

## Investigation of the effect of Semi-solid stir casting on the microstructure, mechanical properties and wear resistance of Mg-6%Si alloy

Teymor Fazelifar<sup>1</sup>, Sayyed Hassan Nourbakhsh<sup>2\*</sup>, Mahdi Raiesi<sup>3</sup>

1- M. Sc student, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2- Associate professor, Department of Mechanical Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran.

2- Assistance professor, Department of Material Engineering, Shahrekord University, Shahrekord, Iran

\*Corresponding Author: P.O.B. 8818634141 Shahrekord, Iran, [Nourbakhsh.sh@sku.ac.ir](mailto:Nourbakhsh.sh@sku.ac.ir)

### Abstract

Magnesium is one of the lightest structural metals, increasing its strength is always considered. In the present study, Mg-6%Si alloy was casted using the stir casting process at three temperatures of 790, 770, and 750 degrees Celsius in a semi-solid state, and then the melt was subjected to a pressure of 110 MPa until complete solidification. Also, in order to compare the results and observe the effects of semi-solid casting conditions, a sample was cast without stirring and at temperature of 800 degrees Celsius. The microstructure, compressive strength, hardness and wear resistance of the samples were determined and evaluated. The results of the microstructure analysis showed that semi-solid casting leads to a change in the microstructure from dendritic to spherical; The best conditions were related to the sample with casting temperature of 770°C, in this sample the dendritic structure was almost eliminated and a quasi-spherical structure was created. The results showed that in the optimal sample, the compressive strength and hardness increased by 17.5 and 42%, respectively, and the friction coefficient decreased by 7% in comparison with the sample which was casted in non-semi-solid state.

### Keywords

Semi-solid casting, Magnesium, Stir casting, compressive strength, wear.

## تأثیر ریخته گری اغتشاشی نیمه جامد بر ریزساختار، خواص مکانیکی و مقاومت سایشی آلیاژ Mg-6%Si

تیمور فاضلی فرا<sup>۱</sup>، سید حسن نوربخش<sup>۲\*</sup>، مهدی ریسی<sup>۳</sup>

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۲- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

۳- استادیار، مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه شهرکرد، شهرکرد

\* شهرکرد، صندوق پستی ۸۸۱۸۶۳۴۱۴۱، Nourbakhsh.sh@sku.ac.ir

## چکیده

منیزیم یکی از سبکترین فلزات سازه ای می باشد که افزایش مقاومت آن همواره مورد توجه می باشد. در پژوهش حاضر آلیاژ Mg-6%Si با استفاده از فرآیند ریخته گری اغتشاشی در سه دمای ۷۹۰، ۷۷۰ و ۷۵۰ درجه سانتیگراد در حالت نیمه جامد ریخته گری و سپس مذاب تحت فشار ۱۱۰ مگاپاسکال تا زمان انجماد کامل قرار گرفت. همچنین جهت مقایسه نتایج و مشاهده تأثیرات شرایط ریخته گری نیمه جامد، یک نمونه به صورت معمولی (بدون همزدن و در دمای ۸۰۰ درجه سانتیگراد) ریخته گری شد. ریزساختار، مقاومت فشاری، سختی و مقاومت سایشی نمونه ها تعیین و مورد ارزیابی قرار گرفتند. نتایج تحلیل ریزساختار نشان دادند که ریخته گری نیمه جامد منجر به تغییر ریزساختار از حالت دندردیتی به کروی می شود؛ بهترین شرایط مربوط به نمونه با دمای ریخته گری ۷۷۰°C بود، در این نمونه ساختار دندردیتی تقریباً حذف و ساختاری شبه کروی ایجاد شد. نتایج آزمون های نشان دادند که در نمونه بهینه، مقاومت فشاری و سختی به ترتیب ۱۷/۵ و ۴۲ درصد افزایش و ضریب اصطکاک ۷ درصد کاهش را نسبت به نمونه ریخته گری شده در شرایط غیر نیمه جامد نشان دادند.

## کلمات کلیدی

نیمه جامد، منیزیم، ریخته گری اغتشاشی، مقاومت فشاری، سایش

نام نویسنده مسئول: سیدحسن نوربخش

ایمیل نویسنده مسئول: [Nourbakhsh.sh@sku.ac.ir](mailto:Nourbakhsh.sh@sku.ac.ir)

تاریخ ارسال مقاله: ۱۴۰۳/۰۸/۱۸

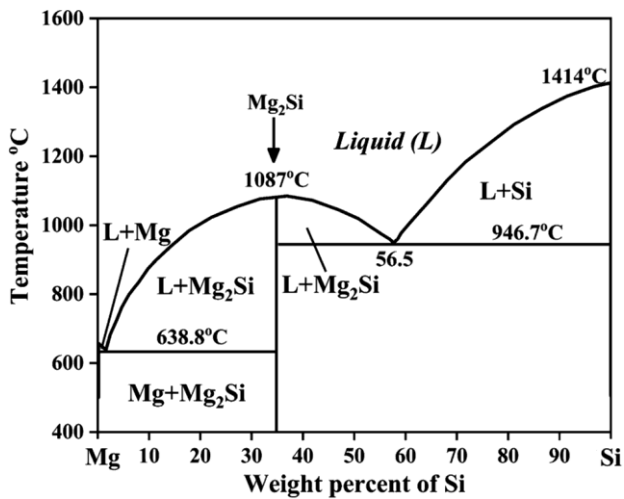
تاریخ(های) اصلاح مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۱

تاریخ پذیرش مقاله: ۱۴۰۳/۰۹/۰۳

## ۱- مقدمه

بسیاری از عناصر آلیاژی مذاب بین بازوهای دندردیتی حبس شوند و چون غلظت عناصر آلیاژی در نقاط مختلف مذاب متفاوت می شود، در نهایت خواص مکانیکی قطعه تضعیف می گردد. خرد کردن بازوهای دندردیتی سبب ریز شدن دانه ها و در نهایت توزیع بهتر عناصر آلیاژی و دستیابی به خواص مکانیکی بالاتر در ماده می شود. روش ریخته گری نیمه جامد همراه با همزدن مذاب یکی از فرآیندهایی است که با کاهش بازوهای دندردیتی باعث بهبود خواص مکانیکی و متالورژیکی قطعه می گردد [۶]. آغاز شکل دهی نیمه جامد فلزات به اوایل دهه ۱۹۷۰ بر می گردد؛ در آن زمان اسپنسر و فلمینگز از موسسه فناوری ماساچوست (MIT) موفق شدند معضل انجماد دندردیتی را برطرف و به ساختاری کروی دست یابند [۷، ۸]. آنها دریافتند که هم زدن مذاب در حین خنک کردن آن از حالت مایع تا محدوده دمایی نیمه جامد، باعث حصول ریزساختاری کروی و غیردندردیتی می شود [۹]. از این رو فرآیند ریخته گری نیمه جامد فلزات را می توان ریخته گری آلیاژها بین دماهای لیکوئیدوس و سالیدوس دانست؛ که این فرآیند متکی به رفتار تیکسوتروپیک آلیاژهای فلزی است [۷، ۸]. یعنی هنگامی که مواد برش داده شوند جریان می یابند، اما در موقع سکون غلیظ می شوند [۱۰]. به عبارتی در ریخته گری نیمه جامد فلزات، یک آلیاژ به شکل دوغاب دارای ذرات جامد تقریباً کروی معلق در یک زمینه مایع، به درون قالب تزریق می شود [۱۱]. به دلیل ریزساختار منحصر به فردی که در شکل دهی نیمه جامد حاصل می شود، می توان به خواص مکانیکی بسیار خوبی دست

منیزیم (Mg) با وزن مخصوص ۱/۸ g/cm<sup>3</sup> سبکترین ماده ساختاری است؛ بیش از چهار برابر سبک تر از فولاد و ۱/۵ برابر سبک تر از آلومینیم می باشد [۱]. به همین دلیل افزایش مقاومت مکانیکی و استفاده از آن در سازه ها مورد توجه ویژه محققان قرار گرفته است. جهت افزایش مقاومت مکانیکی منیزیم، افزودن عناصر و بکارگیری روشها و فرآیندهای مورد توجه ویژه محققین قرار گرفته است. تعدادی از این فرآیندها در حالت جامد قرار دارند که می توان به عنوان نمونه به فرآیند اصطکاک اغتشاشی اشاره نمود [۲] و تعدادی دیگر از این فرآیندها در حالت مذاب قرار دارند که می توان به عنوان نمونه به فرآیند ریخته گری اغتشاشی [۳] اشاره نمود. در فرآیند ریخته گری اغتشاشی مذاب قبل از ریخته گری توسط پره هایی با سرعت دورانی خاصی همزده و دچار تلاطم قرار می گیرد. این فرآیند به طور ویژه برای افزودن عناصر به مذاب مورد استفاده قرار می گیرد، کومار و سولومون [۴] با استفاده از این فرآیند نانوذرات B<sub>4</sub>C را به آلیاژ LM30 افزودند، آنها نشان دادند که افزودن ۱٪ نانوذرات با این روش می تواند به طور یکنواخت در ماده توزیع شود و مقاومت مکانیکی ماده افزایش یابد. همچنین می توان به تحقیق سورندران و همکاران [۵] اشاره نمود که با این روش عناصر میکرو AL<sub>2</sub>O<sub>3</sub> را به آلیاژ AZ91 افزودند و کارایی این روش را در افزودن ذرات به آلیاژ نشان دادند. بجز تعداد کمی از آلیاژها که حالت انجماد خمیری دارند، بقیه آلیاژها، حالت انجماد دندردیتی دارند؛ و همین امر سبب می شود تا



شکل ۱ دیاگرام فازی تعادلی Mg-Si

لازم به ذکر است که به منظور عدم تماس اکسیژن با سطح منیزیم مذاب و جلوگیری از اکسیداسیون و سوختن آلیاژ، در طول فرآیند گاز آرگون با دبی  $5\text{ L/min}$  بر روی سطح آلیاژ تزریق شد. همچنین جهت مقایسه نتایج و تاثیرات ریخته گری نیمه جامد، یک نمونه تحت ریخته گری معمولی قرار گرفت. شماتیک دستگاه مورد استفاده در شکل 2 نشان داده شده است.



شکل 2 دستگاه ریخته گری اغتشاشی تحت گاز خنثی

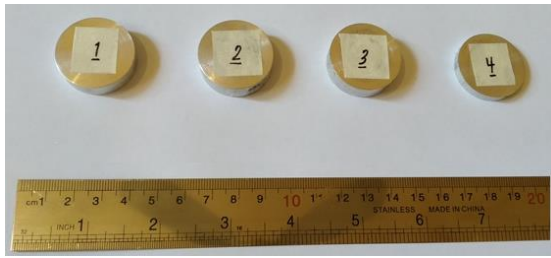
در جدول ۱ شرایط مربوط به نمونه های مختلف و همچنین در شکل 3 شماتیک مربوط به نمونه های ریخته گری شده قابل مشاهده می باشند.

یافت [۱۲]. بارتکس<sup>۱</sup> و همکاران [۱۳] تأثیر کسر جامد بر ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ Mg-Al-La-Ca را مورد بررسی قرار دادند. آزمایش های آنها به وسیله همزن مکانیکی با کسرهای جامد  $0.61$  و  $0.49$  و  $fs = 0.30$  در  $950\text{ rpm}$  به مدت ۱۰ دقیقه انجام شد. لی<sup>۲</sup> و همکاران [۱۴] به پردازش نیمه جامد آلیاژ منیزیم AZ91D با استفاده پرداختند. آنها جهت تحریک دوغاب از یک همزن مکانیکی استفاده نمودند و تاثیر نرخ برش بر ریزساختارهای منجمد دوغاب نیمه جامد را بررسی کردند. همچنین یک نمونه ریخته گری معمولی نیز از آلیاژ فوق، جهت مقایسه تهیه نمودند. رائی<sup>۳</sup> و همکاران [۱۵] با به کارگیری فرآیند ریخته گری اغتشاشی توانستند کامپوزیت زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات کاربرد بور (B4C) را تولید و تاثیر سرعت و زمان هم زدن را بر ریزساختار و خواص مکانیکی آن، ارزیابی کردند. آشوک و همکاران [16] با استفاده از فرآیند ریخته گری اغتشاشی ذرات SiC را به آلومینیوم AL8011 در سه سرعت مختلف و زمانهای همزدن مختلف پرداختند، آنها نتیجه گیری کردند که سرعت دورانی ۴۰۰ درو بر دقیقه و زمان همزن ۱۵ دقیق بهترین نتایج را ارائه می کند. دو<sup>۴</sup> و همکاران [۱۷] ریزساختار و خواص مکانیکی آلیاژ منیزیم AZ91D تهیه شده توسط ریخته گری نیمه جامد تحت فشار<sup>۵</sup> (SSDC) را ارزیابی نمودند. آنها پس از تهیه دوغاب نیمه جامد با میزان کسر حجمی جامد مد نظر ( $fs = 0.15$ )، بلافاصله دوغاب را به غلاف تزریق ماشین ریخته گری تحت فشار محافظه سرد، انتقال داده و دوغاب را به درون قالب تزریق نمودند. نوگروهو<sup>۶</sup> و همکاران [۱۸] اقدام به ساخت و بررسی خواص مکانیکی کامپوزیت های زمینه آلومینیومی تقویت شده با ذرات کاربرد سلیسیم با به کارگیری فرآیند استیرکستینگ نیمه جامد نمودند. فرآیند هم زدن به صورت مکانیکی توسط یک پروانه سرامیکی با زاویه تیغه  $45^\circ$  در سرعت دورانی  $600\text{ rpm}$  و به مدت  $15\text{ min}$  انجام شد.

مذاب منیزیم تمایل به اکسیداسیون و سوختن دارد، مگر اینکه در محافظت از سطح آن دقت شود. از این رو محافظت از آلیاژ مذاب با استفاده از یک فلاکس یا یک پوشش گاز محافظ جهت مانع شدن و عدم تماس اکسیژن ضروری است [۱۹]. از اینرو تحقیقات انجام شده بر روی ریخته گری منیزیم به گستردگی آلیاژهای دیگر همانند آلومینیوم نیست. همچنین در مورد آلیاژ منیزیم با توجه به کاربرد گسترده آن در صنعت و تاثیر افزودن عنصر Si به آن در حالت نیمه جامد تحقیقات اندک می باشد. بنابراین در این تحقیق به بررسی اثر افزودن عنصر Si و ریخته گری آن در حالت نیمه جامد تحت فشار پرداخته شد. آلیاژ Mg-6%Si پس از ذوب در بالای دمای لیکوئیدوس، تحت همزدن با سرعت  $720$  دور بر دقیقه تا نیمه جامد سرد شد و سپس عملیات ریخته گری انجام و مذاب تا انجماد کامل تحت فشار قرار گرفت و در نهایت خواص مکانیکی، متالورژی و سایش نمونه ها بررسی شدند.

### روش تجربی

در پژوهش حاضر از منیزیم با خلوص  $99/99\%$  و سلیسیم با خلوص  $99/99\%$  برای ساخت آلیاژ Mg-6%Si استفاده شد. شکل 1 دیاگرام فازی تعادلی Mg-Si را نشان می دهد. بر اساس این دیاگرام، این آلیاژ دارای دمای لیکوئیدوس تعادلی حدود  $806$  درجه سانتی گراد است. در این تحقیق، ریخته گری نمونه ها در ناحیه نیمه جامد در سه دمای مختلف  $790$ ،  $770$  و  $750^\circ\text{C}$  انجام شد. درصد جامد تعادلی در این سه دما با استفاده از قانون اهرم به ترتیب حدود  $15$ ،  $25$  و  $35$  درصد محاسبه شد. روش انجام فرایند به این صورت بود که ابتدا نمونه ها تا بالای دمای لیکوئیدوس حرارت داده شدند، سپس همزدن مذاب آغاز و تا دمای نیمه جامد ادامه یافت و در نهایت فلز نیمه جامد به درون قالب فلزی ریخته گری و کوبش دوغاب توسط جک هیدرولیکی انجام پذیرفت.



شکل ۵. نمونه های سایش

جدول ۱ متغیرهای مربوط به نمونه های مختلف

شماره نمونه	دمای ریخته گری	سرعت همزدن
۱	۸۸۰	-
۲	۷۹۰	۷۲۰
۳	۷۷۰	۷۲۰
۴	۷۵۰	۷۲۰



شکل ۶. شماتیک دستگاه سایش

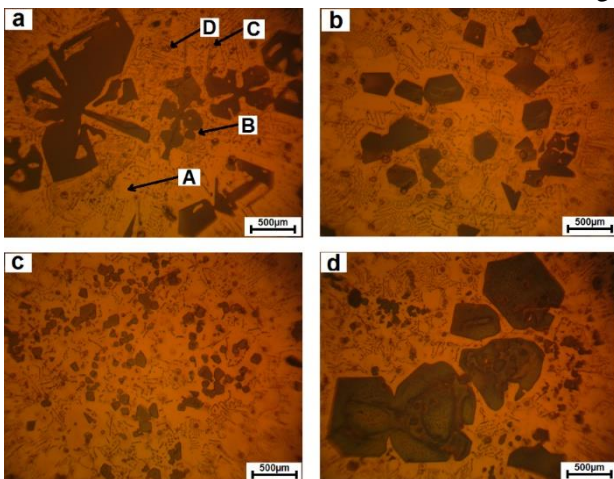


شکل ۳. نمونه های ریخته گری شده

### نتایج و بحث

#### 1-3- متالوگرافی و سختی

شکل 6 تصویر متالوگرافی سطح نمونه های ریخته گری شده را نشان می دهد. شکل 7-a تصویر ریزساختار نمونه شماره ۱ (ریخته گری عادی) را نشان می دهد، ریزساختار آلیاژ در این حالت متشکل از زمینه  $\alpha$ -mg بوده که حاوی منیزیم است و با نماد A مشخص گردیده است. نماد B نمایانگر ذرات درشت دندریتی  $Mg_2Si$  (سیلیسید منیزیم) می باشد. نماد C نشانگر ذرات پونکتیک  $Mg_2Si$  و نماد D بیانگر وجود تخلخل می باشد. چنانچه در تصویر مشاهده می شود، ذرات  $Mg_2Si$  کاملاً دندریتی بوده و بازوهای درشت دندریتی به وضوح مشخص هستند.



شکل ۷. تصاویر ریزساختاری؛ (a) نمونه اول (ریخته گری معمولی در دمای  $880^{\circ}C$ )، (b) نمونه دوم (ریخته گری نیمه جامد در دمای  $790^{\circ}C$ )، (c) نمونه سوم (ریخته گری نیمه جامد در دمای  $770^{\circ}C$ )، (d) نمونه چهارم (ریخته گری نیمه جامد در دمای  $750^{\circ}C$ )

شکل 7-b تصویر ریزساختار نمونه دوم را نشان می دهد. همانطور که در

به منظور بررسی ریزساختار نمونه ها و انجام متالوگرافی، ابتدا قسمتی از نمونه ها بریده و سطح مقطع آنها توسط سنباده های شماره ۱۰۰ تا ۳۰۰۰ سنباده زنی و سپس توسط پالیش نرم به میزان مورد نیاز پالیش شدند. در مرحله بعد سطح مقطع نمونه ها توسط محلول نایتال ۲٪ (۲ میلی لیتر اسید نیتریک در ۹۸ میلی لیتر اتیل الکل) به مدت ۷ ثانیه اچ گردید. جهت به دست آوردن میزان سختی نمونه ها از آزمون سنجی ماکرو ویکرز با نیروی ۱۰۰N استفاده شد. به منظور تعیین خواص فشاری نمونه ها از آزمون فشار استفاده گردید. بدین ترتیب نمونه ها به صورت استاندارد با نسبت طول به قطر ۱/۵ (طول ۱۵mm و قطر ۱۰mm) با تolerانس ابعادی  $\pm 0.1mm$  توسط ماشین تراش، تراشکاری شدند. آزمون در دمای محیط و با سرعت ۱mm/min صورت گرفت. لازم به ذکر است که هر آزمون بر روی سه نمونه ی یکسان انجام پذیرفت. جهت بررسی خواص سایشی و اصطکاکای نمونه ها از آزمون پین روی دیسک مطابق با استاندارد ASTM G99 استفاده گردید. پین مورد استفاده جهت سایش، به صورت استاندارد و از جنس فولاد بلرینگ ۵۲۱۰۰ به قطر ۵mm، ارتفاع ۵۰mm، سختی ۴۴HRC، زبری سطح  $0.05\mu m$  و شعاع سر پین (عرق چین) ۱۰mm تهیه گردید و دیسک از جنس نمونه ها با قطر ۳۰mm و ضخامت ۸mm ساخته شد. در شکل 4 و 5 نمونه های فشار و سایش نشان داده شده اند و در شکل 6 دستگاه سایش مورد استفاده نشان داده شده است.



شکل ۴. نمونه های فشار

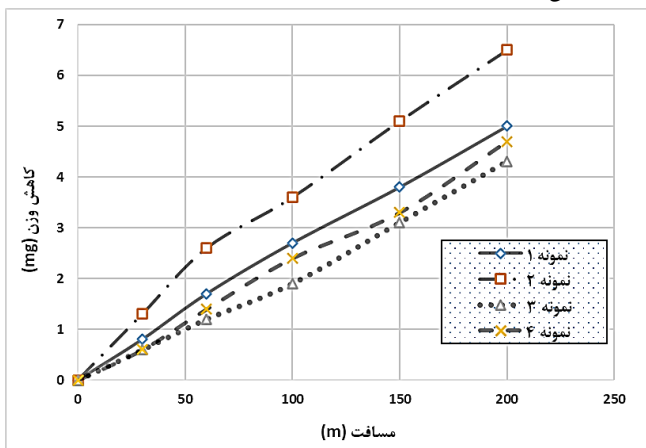
**جدول ۲** مقادیر ازدیاد طول و استحکام نهایی نمونه های مختلف

نمونه	نمونه	نمونه	نمونه	
شماره ۱	شماره ۲	شماره ۳	شماره ۴	
۰/۸	۰/۸۴	۰/۸۴	۰/۷۹	ازدیاد طول (%)
۲۰۰	۱۹۰	۲۳۵	۲۱۰	استحکام نهایی MPa

همانطور که در جدول ۲ مشاهده می گردد استحکام نهایی در نمونه شماره ۳ به میزان ۱۷/۵ درصد افزایش و در نمونه ۲ به مقدار ۵ درصد کاهش یافته است. این افزایش استحکام در نمونه ۳ را که منطبق با نتایج متالوگرافی و سختی است را می توان ناشی از ریزساختار نمونه دانست. همانطور که در بخش 1-3 ذکر گردید، در نمونه فوق ذرات Mg<sub>2</sub>Si از حالت دندریتی و چند وجهی خارج شده و به صورت شبه کروی ریز در آمده اند و همچنین توزیع تقریباً یکنواختی را در زمینه تشکیل داده اند که همین عوامل سبب گشته اند تا استحکام فشاری افزایش یابد. ریزساختار و خواص مکانیکی قطعات تولیدی متأثر از اندازه ذرات جامد می باشد. اثبات شده است که ریز بودن اندازه ذرات جامد اولیه، کمک شایانی به بهبودی خواص مکانیکی می کند [۱۳]. جهت دستیابی به خواص مکانیکی مطلوب باید ریزساختار از حالت دندریتی به کروی تبدیل شود، بنابراین نوع آلیاژ و سیستم همزن دو پارامتر برای تعیین زمان مناسب هم زدن و دستیابی به ساختار کروی می باشند. بنابراین با انتخاب مناسب پارامترهای فرآیند ریخته گری نیمه جامد می توان به قطعاتی با مقاومت مکانیکی مناسب دست یافت.

### ۳-۳- سایش

سایش یکی از معضلات صنعت بوده که باعث از کار افتادگی قطعات شده و در نهایت تخریب سازه را در پی خواهد داشت. به همین منظور جهت تعیین خواص سایشی و ضریب اصطکاک نمونه های مختلف، آزمون های سایش توسط نیروی ۶۰۰g انجام پذیرفتند. در شکل 10 نتایج مربوط به کاهش وزن نمونه های مختلف نشان داده شده است.

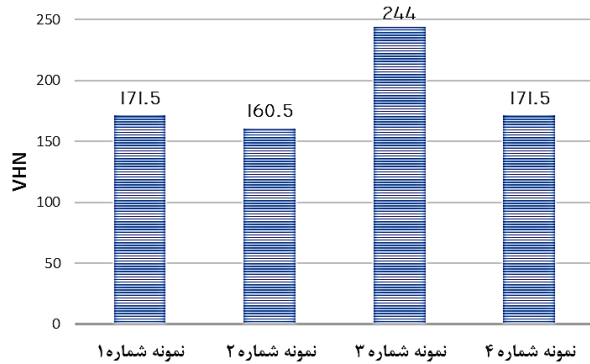


**شکل ۱۰.** نمودار کاهش وزن نمونه های مختلف

چنانچه در شکل 10 مشاهده می شود بیشترین مقاومت به سایش مربوط به نمونه شماره ۳ می باشد؛ مقاومت سایشی بالای نمونه مذکور را می توان ناشی از مورفولوژی ریزساختار آن دانست؛ همانگونه که در بخش ۳-۳ مشاهده گردید در نمونه فوق ذرات Mg<sub>2</sub>Si مورفولوژی شبه کروی ریز به خود گرفته اند، همچنین به طور یکنواخت تری در زمینه α-mg، توزیع شده اند. از طرفی نمونه

تصویر پیداست بازوهای دندریتی ذرات Mg<sub>2</sub>Si تحت تاثیر هم زدن، شکسته شده و ذرات از حالت دندریتی خارج و مورفولوژی چند وجهی و غیردندریتی به خود گرفته اند و به طور غیر یکنواخت در زمینه α-mg توزیع شده اند. چنانچه مشهود است دمای ریخته گری و زمان هم زدن به میزان کافی نبوده و همین امر سبب گشته تا تنها بازوهای دندریتی در هم شکسته شوند و فرم چند وجهی به خود بگیرند. شکل c تصویر ریزساختار نمونه سوم را نشان می دهد چنانچه در شکل مشاهده می شود، ذرات Mg<sub>2</sub>Si تحت تاثیر زمان هم زدن بیشتر و دمای پایین تر، از حالت دندریتی و چند وجهی خارج گردیده و مورفولوژی شبه کروی ریز به خود گرفته اند؛ همچنین توزیع یکنواخت تری از ذرات نیز مشاهده می شود. شکل d تصویر ریزساختار نمونه چهارم را نشان می دهد، چنانچه در تصویر مشهود است ذرات Mg<sub>2</sub>Si، مجدداً از حالت دندریتی و چند وجهی خارج شده اند؛ ولی در نمونه ی حاضر به شکل ذرات کروی درشت در آمده اند و با یک توزیع غیریکنواختی در زمینه قرار گرفته اند. درشتی کره ها ناشی از زمان هم زدن طولانی تر می باشد؛ هرچه زمان هم زدن بیشتر شود، اندازه گلبول ها نیز افزایش می یابد و به دلیل پدیده گسترش استوالد درشت تر می شوند [۲۰].

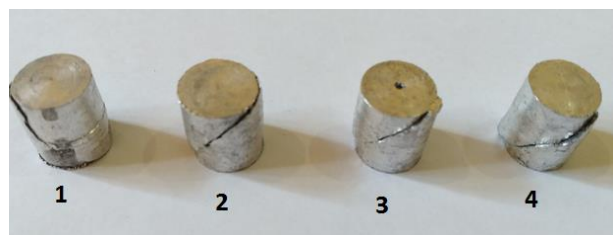
سختی نمونه ها ارتباط مستقیمی با ریزساختار آنها دارد. در شکل 8 مقادیر سختی نمونه های مختلف نشان داده شده است. همانطور که در شکل 8 مشاهده می شود در نمونه اول به دلیل دندریتی بودن ذرات Mg<sub>2</sub>Si، میزان سختی برابر با ۱۷۱/۵HV می باشد. در نمونه دوم به دلیل عدم توزیع یکنواخت ذرات چند وجهی Mg<sub>2</sub>Si، سختی نسبت به قبل کاهش یافته و برابر با ۱۶۰/۵HV می باشد. در سومین نمونه به دلیل شبه کروی، ریز بودن و توزیع تقریباً یکنواخت ذرات Mg<sub>2</sub>Si، سختی نمونه افزایش چشمگیری داشته و به ۲۴۴HV رسیده است؛ به گونه ای که نسبت به نمونه اول با ۴۲/۲۷٪ افزایش همراه بوده است. و در چهارمین نمونه به دلیل درشت شدن ذرات کروی Mg<sub>2</sub>Si و عدم توزیع یکنواخت آنها، سختی نمونه نسبت به نمونه سوم، ۲۹/۳٪ کاهش یافته و برابر با ۱۷۲/۵HV شده است.



**شکل ۸.** مقادیر سختی نمونه های مختلف

### 2-3- مقاومت مکانیکی

در شکل 9 نمونه های فشار بعد از انجام آزمایش قابل مشاهده می باشند. همچنین در جدول ۲ مقادیر مربوط به استحکام نهایی و میزان ازدیاد طول نمونه های مختلف آورده شده است.



**شکل ۹.** تصاویر نمونه ها بعد از انجام آزمایش فشار

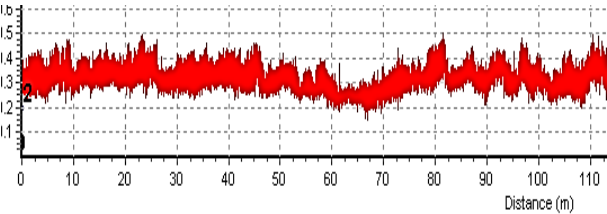
۴۲/۲۷ افزایش یافت.

۳- مقاومت سایشی نمونه ها ارتباط مستقیمی با سختی آنها دارد. با توجه به نتایج آزمون سایش مشخص گردید که بیشترین مقاومت به سایش مربوط به نمونه سوم می باشد که دارای بیشترین مقدار سختی بود. و نمونه دوم که دارای کمترین میزان سختی بود، کمترین مقاومت سایشی را داشت.

#### مراجع:

- Ślęzak, M.J.M., *Study of semi-solid magnesium alloys (with RE elements) as a non-Newtonian fluid described by rheological models*. 2018. **8**(4): p. 222.
- Raeissi, M. and S.H.J.M.R.E. Nourbaksh, *Enhancement of the microstructure homogeneity and mechanical performance of the As-Cast Mg/Mg2Si in-situ composite through friction stir processing*. 2019. **6**(10): p. 1065e7.
- Nourbaksh, S., M. Tavakoli, and M.J.M.R.E. Shahrokhian, *Investigations of mechanical, microstructural and tribological properties of Al2024 nanocomposite reinforced by TiO2 nanoparticles*. 2018. **5**(11): p. 116531.
- P.K., D.K. and D.G. Solomon, *Investigations on microstructure and mechanical properties on LM30-B4C nanocomposites fabricated through ultrasonic-squeeze assisted stir-casting*. *Materials Today Communications*, 2023. **37**: p. 106978.
- Surendran, K.T.S., A. Gnanavelbabu, and K. Rajkumar, *Microstructure and mechanical properties of AZ91D/Al2O3 bimodal composite fabricated through stir-ultrasonic-squeeze casting process*. *Materials Today: Proceedings*, 2021. **45**: p. 7822-7828.
- Spencer, D., et al., *Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range*. 1972. **3**(7): p. 1925-1932.
- Spencer, D., R. Mehrabian, and M.C. Flemings, *Rheological behavior of Sn-15 pct Pb in the crystallization range*. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 1972. **3**(7): p. 1925-1932.
- Rogal, Ł., *Critical assessment: opportunities in developing semi-solid processing: aluminium, magnesium, and high-temperature alloys*. *Materials Science and Technology*, 2017. **33**(7): p. 759-764.
- Modigell, M., A. Pola, and M. Tocci, *Rheological characterization of semi-solid metals: a review*. *Metals*, 2018. **8**(4): p. 245.
- Zhang, X., et al., *Texture evolution in semi-solid partial remelting and its effect on the microstructure of magnesium alloy*. *Materials Letters*, 2019. **237**: p. 141-144.
- Pola, A., M. Tocci, and P. Kapranos, *Microstructure and properties of semi-solid aluminum alloys: a literature review*. *Metals*, 2018. **8**(3): p. 181.
- Hirt, G. and R. Kopp, *Thixoforming: Semi-solid metal processing*. 2009: John Wiley & Sons.
- Bartex, S.L., et al., *Effect of solid fraction on microstructures and mechanical properties of a Mg-Al-La-Ca alloy processed by rheocasting*. *Journal of Alloys and Compounds*, 2019. **776**: p. 297-305.
- Li, D., et al., *Study on the semi-solid rheocasting of magnesium alloy by mechanical stirring*. *Journal of materials processing technology*, 2002. **129**(1-3): p. 431-434.
- Raei, M., M. Panjepour, and M. Meratian, *Effect of stirring speed and time on microstructure and mechanical properties of Cast Al-Ti-Zr-B 4 C composite produced by stir casting*. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 2016. **57**(4): p. 347-360.
- Ashok, N., et al., *Effect of stirring speed and time on the mechanical properties of Al8011-SiC metal matrix composites*. *Materials Today: Proceedings*, 2022. **64**: p. 194-199.
- Du, X. and E. Zhang, *Microstructure and mechanical behaviour of semi-solid die-casting AZ91D magnesium alloy*. *Materials Letters*, 2007. **61**(11-12): p. 2333-2337.
- Nugroho, S. and D.F. Fitriana, *Investigation of Mechanical Properties of Al7Si/SiC and Al7SiMg/SiC Composites Produced by Semi Solid Stir Casting Technique*. in *MATEC Web of Conferences*. 2018. EDP Sciences.
- Luo, A.A., *Magnesium casting technology for structural applications*. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2013. **1**(1): p. 2-22.
- Bartex, S.L.T., L. Schaeffer, and V.K. de Barcellos, *Morphological Evolution of Mg-Al-La-Ca Alloy Induced by a Mechanical Stirring Process*. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2019. **28**(7): p. 3878-3886.

دوم دارای کمترین مقاومت سایشی می باشد. این موضوع در تطابق با نتایج مرتبط با سختی نیز است. آن گونه که نمودار کاهش وزن بر حسب مسافت سایش نشان می دهد، آنچه در مقدار مقاومت در برابر سایش نمونه ها اهمیت داشته مقدار مطلق سختی بوده است [۱۷]. کومار<sup>۷</sup> و همکاران [۱۷] اثبات کردند که در آلیاژهای Mg-Si مقاومت در برابر سایش با افزودن محتوای Si، افزایش یافته می یابد. همان طور که در شکل 10 پیداست نرخ سایش در مسافت های لغزش بالاتر از ۶۰m، روندی صعودی داشته است؛ به گونه ای که در این مسافت ها نمونه با کاهش وزن بیشتری مواجه شده، این روند صعودی در نتیجه افزایش تماس پین با دیسک بوده که منجر به سایش بیشتر دیسک شده است. در شکل 11 نمودار ضریب اصطکاک مربوط به نمونه سوم و در جدول ۳ ضریب اصطکاک تمام نمونه ها آورده شده است.



شکل ۱۱. نمودار ضریب اصطکاک نمونه سوم

جدول ۳ ضریب اصطکاک نمونه های مختلف

نمونه	نمونه	نمونه	نمونه	ضریب اصطکاک
شماره ۱	شماره ۲	شماره ۳	شماره ۴	
۰/۳۵۳	۰/۴۱۲	۰/۳۲۸	۰/۳۵۶	

چنانچه در شکل 11 مشاهده می شود بازه ضریب اصطکاک در مسافت های اولیه، پایین بوده و سپس با افزایش مسافت لغزش، بازه ضریب اصطکاک نیز افزایش می یابد. علت گستردگی بازه ضریب اصطکاک می تواند به دلیل تشکیل حفرات ناشی از کندگی براده های سایش و حذف آنها از روی سطح باشد که در اثر آن سطح ناهموار شده و به این ترتیب ضریب اصطکاک دچار تغییر می شود [۱۷].

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می گردد ضریب اصطکاک نمونه ۳ از دیگر نمونه ها کمتر شده است که این موضوع در همخوانی با نتایج ذکر شده در قسمتهای قبل است.

#### نتیجه گیری و جمع بندی

در پژوهش حاضر آلیاژ Mg-6%Si به منظور بهبود ریزساختار، افزایش خواص مکانیکی و خواص تریبولوژیکی تحت ریخته گری نیمه جامد قرار گرفت. نتایج حاصل به شرح زیر است:

- ریخته گری نیمه جامد منجر به تغییر ریزساختار از حالت دندردیتی شده و ریزساختار را به سمت کروی شدن سوق می دهد. بهترین ریزساختار مربوط به نمونه سوم یعنی نمونه ای که در دمای ۷۷۰°C ریخته گری شده بود می باشد؛ به طوری که ذرات Mg<sub>2</sub>Si به صورت شبه کروی ریز تبدیل شده و به صورت تقریباً یکنواختی در زمینه -αMg، توزیع شده بودند.
- ریخته گری نیمه جامد می تواند منجر به افزایش سختی آلیاژ گردد. بالاترین مقدار سختی مربوط به نمونه سوم بود و سختی نمونه مذکور برابر با ۲۴۴HV شد. به گونه ای که نسبت به نمونه اول به میزان

