sum_{i=1}^n C_i (T_m)_i \quad (3)$$

$$\Delta S_{mix} = -R \sum_{i=1}^n C_i \ln C_i \quad (4)$$

براساس مبانی ترمودینامیکی و قوانین هیوم روتاری، پیش‌بینی تشکیل فاز محلول جامد در آلیاژهای چند جزئی را می‌توان با استفاده از یکسری پارامترهای ترمودینامیکی و فیزیکی بیان نمود. پارامتر  $\Omega$  بیان کننده نسبت آنتروپی اختلاط به آنتالپی اختلاط است و همچنین پارامتر  $\delta$  نشان‌دهنده اعوجاج شبکه ناشی از اختلاف اندازه‌های اتمی است، مهم‌ترین پارامترها جهت پیش‌بینی تشکیل فاز محلول جامد معرفی شده‌اند [۲۰].

$$\Omega = \frac{T_m \Delta S_{mix}}{|\Delta H_{mix}|} \quad (1)$$



شکل ۲- نمودار اختلاف الکترونگاتیویته پائولینگ در برابر اختلاف اندازه اتمی [۲۱].

۲-۲- سنتز و مشخصه‌یابی

مواد اولیه آلیاژ آنتروپی بالا با شکل ظاهری کلوخه، ورق و پولک و با درصد خلوص بالای ۹۹ درصد اتمی از شرکت ذوب شمیم کالا تهیه شدند که در شکل ۳-الف نشان داده شده است. ابتدا اندازه‌گیری قطعات فلزی به وسیله ترازو GRE-200 شرکت AND با دقت ۰/۰۰۰۱ گرم انجام شد. سپس قطعات فلزی با توجه به جدول ۴ برای کوره ذوب مجدد قوسی تحت خلاء (مدل IR-VAR-1) شرکت فرا ذوب خلاء که در شکل ۳-ب و ج) نشان داده شده است، تهیه شدند و ۵ مرتبه عملیات ذوب انجام شد و در نهایت نمونه دیسکی شکل با وزن حدوداً ۲۰۷ گرم مطابق شکل ۴ به دست آمد. ترکیب شیمیایی دقیق آلیاژ آنتروپی بالا با استفاده از روش طیفسنجی پلاسمای جفت شده القایی (ICP) با مدل 730-ES، شرکت Varian مورد بررسی قرار گرفت. بررسی فازها و ساختار بلوری با استفاده از آزمون پراش اشعه X، با دستگاه PW1730 شرکت PHILIPS انجام شد. متغیرهای این دستگاه پرتو Cu K $\alpha$  با طول موج ۱/۵۴ Å، محدوده آزمایش ۳۵-۸۵ درجه، اندازه و زمان هرگام به ترتیب ۰/۰۵ درجه و ۱ ثانیه انتخاب شد. تحلیل و رسم نمودار در نرم افزارهای Xpert و Origin Pro انجام شد. با استفاده از رابطه ۱۰ پارامتر ثابت شبکه فازهای مشخص شده محاسبه شد.

$$\alpha = \left(\frac{\lambda^2}{4} \times \frac{s}{\sin^2\theta}\right)^{1/2} \quad (10)$$

در این رابطه،  $\alpha$  پارامتر ثابت شبکه،  $\lambda$  طول موج بر حسب آنگستروم،  $S$  مجموع اندیس‌های میلر و  $\theta$  زاویه براگ است. به منظور بررسی مورفولوژی و ریز ساختار آلیاژ آنتروپی بالای تولید

$$\Delta H_{mix} = \sum_{i=1, i \neq j}^n 4C_i C_j \Delta H_{mix}^{AB} \quad (5)$$

به طور تجربی مشخص شده است که برای تشکیل محلول جامد در آلیاژهای آنتروپی بالا، مقدار  $\Omega$  بیش‌تر از ۱/۱، مقدار  $\delta$  کمتر از ۱۳/۳۸ J/mol.K و  $-20 \text{ kJ/mol} \leq \Delta H_{mix} \leq 5 \text{ kJ/mol}$ ،  $\Delta S_{mix} \geq [20]$ . پارامترهای دیگری نیز برای پیش‌بینی تشکیل فاز محلول جامد هستند که به ترتیب عبارت‌اند از: غلظت الکترون ظرفیتی (VEC)، اختلاف الکترونگاتیویته پائولینگ  $\Delta\chi_p$  و  $\Lambda$  که در رابطه‌ی ۶ تا ۸ نشان داده شده است. چگالی آلیاژ آنتروپی بالا ( $\rho$ ) نیز با استفاده از رابطه ۹ به دست می‌آید. در این رابطه،  $C_i$  کسر اتمی عنصر  $i$ ،  $A_i$  وزن اتمی عنصر  $i$  و  $\rho_i$  چگالی عنصر  $i$  است [۱۹-۲۱].

$$VEC = \sum_{i=1}^n C_i (VEC)_i \quad (6)$$

$$\Delta\chi_p = \sqrt{\sum_{i=1}^n C_i (X_i - \bar{X})^2} \quad (7)$$

$$\Lambda = \frac{\Delta S_{mix}}{\delta^2} \quad (8)$$

$$\rho = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{\sum_{i=1}^n C_i A_i / \rho_i} \quad (9)$$

نوع محلول جامد بر اساس VEC در جدول ۲ و محلول جامد تک‌فاز یا چند فاز در جدول ۳ بر اساس  $\Lambda$  مشخص شده است. همچنین  $\Delta\chi_p$  در شکل ۲ بیان می‌کند که اغلب محلول‌های جامد چند فاز در پایین شکل، سمت چپ این نمودار قرار گرفتند که نشانگر این است که محلول جامد تمایل به تشکیل در شرایط  $\delta$  و  $\Delta\chi_p$  کم‌تر دارد [۲۰-۲۳].

جدول ۲- پیش‌بینی شبکه کریستالی محلول جامد بر اساس مقدار پارامتر

VEC [۲۲]

مقدار VEC	$6/87 \leq VEC \leq 8$	$6/87$ $VEC \leq$	$VEC \geq 8$
فاز کریستالی	BCC + FCC	BCC	FCC

در تعیین فازهای محتمل در آلیاژهای ۸ جدول ۳- نقش مقدار پارامتر

آنتروپی بالا [۲۳]

$\Lambda > 0/96$	$0/24 \leq \Lambda \leq 0/96$	$\Lambda < 0/24$
محلول جامد تک‌فاز	محلول جامد دو فاز	ترکیبات بین‌فلزی

<sup>2</sup>Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES)

<sup>1</sup>Valance Electron Concentration (VEC)



شکل ۳- مراحل آماده‌سازی آلیاژ آنتروپی بالا، (الف) مواد اولیه (آلومینیوم، کبالت، کروم، آهن و نیکل)، (ب) کوره ذوب قوسی در خلاء و (ج) شماتیک فرآیند ذوب مجدد قوسی در خلاء (VAR).

جدول ۴- محاسبه درصد وزنی ساخت آلیاژ آنتروپی بالا AlCoCrFeNi

عناصر	درصد اتمی (%)	وزن اتمی (گرم بر مول)	واحد جرم اتمی	درصد وزنی (%)	درصد وزنی (۱۰۰ گرم)	قالب نهایی
Al	۲۰	۲۶/۹۸۱	۵۳۰/۶۳۱	۰/۱۰۶۹	۱۰/۶۹ + ۱۰٪	+ ۱۰٪ ۲۱/۹۲
Co	۲۰	۵۸/۹۳۳	۱۱۷۸/۶۶۴	۰/۲۳۳۴	۲۳/۳۴	۴۷/۸۷
Cr	۲۰	۵۱/۹۹۶	۱۰۳۹/۹۲۲	۰/۲۰۶	۲۰/۶	۴۲/۲۳
Fe	۲۰	۵۵/۸۴۵	۱۱۱۶/۹	۰/۲۲۱۲	۲۲/۱۲	۴۵/۳۶
Ni	۲۰	۵۸/۶۹۳	۱۱۷۳/۸۶۸	۰/۲۳۲۴	۲۳/۲۴	۴۷/۶۷



شکل ۴- آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi ساخته شده به روش (VAR)

شده، از میکروسکوپ نوری مدل NEOPHOT 32 شرکت CARL ZEISS JENA و میکروسکوپ الکترونی روبشی VEGA3 شرکت TESCAN استفاده شد. نمونه‌ها توسط محلول  $HCl:HNO_3:H_2O = 3:1:8$  مدت زمان ۱ تا ۳ دقیقه و فاصله زمانی ۸ تا ۱۲ ثانیه حکاکی شد. ترکیب شیمیایی و توزیع عناصر نیز با تفکیک انرژی پرتو X (EDS) و MAP انجام شد. همچنین با استفاده از نرم افزار MIP CLOUD شرکت نهادین پردازان آسیا درصد فازی مشخص شد. با استفاده از نرم افزار IMAGE J نسخه FIGI اندازه‌گیری دندریت و بازوهای دندریتی ۳ مرتبه و مقیاس‌گذاری بر روی تصاویر میکروسکوپ نوری و الکترونی روبشی انجام شد. به منظور بررسی سختی ویکرز نمونه آلیاژ آنتروپی بالا از دستگاه UV1 شرکت KOOPA با نیروی اعمالی ۱ kg و زمان بارگذاری نیرو ۱۵ s استفاده شد، آزمون ۵ مرتبه اندازه‌گیری شد و نتایج یک بار تکرار شد.

## ۳- نتایج و بحث

می‌شود. مشخص شده است که محلول‌های جامد در آلیاژهای آنتروپی بالا در شرایط زیر شکل می‌گیرند [۲۵، ۲۴، ۲۰]:

$$-20 \text{ kJ/mol} \leq \Delta H_{\text{mix}} \leq 5 \text{ kJ/mol}$$

$$1\% \leq \delta \leq 6/6\%$$

$$\Delta S_{\text{mix}} \geq 13/38 \text{ J/mol.K}$$

بر اساس نتایج ذکر شده در جدول ۶ و همچنین توضیحات اشاره شده، آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi شرایط تشکیل محلول جامد را دارد. همچنین بر طبق مقدار VEC محاسبه شده و پارامترهای مختلفی که در بخش دوم به آن اشاره شده است و همچنین جدول ۲ و ۳، از نظر تئوری ایجاد ساختار دو فازی محتمل به نظر می‌رسد.

جدول ۵-  $\Delta H_{ij}^{\text{mix}}$  برای زوج‌های هم‌امی ترکیبی AlCoCrFeNi [۲۵]

Al	Co	Cr	Fe	Ni	$\Delta H_{ij}^{\text{mix}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right)$
	-۱۹	-۱۰	-۱۱	-۲۲	Al
		۰	-۱	-۴	Co
			-۷	-۱	Cr
				-۲	Fe
					Ni

## ۳-۲- آنالیز عنصری ICP

از این روش برای تعیین ترکیب شیمیایی آلیاژهای آنتروپی بالا، در کارهای مختلف استفاده شده است [۲۶، ۲۷]. ترکیب شیمیایی آلیاژ آنتروپی بالا با استفاده از آزمون ICP مورد بررسی قرار گرفت و نتایج آنالیز ICP به صورت درصد وزنی در جدول ۷ گزارش شد و با محاسبات تئوری که در جدول ۴ آمده است از مطابقت نزدیکی برخوردار است که نشان دهنده آن است که آلیاژ آنتروپی بالا بدون نقص ساخته شده است.

در این بخش ابتدا به بررسی محاسبات پارامترهای ترمودینامیکی پرداخته خواهد شد. سپس نتایج به دست آمده از آزمون‌ها و آنالیزهای XRD، JCP، تصاویر میکروسکوپ نوری و SEM و آزمون سختی‌سنجی مورد تحلیل و تفسیر قرار خواهند گرفت.

## ۳-۱- محاسبه پارامترهای ترمودینامیکی آلیاژ آنتروپی بالای

## AlCoCrFeNi

به منظور بررسی معیارهای تشکیل آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi تغییرات آنتالپی زوج‌های هم‌امی در جدول ۵ ارائه شده است و نتایج پارامترهای اشاره شده در بخش روش تحقیق، در جدول ۶ نشان داده شده است. بر طبق قانون هیوم-روتیری، دو فاکتور وجود دارند که ممکن است بر روی شکل‌گیری محلول جامد در آلیاژها تاثیر داشته باشند. فاکتور اول به تاثیرات ابعادی اتم‌های تشکیل دهنده مربوط است. برای آلیاژهایی که تفاوت در شعاع اتمی آن‌ها بیش از ۱۵ درصد باشد، تشکیل محلول جامد جانشینی غالباً غیرمحتمل است. فاکتور دوم، سازگاری شیمیایی اجزاء است که به معنای تفاوت در الکترونگاتیویته یا آنتالپی اختلاط است. هرچه اختلاف در الکترونگاتیویته بیشتر باشد یا آنتالپی اختلاط کم‌تر، احتمال بیش‌تری وجود دارد که اجزای آلیاژ به جای ایجاد محلول‌های جامد، ترکیبات شیمیایی تشکیل دهند [۲۴، ۲۰].

در آلیاژهای آنتروپی بالا، اجزاء اصلی بیش‌تری نسبت به آلیاژهای معمول وجود دارد. لذا اتم‌های تشکیل دهنده با تشکیل محلول جامد، احتمال یکسانی برای اشغال مکان‌های شبکه کریستالی خواهند داشت. در این خصوص شاید بتوان هر کدام از اتم‌های آلیاژهای آنتروپی بالا را به عنوان یک اتم ماده حل شده در نظر گرفت. در این مورد، ساختار محلول جامد دارای اعوجاج شدید شبکه کریستالی است که به علت اختلاف زیاد شعاع اتمی در بین اجزاء رخ می‌دهد. لذا از این جهت ساختار آلیاژ آنتروپی بالا را نسبت به ساختار فلزات خالص و آلیاژهای متداول متفاوت می‌سازد. بنابراین از قوانین اصلاح شده هیوم-روتیری برای پیش‌بینی تشکیل محلول‌های جامد نامنظم جانشینی استفاده

جدول ۶- محاسبه پارامترهای آلیاژهای آنتروپی بالا AlCoCrFeNi

$\rho \text{ (g/cm}^3\text{)}$	$\Lambda \left( \frac{\text{J}}{\text{mol.K}} \right)$	$\Delta \chi_{\text{Pauling}}$	VEC	$\delta \text{ (\%)}$	$T_m \text{ (}^\circ\text{C)}$	$\Omega$	$\Delta H_{\text{mix}} \left( \frac{\text{kJ}}{\text{mol}} \right)$	$\Delta S_{\text{mix}} \left( \frac{\text{J}}{\text{mol.K}} \right)$	آلیاژ آنتروپی بالا
۶/۷۲	۰/۴۰۲	۰/۱۲۰	۷/۲	۵/۷۶۶	۱۴۱۱/۰۶۴	۱/۸۲۹	-۱۲/۳۲	۱۳/۳۸	AlCoCrFeNi

۳-۴- ریزساختار  $\text{AlCoCrFeNi}$ 

شکل ۶-الف، تصویر میکروسکوپ نوری از آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{AlCoCrFeNi}$  را در بزرگنمایی  $25 \times$  نشان می‌دهد. در آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{AlCoCrFeNi}$ ، ساختار گلبرگی از تفکیک دانه‌ها به دو ناحیه دندریتی و بین دندریتی تشکیل شده است که ساختار متداول این آلیاژها در حالت ریختگی است [۱۹، ۲۹، ۳۰]. بر اساس پژوهش سایر محققین، رسوبات عناصر  $\text{Al-Ni}$  و  $\text{Cr-Fe}$  در دو ناحیه دندریتی و بین دندریتی جدایش پیدا کرده است [۳۱، ۳۲]. طبق شکل ۶-ب که درصد فازی از مناطق دندریتی و بین دندریتی را در بزرگنمایی‌های  $25 \times$  و  $200 \times$  آلیاژ آنتروپی بالا  $\text{AlCoCrFeNi}$  است، مقدار ناحیه دندریتی  $51/9 - 54/7$  درصد و ناحیه بین‌دندریتی  $45/3 - 48/1$  درصد است.

تشکیل نواحی دندریتی و بین‌دندریتی و گلبرگی شکل در آلیاژهای آنتروپی بالا در فرآیند ذوب مجدد قوسی در حلال توسط انجماد غیرتعدالی، جدایش عناصر و گرادیان‌های حرارتی بالا ایجاد می‌شود. سرعت سرد شدن سریع از رسیدن آلیاژ به تعادل جلوگیری می‌کند و در نتیجه ساختارهای دندریتی ایجاد می‌شود، همچنین گرادیان‌های حرارتی بالا باعث رشد دندریتی شده و می‌تواند تنش پسماند در آلیاژ ایجاد کند. مکانیزم‌های هسته‌زایی و رشد در طول انجماد به ریزساختار ایجاد شده در آلیاژ کمک می‌کند [۲۱، ۲۴، ۲۷، ۳۰، ۳۱]. در جدول ۹ اندازه دندریت‌ها با خط سبز و بازوهای دندریتی با خط زرد مشخص شده است و به صورت میانگین محاسبه و نشان داده شده است. شکل ۷-الف و ب، تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی از ساختار گلبرگی شکل آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{AlCoCrFeNi}$  را در بزرگنمایی‌های مختلف و آشکارگرهای  $\text{SE}$  و  $\text{BSE}$  نشان می‌دهد. نواحی دندریتی و بین دندریتی به طور کامل مشخص شدند و

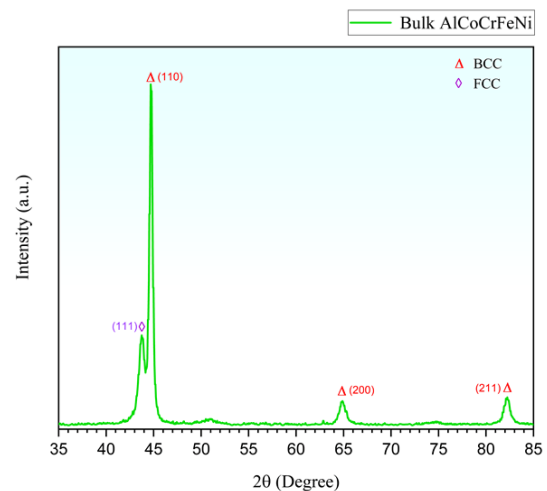
نتایج حاصل از میکروسکوپ نوری را تایید می‌کنند. همان‌طور که در بخش تصاویر میکروسکوپ نوری گفته شد بر اساس نتایج به دست آمده توسط سایر محققین [۳۱، ۳۳، ۳۴] به رسوبات عناصر  $\text{Al-Ni}$  و  $\text{Fe-Cr}$  اشاره شده است. به منظور بررسی نتیجه گزارش شده، از آنالیز  $\text{EDS}$  و  $\text{MAP}$  استفاده شد که در شکل ۷-ج و جدول ۱۰ نتایج آنالیز عنصری  $\text{EDS}$  از نواحی دندریتی و بین دندریتی مشخص شده است و در شکل ۸ توزیع همگن عناصر مشخص شده است. در ناحیه دندریتی مقدار  $\text{Al}$  و  $\text{Ni}$  و در ناحیه بین دندریتی مقدار  $\text{Fe}$  و  $\text{Cr}$  نسبت به عناصر دیگر بیش‌تر است.  $\text{Co}$  نیز به صورت یکنواخت در این دو ناحیه تقسیم شده است. یکی از عوامل اصلی جدایش به خاطر اختلاف آنتالپی تشکیل ( $\Delta H_{ij}^{mix}$ ) دوتایی عناصر است. با افزایش اختلاف آنتالپی

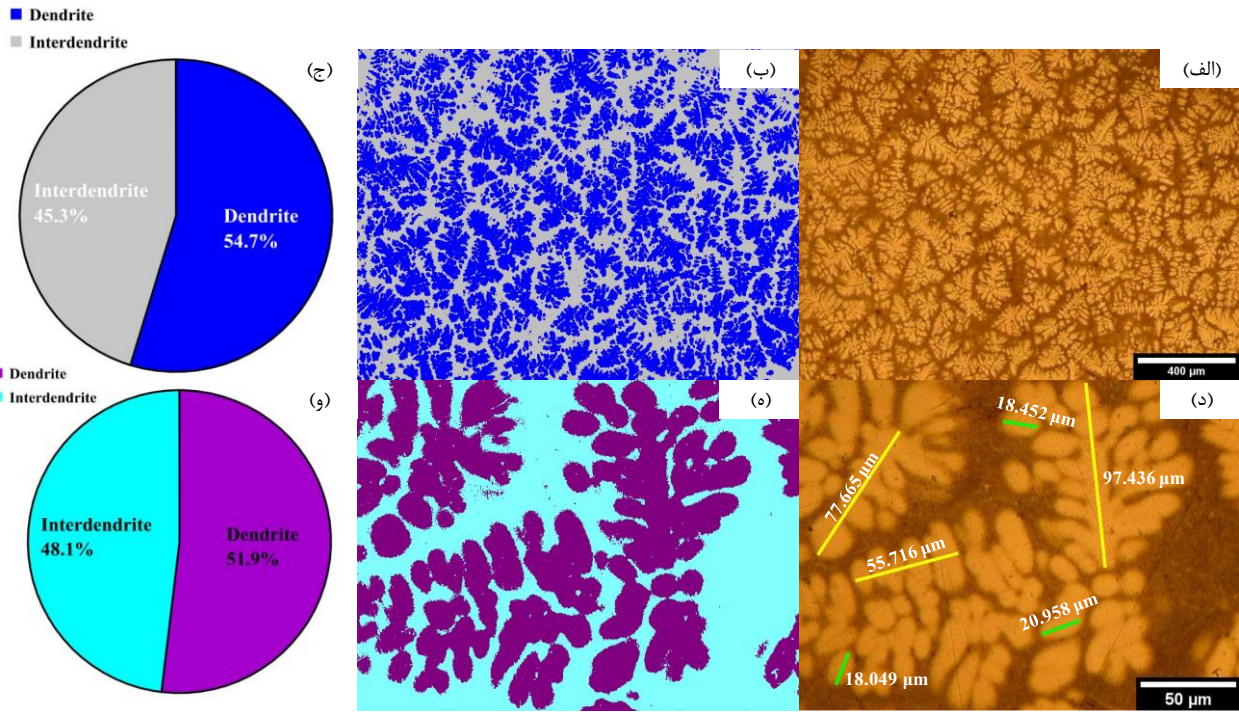
جدول ۷- ترکیب شیمیایی آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{AlCoCrFeNi}$ 

عنصر	Al	Co	Cr	Fe	Ni
درصد وزنی (ICP)	۱۱/۴	۲۳/۴	۲۰/۴	۲۰/۹	۲۳/۷
درصد وزنی (تئوری)	۱۱/۷۶	۲۳/۳۴	۲۰/۶	۲۲/۱۲	۲۳/۲۴

۳-۳- آنالیز فازی پراش اشعه X ( $\text{XRD}$ )

شکل ۵ الگوی پراش اشعه ایکس آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{AlCoCrFeNi}$  را که توسط ریخته‌گری در قالب مسی و انجماد سریع به دست آمده است را نشان می‌دهد. طبق شکل ۵، پیک‌های مربوط به فازهای  $\text{BCC}$  و  $\text{FCC}$  ایجاد شده است. پارامتر ثابت شبکه با استفاده از رابطه ۱۰ برای فازهای موجود در شکل ۵ محاسبه شد. همچنین درصد فازهای  $\text{FCC}$  و  $\text{BCC}$  نیز در جدول ۸ نشان داده شده است. طبق نتایج سایر محققین، آلومینیوم در آلیاژ  $\text{Al}_x\text{CoCrFeNi}$  یک عنصر پایدار کننده فاز  $\text{BCC}$  بوده و کاهش آن پایداری فاز  $\text{FCC}$  را افزایش داده است. عنصر کروم نیز نقشی تقریباً ضعیف‌تر در پایدار کردن فاز  $\text{FCC}$  دارد، در صورتی که آهن، کبالت و نیکل پایدار کننده فاز  $\text{FCC}$  هستند [۲۸]. تفاوت در فازهای شناسایی شده در این پژوهش و پژوهش محققان دیگر که در مقدمه به آن اشاره شد، ناشی از اختلاف در نرخ حرارت‌دهی و سرمایش متفاوت در فرآیند است، به این صورت که نرخ سرمایش متفاوت منجر به تشکیل و یا عدم تشکیل برخی از فازها شده است. بر اساس آنالیزی که با نرم‌افزار  $\text{Xpert}$  انجام شد فاز  $\text{BCC}$  غنی از آهن و فاز  $\text{FCC}$  غنی از آلومینیوم است.

شکل ۵- الگوی  $\text{XRD}$  آلیاژ آنتروپی بالای  $\text{AlCoCrFeNi}$



شکل ۶- تصاویر میکروسکوپ نوری و درصد فازی مناطق دندریتی و بین دندریتی، (الف، ب، ج) بزرگنمایی x 25 و (د، ه، و) بزرگنمایی x 200.

جدول ۸- محاسبات پارامتر ثابت شبکه

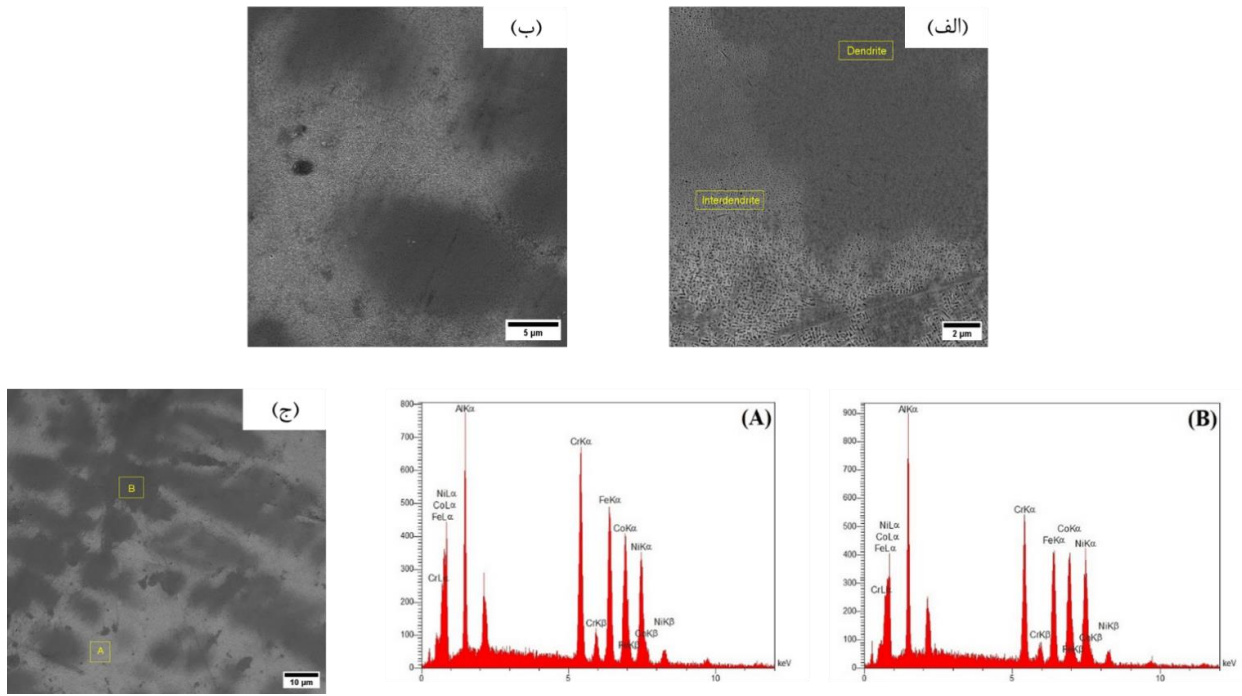
$\lambda$ (Å)	Miller Indices			S	Bragg's Angle		$\text{Sin}^2(\theta)$	Ratio		$\alpha$ (Å)	Avg.	Phase	%
	h	k	l		$h^2+K^2+l^2$	$2\theta$		$\theta$	$\lambda^2/4$				
Cu $K_{\alpha}$	1	1	1	3	43.79	21.89	0.139	0.593	21.57	3.578	3.578	FCC	~7.318
	1	1	0	2	44.73	22.36	0.14	0.593	13.81	2.862	2.868	BCC	~20.907
	2	0	0	4	64.89	32.44	0.28	0.593	13.89	2.871			
	2	1	1	6	82.21	41.10	0.43	0.593	13.88	2.869			

جدول ۹- اندازه‌گیری دندریتها و بازوهای دندریتی در بزرگنمایی x ۲۰۰ بر اساس تصویر میکروسکوپ نوری

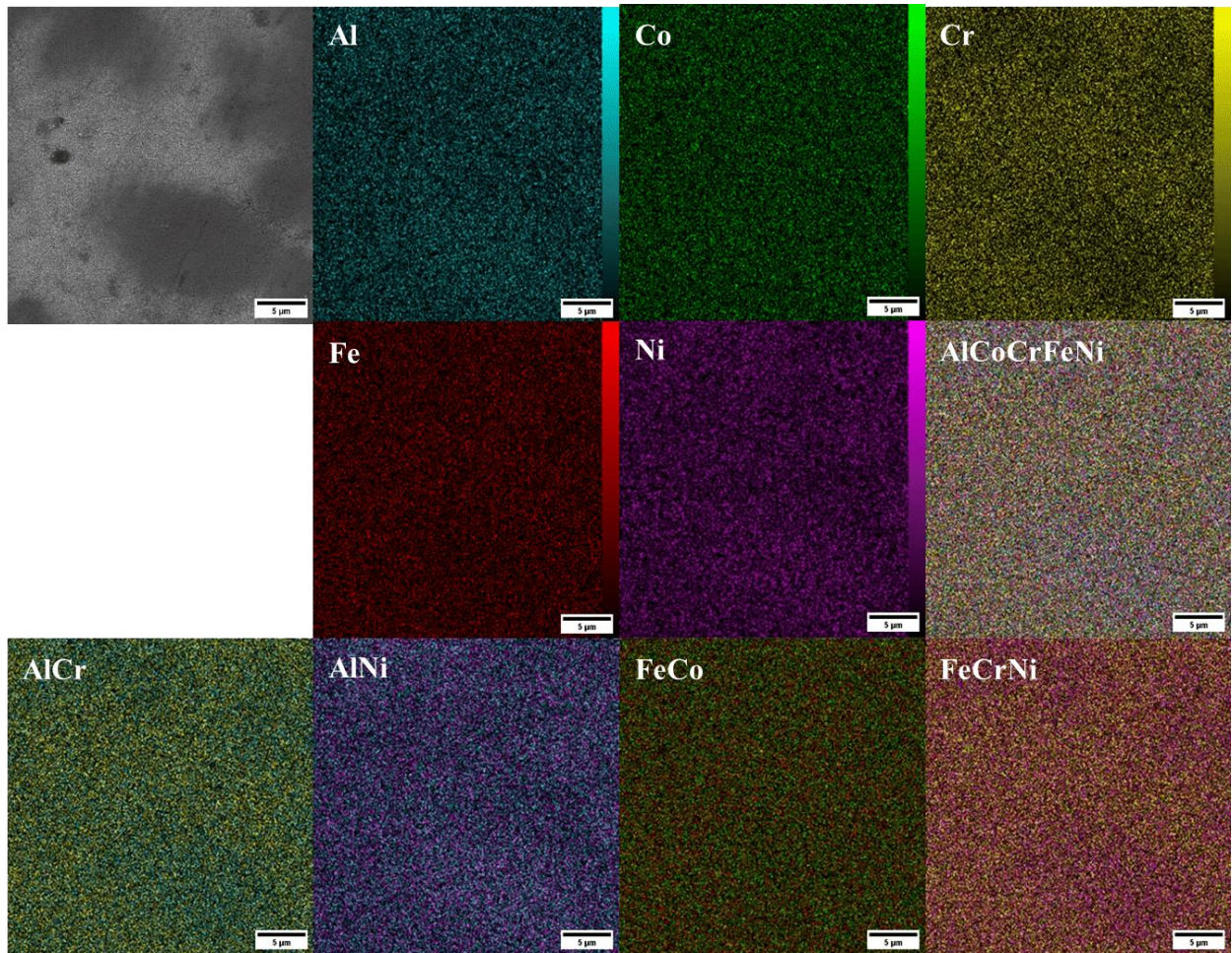
مرتب	۱	۲	۳	میانگین	عدم قطعیت (۹۵٪)
دندریتها (μm)	۲۰/۹۵۸	۱۸/۰۴۹	۱۸/۴۵۲	۱۹/۱۵۳	± ۲/۸۹۳
بازوهای دندریتها (μm)	۹۷/۴۳۶	۵۵/۷۱۶	۷۷/۶۶۵	۷۶/۹۳۹	± ۳۸/۳۱۴

جدول ۱۰- ترکیب شیمیایی عناصر در نواحی دندریتی و بین دندریتی

ترکیب شیمیایی (at. %)					ناحیه
Ni	Fe	Cr	Co	Al	
۱۳/۰۸	۱۷/۸۲	۲۲/۵۸	۱۵/۶۸	۳۰/۸۵	بین دندریتی (A)
۱۷/۱۷	۱۵/۰۳	۱۵/۴۹	۱۵/۶۹	۳۶/۶۲	دندریتی (B)



شکل ۷- تصاویر SEM آلیاژ آنتروپی بالا AlCoCrFeNi، (الف) آشکارگر SE با بزرگنمایی 10 kx، (ب) آشکارگر BSE با بزرگنمایی 3 kx و (ج) آشکارگر SE با بزرگنمایی 1000 x.



شکل ۸- تصویر SEM با آشکارگر BSE با بزرگنمایی 3kx به همراه آنالیز عنصری نقشه‌ای (MAP) و توزیع یکنواخت عناصر.

## ۳-۵- سختی سنجی

جدول ۱۱ مقدار سختی آلیاژ آنتروپی بالا بر حسب ویکرز نشان می‌دهد. مقدار سختی از قسمت‌های مختلف سطح نمونه (۵ مرتبه) گرفته شد و میانگین آن محاسبه شد. مقدار سختی به صورت میانگین ۵۰۵ ویکرز گزارش شد. شان و همکاران [۳۳]، به بررسی اثر کروم در آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCr<sub>x</sub>FeNi در (x = 0.3, 0.5, 0.7, 1) پرداختند، در مقدار 498 HV (x=1) گزارش کردند. علت اختلاف سختی به دست آمده در این پژوهش، به خاطر تشکیل فاز BCC احتمال داده شده است. همچنین در جدول ۱۲ به بررسی نقش عناصر آلیاژ آنتروپی بالا AlCoCrFeNi در سختی به دست آمده اشاره شده است. سختی آلیاژ آنتروپی بالا AlCoCrFeNi می‌تواند در محدوده‌ی HV ۳۵۰-۵۸۵ باشد که بستگی به ترکیب آلیاژ و روش‌های ساخت دارد که منجر به ریزساختار دو فازی، تک‌فازی به همراه ترکیبات بین‌فلزی می‌شود [۲۴، ۳۳، ۳۴].

تشکیل عناصر با یکدیگر، احتمال جدایش عناصر افزایش پیدا می‌کند. در جدول ۵ آنتالپی تشکیل دوتایی عناصر تشکیل دهنده آلیاژ AlCoCrFeNi نشان داده شده است، مشاهده می‌شود که آنتالپی تشکیل دوتایی آلومینیوم با عناصر، منفی‌تر از حالت‌های دوتایی دیگر است. این نشان‌گر آن است که آلومینیوم احتمالاً با شدت بیش‌تری نسبت به عناصر دیگر جدایش پیدا می‌کند. از طرفی مشاهده می‌شود که آنتالپی تشکیل دوتایی Al-Ni و Al-Co نسبت به حالت‌های دیگر منفی‌تر است. پس علت جدایش عناصر Al و Ni در ناحیه دندریتی و Fe و Cr در ناحیه بین دندریتی می‌تواند به علت اختلاف آنتالپی تشکیل باشد [۲۴، ۳۲]. جدایش‌های اشاره شده و همچنین چگونگی پراکندگی عناصر در آنالیز MAP و تصاویر شکل ۸ به صورت جداگانه، دوتایی، سه تایی و کل نشان داده شده است.

جدول ۱۱- سختی آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi بر حسب HV

مرتب	۱	۲	۳	۴	۵	میانگین	عدم قطعیت (٪۹۵)
سختی (HV)	۴۹۰	۵۲۳	۵۰۶	۴۹۸	۵۰۸	۵۰۵	±۱۴/۱۶۹

جدول ۱۲- تاثیر عناصر در سختی آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi

عناصر	تاثیر در سختی	مکانیزم	توضیحات
آلومینیوم	سختی آلیاژ را به مقدار قابل توجهی افزایش می‌دهد	اتم‌های آلومینیوم باعث می‌شوند که حرکت نابجایی را کند می‌کنند	تشکیل فاز BCC که از فاز FCC سخت‌تر است
کبالت	تاثیر متوسطی در سختی دارد	اتم‌های کبالت به اعوجاج شبکه کمک می‌کنند که مانع حرکت نابجایی‌ها می‌شوند	فاز FCC را تثبیت می‌کند که سختی کم‌تری نسبت به فاز BCC دارد
کروم	افزایش سختی در آلیاژ آنتروپی بالا	اتم‌های کروم باعث انحراف در شبکه کریستالی شده و مقاومت در برابر حرکت نابجایی را افزایش می‌دهند	تشکیل فاز BCC که از فاز FCC سخت‌تر است
آهن	تاثیر متوسط در سختی	اثرگذاری در اعوجاج شبکه و افزایش سختی	تثبیت فاز FCC
نیکل	تاثیر متوسط در سختی	مانع حرکت نابجایی در آلیاژ	تثبیت فاز FCC

- [10] Kuncce I, Polanski M, Karczewski K, Plocinski T, Kurzydowski K. Microstructural characterisation of high-entropy alloy AlCoCrFeNi fabricated by laser engineered net shaping. *Journal of Alloys and Compounds*. 2015, 648,751-758.
- [11] Fu Z, Chen W, Chen Z, Wen H, Lavernia EJ. Influence of Ti addition and sintering method on microstructure and mechanical behavior of a medium-entropy Al<sub>0.6</sub>CoNiFe alloy. *Materials Science and Engineering, A*. 2014, 619, 137-145.
- [12] Ji W, Fu Z, Wang W, Wang H, Zhang J, Wang Y, et al. Mechanical alloying synthesis and spark plasma sintering consolidation of CoCrFeNiAl high-entropy alloy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2014, 589, 61-66.
- [13] Elmi F, Valipour E, Ghasemi S. Synthesis of anticorrosion nanohybrid films based on bioinspired dopamine, L-cys/CNT@ PDA through self-assembly on 304 stainless steel in 3.5% NaCl. *Bioelectrochemistry*. 2019, 126,79-85.
- [14] Cieslak J, Tobola J, Berent K, Marciszko M. Phase composition of Al<sub>x</sub>FeNiCrCo high entropy alloys prepared by sintering and arc-melting methods. *Journal of Alloys and Compounds*. 2018, 740, 264-72.
- [15] Qiu X-W. Microstructure and properties of AlCrFeNiCoCu high entropy alloy prepared by powder metallurgy. *Journal of Alloys and Compounds*. 2013, 555, 246-9.
- [16] Sreeramagiri P, Alrehaili H, Wu X, Dinda G, Balasubramanian G. Comparison of laser deposition methods for the synthesis of Al<sub>x</sub>CoCrFeNi multi-principal element alloy. *Journal of Materials Research and Technology*. 2022, 19, 1090-101.
- [17] Wang X, Guo W, Fu Y. High-entropy alloys: emerging materials for advanced functional applications. *Journal of Materials Chemistry A*. 2021, 9(2) 663-701.
- [18] Huang M, Wang C, Cui H, Zhang W, Zhang C. Investigation of the structure and properties of AlCrCuFeNiV<sub>x</sub> high-entropy alloys. *Vacuum*. 2020, 173, 109129.
- [19] Zhang Y, Ma S, Qiao J. Morphology transition from dendrites to equiaxed grains for AlCoCrFeNi high-entropy alloys by copper mold casting and Bridgman solidification. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2012, 43, 2625-30.
- [۲۰] وردی پ، آلیاژهای آنتروپی بالا به زبان ساده - ویرایش دوم، جهاد دانشگاهی واحد صنعتی اصفهان، اصفهان، ۱۴۰۲.
- [21] Ji X. Relative effect of electronegativity on formation of high entropy alloys. *International Journal of Cast Metals Research*. 2015, 28(4) 229-33.
- [22] George EP, Raabe D, Ritchie RO. High-entropy alloys. *Nature reviews materials*. 2019, 4(8), 515-34.
- [23] Poletti MG, Battezzati L. Electronic and thermodynamic criteria for the occurrence of high entropy alloys in metallic systems. *Acta Materialia*. 2014, 75, 297-306.
- [24] Gromov VE, Konovalov SV, Ivanov YF, Osintsev K. *Structure and properties of high-entropy alloys*: Springer, 2021.
- [25] Takeuchi A, Inoue A. Classification of bulk metallic glasses by atomic size difference, heat of mixing and period of constituent elements and its application to characterization of the main alloying element. *Materials transactions*. 2005, 46(12) 2817-29.
- [26] Tanada D, Lyth SM, Ishikawa K, Miyajima Y. Deposition of high entropy alloy sub-surface films on metal substrates via DC magnetron sputtering with a CoCrFeMnNi target. *Applied physics letters*. 2024, 124(15).

#### ۴- نتیجه‌گیری

طراحی و مشخصه‌یابی آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi با استفاده از روش ذوب مجدد قوسی در خلاء انجام شد. محاسبات ترمودینامیکی نشان داد که این آلیاژ در محدوده‌ی تشکیل محلول جامد و دارای ساختار دو فازی BCC+FCC است. سپس آزمون‌های مشخصه‌یابی انجام شد و نتایج زیر به دست آمد: درصد وزنی به دست آمده از آزمون ICP، با درصد تئوری محاسبه شده، مطابقت داشت. نتایج آزمون XRD نشان داد که آلیاژ از دو فاز BCC+FCC تشکیل شده است و پارامتر ثابت شبکه Å ۲/۸۶۸ برای فاز (BCC) و Å ۳/۵۷۸ برای فاز (FCC) محاسبه شد. تصاویر میکروسکوپ نوری و SEM ساختار گلبرگی و نواحی دندردیتی و بین دندردیتی را نشان دادند و بر اساس آنالیز EDS و MAP جدایش Al-Ni و Fe-Cr مشاهده شد، همچنین توزیع و پراکندگی عناصر به صورت یکنواخت در تصاویر MAP پخش شدند. برای آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi مقدار میانگین سختی ۵۰۵ HV محاسبه شد.

#### ۵- مراجع

- [1] Yeh JW, Chen SK, Lin SJ, Gan JY, Chin TS, Shun TT, et al. Nanostructured high-entropy alloys with multiple principal elements: novel alloy design concepts and outcomes. *Advanced engineering materials*. 2004, 6(5) 299-303.
- [2] Gopal P, Soorya Prakash K, Kavimani V, Rajendiran G. [Retracted] Processing and Properties of AlCoCrFeNi High Entropy Alloys: A Review. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2022, 2022(1) 1190161.
- [3] Zhang Y, Zuo TT, Tang Z, Gao MC, Dahmen KA, Liaw PK, et al. Microstructures and properties of high-entropy alloys. *Progress in materials science*. 2014, 61, 1-93.
- [4] Shiratori H, Fujieda T, Yamanaka K, Koizumi Y, Kuwabara K, Kato T, et al. Relationship between the microstructure and mechanical properties of an equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy fabricated by selective electron beam melting. *Materials Science and Engineering: A*. 2016, 656, 39-46.
- [5] Chou H-P, Chang Y-S, Chen S-K, Yeh J-W. Microstructure, thermophysical and electrical properties in Al<sub>x</sub>CoCrFeNi (0 ≤ x ≤ 2) high-entropy alloys. *Materials Science and Engineering: B*. 2009, 163(3) 184-9.
- [6] Lu Y, Dong Y, Guo S, Jiang L, Kang H, Wang T, et al. A promising new class of high-temperature alloys: eutectic high-entropy alloys. *Scientific reports*. 2014, 4(1) 6200.
- [7] Gao K, Liu D, Sun D, Gao Y, Wang Z, An L. Microstructure and properties of AlCoCrNiFe high-entropy alloy sintered by hot oscillating pressing. *Intermetallics*. 2023, 154,107802.
- [8] Joseph J, Hodgson P, Jarvis T, Wu X, Stanford N, Fabijanic DM. Effect of hot isostatic pressing on the microstructure and mechanical properties of additive manufactured Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high entropy alloys. *Materials Science and Engineering, A*. 2018, 733, 59-70.
- [9] Li M, Gazquez J, Borisevich A, Mishra R, Flores KM. Evaluation of microstructure and mechanical property variations in Al<sub>x</sub>CoCrFeNi high entropy alloys produced by a high-throughput laser deposition method. *Intermetallics*. 2018, 95, 110-118.

- [27] Senkov ON, Isheim D, Seidman DN, Pilchak AL. Development of a refractory high entropy superalloy. *Entropy*. 2016, 18(3) 102.
- [28] Yeh J-W. Alloy design strategies and future trends in high-entropy alloys. *Jom*. 2013, 65, 1759-71.
- [29] Murty BS, Yeh J-W, Ranganathan S, Bhattacharjee PP. *High-entropy alloys*: Elsevier, 2019.
- [30] Zhang X, Liu L, Yao K, Duan K, Wu F, Zhao R, et al. The phase composition characteristics of AlCoCrFeNi high entropy alloy heat-treated by simple normalizing treatment and its effects on mechanical properties. *Journal of Alloys and Compounds*. 2022, 926, 166896.
- [31] Manzoni A, Daoud H, Völkl R, Glatzel U, Wanderka N. Phase separation in equiatomic AlCoCrFeNi high-entropy alloy. *Ultramicroscopy*. 2013, 132, 212-5.
- [۳۲] عباسیان وردین ن، سعید ت، اکبری ع، اثر حرارت ورودی بر ریزساختار آلیاژ آنتروپی بالای AlCoCrFeNi روکش دهی شده با روش جوشکاری قوسی تنگستن با گاز محافظ (GTAW)، چهارمین کنفرانس بین المللی جوشکاری و آزمایش های غیرمخرب و بیست و دومین کنفرانس ملی جوش و بازرسی و یازدهمین کنفرانس ملی آزمایش های غیرمخرب، ۱۴۰۰، ۱-۱۱.
- [33] Shun T-T, Hung W-J. Effects of Cr Content on Microstructure and Mechanical Properties of AlCoCrFeNi High-Entropy Alloy. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018, 2018(1) 5826467.
- [34] Kumar A, Arora A, Chandraker R, Rao KR, Chopkar M, editors. Effect of silicon addition on AlCoCrFeNi high entropy alloys prepared by vacuum arc melting. *AIP Conference Proceedings*, 2020, AIP Publishing.



IRANIAN FOUNDRYMEN'S  
SOCIETY

## Founding Research Journal

*Research Paper:*

### High-Entropy Alloy AlCoCrFeNi: Study and Investigation of the Microstructure of the Alloy Produced by Vacuum Arc Remelting Process

Alireza Zeinali <sup>1</sup>, Hamid Khorsand <sup>2\*</sup>

1. M.Sc. Student, Faculty of Materials Science and Engineering, KN Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

2. Associate Professor, Faculty of Materials Science and Engineering, KN Toosi University of Technology, Tehran, Iran.

\* Corresponding author: hkhorsand@kntu.ac.ir

#### Paper history:

Receive Date: 14 August 2024  
Revise Date: 27 September 2024  
Accept Date: 11 October 2024

#### Keywords:

High Entropy Alloy,  
Vacuum Arc Remelting,  
Advanced Materials,  
Petal like,  
Dendritic.

#### Abstract:

High entropy alloys (HEAs) represent a novel class of advanced materials, characterized by the inclusion of at least five and up to thirteen alloying elements in near-equiatomic or equiatomic ratios. These materials have garnered significant attention from researchers in recent years due to their unique properties. Among the various methods for producing HEAs, the vacuum arc remelting (VAR) technique stands out for its ability to precisely control the melting process and rapidly solidify the melt, resulting in superior microstructural homogeneity compared to traditional casting methods. This research aims to produce a homogeneous and uniform chemical composition of the high entropy alloy AlCoCrFeNi using the VAR process. The study investigates the microstructure, elemental distribution, phase composition, and hardness of the alloy through a combination of optical microscopy, scanning electron microscopy, X-ray diffraction, inductively coupled plasma spectroscopy, and hardness testing. The findings reveal that the AlCoCrFeNi HEA forms a solid solution with a dual-phase BCC+FCC structure. Additionally, a petal-like morphology with dendritic and interdendritic regions was observed in the micrographs. The MAP analysis images demonstrated a uniform distribution and dispersion of the constituent elements. The experimentally determined weight percentages of the elements closely matched the theoretical values. The lattice parameters for the BCC and FCC phases were calculated to be 2.868 Å and 3.578 Å, respectively. The hardness of the bulk AlCoCrFeNi HEA was measured to be 505 Vickers.

#### Please cite this article using:

Alireza Zeinali, Hamid Khorsand, High-Entropy Alloy AlCoCrFeNi: Study and Investigation of the Microstructure of the Alloy Produced by Vacuum Arc Remelting Process, in Persian, Founding Research Journal, 2025, 9(1) 5-17.

DOI: 10.22034/frj.2024.470403.1199

Journal homepage: [www.foundingjournal.ir](http://www.foundingjournal.ir)