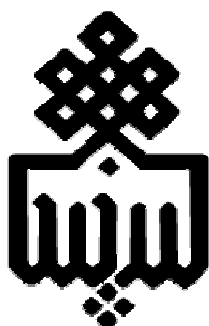


بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه بیرجند  
دانشکده مهندسی

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک – ساخت و تولید

مطالعه و بررسی برشکاری شیشه توسط فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده

جواد عاشوری

استاد راهنما:

دکتر حسین امیرآبادی

پاییز ۱۳۹۰

## تأییدیه هیات داوران

(برای پایان نامه)

یک نسخه اصل فرم مربوطه

## تقديم

تشر و قدر دانی

## چکیده

شیشه از جمله موادی است که به علت پایداری شیمیایی و شفافیت به وفور در علوم مهندسی استفاده می‌گردد و می‌تواند بسیاری از مشکلاتی را که مهندسان با آن درگیر هستند را حل نماید. شیشه در شرایطی که نمی‌توان از پلاستیک و فلزات استفاده کرد به کار می‌رود اما تردی و شکنندگی این ماده همیشه برشکاری آن را با مشکلاتی مواجه می‌کند. شکست‌های ناخواسته، ترک‌های ریز و ایجاد تنش‌های پسماند از جمله معایب برشکاری شیشه با روش‌های مرسوم آن است.

فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده یکی از فرآیندهای پیشرفته برشکاری است که به دلیل مزایایی که نسبت به سایر فرآیندهای برشکاری دارد مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. با آنکه استفاده از این فرآیند روز به روز در حال افزایش است اما همچنان بسیاری از جنبه‌های این فرآیند نیاز به مطالعه بیشتری به منظور افزایش توانایی برشکاری و بهینه سازی فرآیند برشکاری دارد.

این پژوهش شامل دو بخش است. در بخش اول به مطالعه و بررسی اثر پارامترهای فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده بر روی متغیرهای زبری سطح و مشخصات شکاف برش خورده در برشکاری شیشه پرداخته شده است. در این بخش از تکنیک طراحی آزمایش تاگوچی به منظور جمع آوری داده‌ها استفاده گردید. سپس از آنالیز واریانس برای تحلیل داده‌های جمع آوری شده استفاده گردیده است. همچنین با استفاده از مدل رگرسیون یک رابطه ریاضی میان زبری سطح برش خورده و متغیرهای فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده ارائه شده است.

در بخش دوم با استفاده از روش بهینه یابی شبکه عصبی - الگوریتم ژنتیک، شرایط برشکاری شیشه توسط برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده به منظور دستیابی به حداقل زبری سطح بریده شده بهینه یابی شده است. از شبکه عصبی مصنوعی برای مدل سازی و پیش بینی زبری سطح با توجه به پارامترهای فرآیند شامل فشار جت آب، سرعت پیشروی، نرخ ریزش ذرات ساینده و فاصله نازل تا سطح قطعه کار استفاده گردید. سپس از الگوریتم ژنتیک جهت بهینه سازی مدل پیشنهادی مذکور استفاده و شرایط بهینه به دست آمده برای کمترین زبری سطح برش خورده در برشکاری شیشه توسط فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده با استفاده از روش شبکه عصبی - الگوریتم ژنتیک ارائه گردیده است.

**کلید واژه‌ها:** برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده، شیشه، طراحی آزمایش تاگوچی، شبکه عصبی

مصنوعی، الگوریتم ژنتیک، آنالیز واریانس

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۵	فهرست علایم و نشانه‌ها.....
۵	فهرست جدول‌ها.....
ز	فهرست شکل‌ها.....
۱	<b>فصل ۱- مقدمه</b>
۱	۱-۱- پیشگفتار
۴	<b>فصل ۲- فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده</b>
۴	۱-۲- مقدمه
۴	۲-۲- فناوری فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده
۵	۳-۲- ویژگی‌های فرآیند
۶	۴-۲- سیستم‌های جت آب همراه با ذرات ساینده
۷	۱-۴-۲- سیستم اضافه شدنی
۸	۲-۴-۲- سیستم پمپ کردن مستقیم
۹	۵-۲- اجزای اصلی در یک ماشین جت آب همراه با ذرات ساینده
۱۱	۶-۲- پارامترهای موثر در فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده
۱۲	۷-۲- ویژگی‌های جت
۱۲	۱-۷-۲- ساختار جت در طول جریان جت
۱۳	۲-۷-۲- مشخصه‌های جت آب همراه با ذرات ساینده
۱۳	۱-۲-۷-۲- تخمین زدن سرعت یک ذره
۱۴	۲-۲-۷-۲- مدلسازی شتاب ذره
۱۵	۸-۲- مکانیزم میکرو برشکاری
۱۶	۱-۸-۲- مکانیزم میکرو برشکاری مواد شکل پذیر
۱۶	۱-۱-۸-۲- مدل میکرو برشکاری
۱۷	۲-۱-۸-۲- مدل برشکاری بر اساس تغییر فرم
۱۸	۳-۱-۸-۲- مدل تغییر شکل شخم زدن
۱۸	۲-۸-۲- مکانیزم میکرو برشکاری مواد ترد

۲۰	..... مدل ترک مخروطی ۱-۲-۸-۲
۲۰	..... مدل ترک جانبی ۲-۲-۸-۲
۲۱	..... مدل ترک درون دانه‌ای ۳-۲-۸-۲
۲۲	..... فرآیند برداشت مواد ۹-۲-۲
۲۲	..... مدل دو بعدی ۱-۹-۲
۲۲	..... مراحل فرآیند برشکاری ۲-۹-۲
۲۳	..... منطقه برشکاری ۳-۹-۲
۲۳	..... مشخصه‌های شکاف ۱۰-۲-۲
۲۴	..... سطح مقطع شکاف ۱-۱۰-۲
۲۷	..... مشخصات سطح ۱۱-۲-۲
۲۹	..... اثر پارامترهای فرآیند بر روی مشخصه‌های شکاف برش ۱۲-۲-۲
۲۹	..... اثر پارامترهای فرآیند بر روی شیب دیواره شکاف برش ۱-۱۲-۲
۳۰	..... اثر پارامترهای فرآیند بر روی پهنای بالای شکاف برش ۲-۱۲-۲
۳۱	..... اثر پارامترهای فرآیند بر روی پهنای پایین شکاف برش ۳-۱۲-۲
۳۱	..... اثر پارامترهای فرآیند بر روی زبری سطح ۴-۱۲-۲
۳۴	..... <b>فصل ۳- مواد و طراحی آزمایش</b>
۳۴	..... ۱-۳- مقدمه
۳۴	..... ۲-۳- ماده مورد آزمایش
۳۵	..... ۱-۲-۳- خواص شیشه
۳۶	..... ۳-۳- انواع روش‌های برشکاری شیشه
۳۷	..... ۴-۳- طراحی آزمایش
۳۸	..... ۱-۴-۳- تعاریف و اصطلاحات
۳۸	..... ۲-۴-۳- مراحل طراحی آزمایش
۴۰	..... ۵-۳- روش طراحی آزمایش تاگوچی
۴۱	..... ۶-۳- کار آزمایشگاهی
۴۱	..... ۱-۶-۳- طراحی آزمایش
۴۲	..... ۲-۶-۳- آماده‌سازی آزمایش
۴۳	..... ۳-۶-۳- جمع آوری داده‌ها
۴۶	..... ۷-۳- بررسی اثر پارامترهای فرآیند بر روی پهنای بالای شکاف برش
۴۶	..... ۱-۷-۳- آنالیز واریانس



۴۸	..... اثر سرعت پیشروی	۲-۷-۳
۴۹	..... اثر نرخ ریزش ذرات ساینده	۳-۷-۳
۴۹	..... اثر فاصله نازل تا سطح قطعه کار	۴-۷-۳
۵۰	..... اثر فشار جت آب	۵-۷-۳
۵۰	..... خلاصه‌ای از اثر متغیرهای آزمایش بر روی پهنای بالای شکاف برش	۶-۷-۳
۵۱	..... اثر پارامترهای فرآیند بر روی پهنای پایین شکاف برش	۸-۳
۵۱	..... آنالیز واریانس	۱-۸-۳
۵۱	..... اثر سرعت پیشروی	۲-۸-۳
۵۲	..... اثر نرخ ریزش ذرات ساینده	۳-۸-۳
۵۳	..... اثر فاصله نازل تا سطح قطعه کار	۴-۸-۳
۵۳	..... اثر فشار جت آب	۵-۸-۳
۵۴	..... خلاصه‌ای از اثر متغیرهای آزمایش بر روی پهنای پایین شکاف برش	۶-۸-۳
۵۵	..... اثر پارامترهای فرآیند بر روی شیب دیواره شکاف برش	۹-۳
۵۵	..... آنالیز واریانس	۱-۹-۳
۵۵	..... اثر سرعت پیشروی	۲-۹-۳
۵۵	..... اثر نرخ ریزش ذرات ساینده	۳-۹-۳
۵۶	..... اثر فاصله نازل تا سطح قطعه کار	۴-۹-۳
۵۷	..... اثر فشار جت آب	۵-۹-۳
۵۷	..... خلاصه‌ای از اثر متغیرهای آزمایش بر روی شیب دیواره شکاف برش	۶-۹-۳
۵۹	..... اثر پارامترهای فرآیند بر روی زبری سطح	۱۰-۳
۵۹	..... آنالیز واریانس	۱-۱۰-۳
۵۹	..... اثر سرعت پیشروی	۲-۱۰-۳
۶۰	..... اثر نرخ ریزش ذرات ساینده	۳-۱۰-۳
۶۰	..... اثر فاصله نازل تا سطح قطعه کار	۴-۱۰-۳
۶۱	..... اثر فشار جت آب	۵-۱۰-۳
۶۲	..... خلاصه‌ای از اثر متغیرهای آزمایش بر روی زبری سطح	۶-۱۰-۳
۶۳	..... مدل رگرسیون	۱۱-۳
۶۸	..... <b>فصل ۴- بهینه‌سازی</b>	
۶۸	..... مقدمه	۱-۴
۶۸	..... انواع روش‌های بهینه‌سازی	۲-۴

۶۹	..... ۱-۲-۴- آنیلینگ شبیه‌سازی شده
۷۰	..... ۲-۲-۴- جستجوی ممنوع
۷۱	..... ۳-۲-۴- الگوریتم ژنتیک
۷۱	..... ۳-۴- عملکرد الگوریتم ژنتیک
۷۳	..... ۴-۴- مدل‌سازی با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی
۷۴	..... ۱-۴-۴- ویژگی‌های شبکه عصبی مصنوعی
۷۴	..... ۲-۴-۴- تئوری شبکه‌های عصبی مصنوعی
۷۷	..... ۵-۴- بهینه‌سازی با استفاده از روش شبکه عصبی - الگوریتم ژنتیک
۸۳	..... فصل ۵- نتیجه‌گیری و پیشنهادات
۸۳	..... ۱-۵- نتیجه‌گیری
۸۴	..... ۲-۵- پیشنهادات
۸۶	..... فهرست مراجع
۹۰	..... واژه‌نامه فارسی به انگلیسی
۹۱	..... واژه‌نامه انگلیسی به فارسی

## فهرست علائم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
سرعت ذره ساینده	$u_p$
جرم نرخ جریان آب	$m_v$
جرم نرخ ذرات ساینده	$m_a$
زاویه برخورد ذره ساینده با سطح	$\alpha$
جریان تنش در ماده هدف	$\sigma$
نرخ نیروی عمودی به افقی	$\varphi$
فاکتور سایش تغییر شکل	$\varepsilon_d$
فاکتور سایش برشکاری	$\varepsilon_c$
شعاع ذره ساینده	$\gamma_p$
دانسیته ذره ساینده	$\rho_p$
فاکتور تشدید تنش بحرانی	$K_c$

## فهرست جدول‌ها

صفحه	عنوان
۳۶	جدول ۱-۳: خواص مکانیکی و فیزیکی شیشه و سایر مواد
۴۱	جدول ۲-۳: خواص مواد شیشه
۴۲	جدول ۳-۳: پارامترهای آزمایش
۴۳	جدول ۴-۳: مشخصات دستگاه به کار گرفته شده
۴۳	جدول ۵-۳: چیدمان متعامد مختلط L-32
۴۶	جدول ۶-۳: داده‌های اندازه‌گیری شده
۴۸	جدول ۷-۳: آنالیز واریانس داده‌های پهنای بالای شکاف برش
۵۲	جدول ۸-۳: آنالیز واریانس داده‌های پهنای پایین شکاف برش
۵۶	جدول ۹-۳: آنالیز واریانس داده‌های شیب دیواره شکاف برش
۵۹	جدول ۱۰-۳: آنالیز واریانس داده‌های زبری سطح
۶۴	جدول ۱۱-۳: آنالیز واریانس مدل رگرسیون
۶۶	جدول ۱۲-۳: نتایج به دست آمده از مدل رگرسیون
۸۰	جدول ۱-۳: مقایسه نتایج مدل شبکه عصبی و رگرسیون با زبری سطح اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها
۸۲	جدول ۱-۴: مقادیر بهینه به دست آمده

## فهرست شکل‌ها

صفحه	عنوان
۷	شکل ۱-۲: سیستم اضافه شدنی ذرات ساینده .....
۸	شکل ۲-۲: سیستم پمپ کردن مستقیم .....
۹	شکل ۳-۲: اجزای اصلی درماشین جت آب همراه با ذرات ساینده .....
۱۳	شکل ۴-۲: ساختار یک جت آب با سرعت بالا .....
۱۵	شکل ۵-۲: مکانیزم‌های برداشت مواد توسط ذرات ساینده .....
۱۶	شکل ۶-۲: نمایش دوبعدی برشکاری ذرات ساینده بر روی یک سطح شکل پذیر با زاویه برخورد $\alpha$ .....
۱۹	شکل ۷-۲: برشکاری و شخم زدن با استفاده از ذرات ساینده .....
۲۱	شکل ۸-۲: مدل ترک جانبی در مواد ترد .....
۲۲	شکل ۹-۲: مراحل فرآیند برشکاری .....
۲۴	شکل ۱۰-۲: برشکاری سایشی و تغییر شکل سایشی .....
۲۵	شکل ۱۱-۲: نمای کلی چاک برش سراسری .....
۲۵	شکل ۱۲-۲: محدوده قدرت نسبی در جت آب .....
۲۶	شکل ۱۳-۲: نمای کلی چاک کامل برش نخورده .....
۲۸	شکل ۱۴-۲: مکانیزم تشکیل خطوط بر روی سطح برش خورده .....
۳۹	شکل ۱-۳: مراحل طراحی آزمایش .....
۴۵	شکل ۲-۳: آماده سازی آزمایش .....
۴۵	شکل ۳-۳: متغیرهای آزمایش .....
۴۶	شکل ۴-۳: نمایی از زبری سنج خراشی .....
۴۸	شکل ۵-۳: اثر سرعت پیشروی بر روی پهنای بالای شکاف برش .....
۴۹	شکل ۶-۳: اثر نرخ ریزش ذرات ساینده بر روی پهنای بالای شکاف برش .....
۵۰	شکل ۷-۳: اثر فاصله نازل تا سطح بر روی پهنای بالای شکاف برش .....
۵۱	شکل ۸-۳: اثر فشار جت آب بر روی پهنای بالای شکاف برش .....
۵۲	شکل ۹-۳: اثر سرعت پیشروی بر روی پهنای پایین شکاف برش .....
۵۳	شکل ۱۰-۳: اثر نرخ ریزش ذرات ساینده بر روی پهنای پایین شکاف برش .....
۵۴	شکل ۱۱-۳: اثر فاصله نازل تا سطح بر روی پهنای پایین شکاف .....

- شکل ۳-۱۲: اثر فشار آب بر روی پهنای پایین شکاف برش..... ۵۴
- شکل ۳-۱۳: اثر سرعت پیشروی بر روی شیب شکاف برش..... ۵۶
- شکل ۳-۱۴: اثر نرخ ریزش ذرات ساینده بر روی شیب دیواره شکاف برش..... ۵۷
- شکل ۳-۱۵: اثر فاصله نازل تا سطح بر روی شیب دیواره شکاف برش..... ۵۸
- شکل ۳-۱۶: اثر فشار جت آب بر روی شیب دیواره شکاف برش..... ۵۸
- شکل ۳-۱۷: اثر سرعت پیشروی بر روی زبری سطح..... ۶۰
- شکل ۳-۱۸: اثر نرخ ریزش ذرات ساینده بر روی زبری سطح..... ۶۱
- شکل ۳-۱۹: اثر فاصله نازل تا سطح بر روی زبری سطح..... ۶۲
- شکل ۳-۲۰: اثر فشار جت آب بر روی زبری سطح..... ۶۲
- شکل ۳-۲۱: مقایسه نتایج مدل رگرسیون با داده‌های به دست آمده از آزمایش‌ها..... ۶۵
- شکل ۴-۱: انواع روش‌های بهینه‌سازی..... ۶۹
- شکل ۴-۲: مدل یک نرون تک ورودی..... ۷۵
- شکل ۴-۳: ساختار یک شبکه عصبی مصنوعی..... ۷۶
- شکل ۴-۴: ساختار کلی روش یکپارچه شبکه عصبی - الگوریتم ژنتیک..... ۷۹
- شکل ۴-۵: مقایسه نتایج شبکه عصبی با زبری سطح اندازه‌گیری شده در آزمایش‌ها..... ۷۹
- شکل ۴-۶: مدل شبکه عصبی مصنوعی ارائه شده برای پیش‌بینی زبری سطح..... ۸۱
- شکل ۴-۷: نمودار تابع برازندگی..... ۸۲

## فصل ۱ - مقدمه

### ۱-۱- پیشگفتار

بشر همواره به دنبال کشف و ساخت مواد به منظور برآورده کردن نیازهای خود بوده است. مشخص نیست که برای اولین بار شیشه توسط چه کسی کشف و یا ساخته شده اما یافته‌های باستان شناسان نشان می‌دهد که مصریان باستان قبل از میلاد مسیح از شیشه استفاده می‌کردند. البته شیشه در ابتدا شفافیت امروز را نداشته اما همچنان مانند شیشه‌های امروزی ترد و شکننده بوده است.

شیشه دارای خواصی است که این ماده را منحصر به فرد می‌کند، پایداری شیمیایی و فیزیکی، عدم ترکیب شدن با سایر عناصر، عدم اکسید شدن و خطر زنگ زدگی، مقاومت به خوردگی شیمیایی، شفافیت، خواص نوری و ... از جمله مزایایی است که باعث گردیده تا از شیشه در صنایع هوایی، پزشکی، نظامی، تزئینی و ساختمان به طور گسترده‌ای استفاده گردد. تردی و شکنندگی از جمله خواص شیشه است که باعث گردیده تا همواره در برشکاری این ماده با روش‌های مرسوم برشکاری آن مشکلاتی وجود داشته باشد. شکست‌های ناخواسته، ترک‌های ریز، ایجاد تنش‌های پسماند، ایجاد لبه‌های تیز و برنده پس از برشکاری که نیاز به پولیشکاری دارند و ... از جمله مشکلاتی است که در نهایت باعث افزایش هزینه و زمان برشکاری شیشه با استفاده از روش‌های مرسوم می‌گردد. از آنجا که ماده جایگزین مناسبی تا کنون برای شیشه ابداع نشده است و همچنین کاربرد فراوان این ماده در صنایع مختلف، باعث گردید تا مهندسان به فکر ابداع روش‌های جدیدی برای برشکاری موادی همچون شیشه بیافتند که معایب روش‌های مرسوم را نداشته باشد.

فرآیند برشکاری جت آب همراه با مواد ساینده (AWJ)<sup>۱</sup> از جمله فرآیندهای برشکاری غیر سنتی است که در سال‌های اخیر مورد توجه بسیاری قرار گرفته است. در این فرآیند فرسایش مواد به علت برخورد جت آب همراه با ذرات ساینده باعث برشکاری مواد می‌شود. از فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده برای برشکاری مواد فلزی و غیر فلزی، به ویژه مواد سخت برش مانند سرامیک‌ها، سنگ‌ها و کامپوزیت‌ها استفاده می‌گردد. به علت مزیت‌های این فرآیند نسبت به سایر فرآیندهای برشکاری، مانند عدم ایجاد تنش‌های حرارتی، نیروی برشکاری پایین و همچنین دامنه وسیع کاربرد آن برای مواد مختلف باعث گردیده تا این فرآیند مورد توجه بسیاری قرار گیرد [۱].

فرآیند جت آب همراه با مواد ساینده اولین بار در سال ۱۹۸۰ میلادی مورد استفاده قرار گرفت. از آن زمان تا کنون تحقیقات و مطالعات فراوانی به منظور بررسی جنبه‌های گوناگون این فرآیند صورت گرفته

---

1- Abrasive Water Jet

است [۲]. این فرآیند همچنان در حال توسعه و گسترش است و برخی جنبه‌های آن هنوز به طور کامل مورد بررسی قرار نگرفته است.

علی‌رغم آنکه در زمینه برشکاری مواد مختلف با استفاده از جت آب همراه با ذرات ساینده پژوهش‌های فراوانی صورت گرفته است اما در زمینه مطالعه و بررسی برشکاری شیشه با استفاده از جت آب همراه با ذرات ساینده تحقیقات ناچیزی صورت گرفته است. خان<sup>۱</sup> در سال ۲۰۰۷ میلادی اثر ذرات ساینده مختلف را بر روی مشخصه‌های شکاف برش خورده شیشه بررسی کرده است [۱] و ژو<sup>۲</sup> در سال ۲۰۰۸ میلادی ساختار شیشه‌های نازک را پس از برشکاری مورد تحقیق و مطالعه قرار داده است [۳]. در این پژوهش با استفاده از روش‌های طراحی آزمایش، تحلیل آماری داده‌ها، مدل‌سازی، شبیه‌سازی و بهینه‌سازی تلاش گردیده است تا یک بررسی جامع بر روی برشکاری شیشه توسط جت آب همراه با ذرات ساینده صورت گیرد.

به منظور مطالعه دقیق این فرآیند نیاز به برخی اطلاعات اولیه همچون آشنایی با انواع مدل‌های فرسایش (به منظور بررسی چگونگی برداشت مواد از روی سطح برشکاری شده) و همچنین آشنایی با مدل‌های نحوه برشکاری (بررسی مشخصات برش مانند، پهنای چاک برش، عمق برش و زاویه شیب دیواره برش) داریم که در فصل دوم این پایان‌نامه ذکر شده است.

در فرآیند برشکاری توسط جت آب همراه با مواد ساینده پارامترهای ماشینکاری گوناگونی وجود دارد که از آن جمله می‌توان به فشار جت آب، سرعت پیشروی، ذرات ساینده (نرخ ریزش ذرات ساینده و سایز ذرات ساینده)، فاصله نازل تا سطح قطعه کار و... اشاره کرد. در این پایان‌نامه اثر متغیرهای فرآیند شامل، فشار جت آب، فاصله نازل تا سطح قطعه کار، نرخ ریزش ذرات ساینده و سرعت پیشروی در برشکاری شیشه مورد مطالعه و بررسی قرار گرفته است.

شیشه به علت دارا بودن خواص مکانیکی و فیزیکی خاص که در فصل سوم به آن اشاره خواهد شد از جمله مواد سخت برش می‌باشد که استفاده از روش‌های مرسوم برای برشکاری آن با مشکلاتی همراه است [۳]. فرآیند جت آب همراه با مواد ساینده از جمله فرآیندهای برشکاری پیشرفته است که برای برشکاری شیشه به کار می‌رود. در این تحقیق اثر متغیرهای فرآیند جت آب همراه با مواد ساینده بر روی پهنای بالا و پایین شکاف برش و شیب دیواره شکاف برش و همچنین زبری سطح شیشه بریده شده توسط فرآیند جت آب همراه با مواد ساینده مورد بررسی قرار گرفته است.

در فصل سوم، ابتدا به تشریح شیشه و خواص آن پرداخته شده، سپس رویه انجام آزمایش شامل طراحی آزمایش، نحوه انتخاب متغیرهای آزمایش، روند آماده‌سازی و چگونگی برداشت داده‌ها بررسی گردیده

---

<sup>1</sup> -Khan

<sup>2</sup> - Zhou



است. در انتها به تشریح اثر پارامترها، بر روی شکاف برش و کیفیت سطح شیشه بریده شده پرداخته شده است. همچنین داده‌های جمع‌آوری شده با استفاده از روش آنالیز واریانس بررسی و تحلیل گردید. سپس با استفاده از روش رگرسیون یک مدل برای پیش‌بینی زبری سطح بریده شده با در نظر گرفتن پارامترهای فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده ارایه گردیده است.

در ادامه و در فصل چهارم، برشکاری شیشه با فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده با استفاده از روش شبکه عصبی- الگوریتم ژنتیک به منظور دستیابی به حداقل زبری سطح بریده شده بهینه‌سازی شد. در این فصل، ابتدا فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده با استفاده از شبکه عصبی مصنوعی مدل‌سازی شده و مدل به دست آمده به وسیله الگوریتم ژنتیک بهینه‌سازی گردید.

در فصل آخر، به جمع بندی و نتیجه گیری از مطالعه و آزمایش‌های صورت گرفته پرداخته شده و در انتها نیز پیشنهادهایی برای تحقیقات آتی ارایه شده است.

## فصل ۲- فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده

### ۲-۱- مقدمه

ایده استفاده از جت آب برای برشکاری در سال ۱۹۶۸ میلادی توسط نورمن فرانز<sup>۱</sup> ارائه گردید [۴]. در همان اواخر دهه ۷۰ میلادی از جت آب برای برشکاری چوب و پلاستیک استفاده شد [۵]. سپس جهت افزایش کارایی فرآیند، مواد ساینده‌ای از قبیل گارنت به جریان جت آب اضافه گردید و به این ترتیب برشکاری توسط جت آب دامنه وسیعی از مواد را پوشش داد، البته این فرآیند تا سال ۱۹۸۰ به دلیل بالا نبودن فشار آب رایج نشد.

امروزه فرآیند برش با جت آب به همراه ذرات ساینده به عنوان یکی از روش‌های غیر سنتی ماشینکاری توسعه فراوانی یافته است. مزایای فراوان این فرآیند از جمله برشکاری مواد سخت و همچنین برشکاری مواد در دمای پایین باعث شده است که در برش سرامیک‌ها، سنگ‌ها، مواد فلزی و غیر فلزی، پلاستیک‌ها و کامپوزیت‌ها از این فرآیند به وفور استفاده گردد [۷]. در فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده آب بیشتر نقش شتاب دهنده به ذرات ساینده را دارد و ذرات ساینده شتاب گرفته وظیفه برداشت مواد بر را بر عهده دارند.

در این فصل، با بررسی تحقیقات صورت گرفته در زمینه برشکاری توسط جت آب همراه با ذرات ساینده به تشریح انگیزه و اهداف این تحقیقات پرداخته شده است. بررسی‌ها نشان می‌دهد که در اغلب موارد به بررسی اثر پارامترهای فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده بر روی سطح برش و هندسه برش پرداخته شده است. در کار حاضر به منظور پیش‌بینی رفتار این فرآیند، فرآیند ابتدا مدل گردیده و سپس به بهینه سازی پارامترهای فرآیند پرداخته شده است.

### ۲-۲- فناوری فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده

از زمان طرح ایده برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده تاکنون تلاش‌های فراوانی برای توسعه این فناوری صورت گرفته است. ویژگی‌های منحصر به فرد این فرآیند که در قسمت بعدی ذکر شده است باعث گردیده تا این فرآیند به عنوان یک رقیب جدی برای فرآیندهای برشکاری مرسوم سنتی مطرح شود. به کار بردن برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده در برشکاری موادی که اخیراً کاربرد آنها

---

1-Norman Franz

توسعه فراوانی یافته و عدم توانایی روش‌های برشکاری مرسوم برای برشکاری این مواد باعث گردید تا برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده به عنوان یکی از فناوری‌های برتر عصر حاضر مطرح شود. در حقیقت ویژگی‌های این فرآیند باعث گردید تا مهندسان به فکر استفاده کردن از موادی بیافتند که در گذشته استفاده کردن از آنها به دلیل مشکلات عمده در برشکاری و ماشینکاری آنها ممکن نبود. ایده ساده این فناوری که در آن از جت آب به همراه ذرات ساینده استفاده می‌گردد باعث گردیده است تا روند توسعه و تکامل این فناوری سرعت یابد. در بخش بعدی به تشریح ویژگی‌های این فناوری پرداخته شده است.

## ۲-۳- ویژگی‌های فرآیند

استفاده از فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده به دلیل مزایایی که نسبت به سایر روش‌های برشکاری دارد رو به افزایش است [۷,۸]. تعدادی از ویژگی‌های این فرآیند در ادامه عنوان شده است.

- **عدم تنش و یا تغییر شکل حرارتی در قطعه کار:** حرارت ایجاد شده در این فرآیند به علت استفاده کردن از آب به عنوان شتاب دهنده ذرات ساینده بسیار پایین است و همین امر باعث گردیده تا این فرآیند برای برشکاری موادی که به حرارت حساس هستند مناسب باشد.

- **توانایی به وجود آوردن محیط‌های دو بعدی:** به علت آنکه امتداد ابزار برنده در این فرآیند عمود بر سطح ماده هدف می‌باشد، از این فرآیند بیشتر در برشکاری دو بعدی استفاده می‌شود. اگر چه در برشکاری‌های سه بعدی نیز می‌توان از آن استفاده کرد.

- **قابلیت برشکاری بالا:** فرآیند جت آب همراه با ذرات ساینده می‌تواند به منظور برشکاری بسیاری از مواد به خصوص مواد سخت برش مانند فولادهای سخت کاری شده، آلیاژهای تیتانیوم، مس، برنج، آلومینیوم و مواد ترد مانند شیشه، سرامیک و کوارتز به کار رود.

- **نیروی پایین برش و سرعت بالای تنظیمات:** نیروی برشکاری در این فرآیند بسیار پایین است به گونه‌ای که در بسیاری از موارد حتی نیاز به گیره‌بندی نیز وجود ندارد. به علت آنکه ابزار برش در این فرآیند ثابت است دیگر نیاز به تعویض ابزار نیز وجود ندارد به همین دلیل سرعت تعویض برنامه برشکاری بالا است.

- **قطر کم ابزار برش:** قطر ابزار برش در این فرآیند بسیار پایین است و به طور معمول بین  $0.3$  تا  $1/2$  میلیمتر است.

اگر چه فرآیند جت آب دارای مزایایی است اما محدودیت‌هایی نیز دارد:

- **اغتشاش زیاد:** دو عامل اغتشاش در این فرآیند وجود دارد. عامل اول، اغتشاش مکانیکی و عامل دوم، اغتشاش آیرودینامیکی. اغتشاش مکانیکی در این فرآیند ناشی از صدای پمپ هیدرولیک و الکتروموتور

است. اغتشاش آیرودینامیکی ناشی از سرعت بالای جت آب هنگام خروج از نازل برشکاری است. اغتشاش آیرودینامیکی هنگامی که فاصله نازل تا سطح افزایش می‌یابد بیشتر می‌شود.

- **هزینه اولیه بالا:** برای بسیاری از فعالیت‌های صنعتی این فرآیند بسیار گران است. به طور متوسط هزینه اولیه این فرآیند بین ۱۰۰ تا ۱۵۰ هزار دلار است.

- **بازدهی انرژی پایین:** در فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده عمل برداشت مواد توسط ذرات ساینده انجام می‌شود. این ذرات انرژی جنبشی خود را از جریان جت آب می‌گیرند که البته این میزان انرژی ۱۰ درصد کل میزان انرژی جنبشی جت آب است.

- **کوتاه بودن عمر نازل:** به علت سایش بالا در این فرآیند، عمر نازل پایین است و معمولاً بین ۱۵۰ تا ۳۰۰ ساعت است.

اگر چه فرآیند برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده همچنان در حال توسعه و تکامل است اما به طور حتم گسترش این فناوری را باید مرهون استفاده کردن از ذرات ساینده در این فرآیند دانست. برشکاری جت آب به تنهایی برای برشکاری موادی همچون کاغذ، پلاستیک و موادی که سختی پایینی دارند کافی است اما برای برشکاری موادی که سختی بالاتری دارند مانند فولادها، سرامیک‌ها، شیشه و کامپوزیت‌ها کارایی لازم را ندارد. بدون شک از سال ۱۹۸۰ میلادی که حشیش<sup>۱</sup> ایده اضافه کردن ذرات ساینده به جت آب را مطرح کرد تحول شگرفی در زمینه توسعه این فناوری ایجاد شد. به همین دلیل ذرات ساینده نقش اساسی و کلیدی در این فرآیند ایفا می‌کند اما روش‌های مختلفی برای اضافه کردن ذرات ساینده به جت آب وجود دارد که در ادامه به آن اشاره می‌شود.

## ۲-۴ - سیستم‌های جت آب همراه با ذرات ساینده

پس از آنکه حشیش ایده اضافه کردن ذرات ساینده به جت آب را مطرح کرد، مواد مختلفی برای در نظر گرفتن به عنوان ذرات ساینده معرفی شدند. گارنت<sup>۲</sup>، اکسید آلومینیوم، سیلیکون کارباید، اولیوین<sup>۳</sup> و اکسید بور از جمله موادی هستند که به عنوان ذرات ساینده در برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده مورد استفاده قرار می‌گیرند. ذرات ساینده گارنت به علت قیمت مناسب و کارایی نسبتاً بالا بیشتر از سایر مواد در برشکاری جت آب همراه با ذرات ساینده به عنوان ذرات ساینده مورد استفاده قرار می‌گیرد. همراه شدن ذرات ساینده با جت آب باعث می‌شود که کارایی این فرآیند افزایش یابد و بتوان دامنه

---

<sup>۱</sup> - Hashish

<sup>۲</sup> - Garnet

<sup>۳</sup> - Olivin