



## روشی نوین برای افزایش بازدهی عملیات کربن دهی

فرساد فرقانی<sup>۱</sup>، سعید کهربائی<sup>۲</sup>، جلیل وحدتی خاکی<sup>۳</sup> و محسن حداد سبزواری<sup>۳</sup>

### چکیده

در این پژوهش تاثیر عملیات آسیاکاری اولیه سطح نمونه‌های فولاد Ck20 بر عملیات کربن دهی نهایی بررسی شد. بدین منظور سطح نمونه‌هایی از جنس فولاد Ck20، برای زمان‌های مختلف به کمک آسیای ماهواره‌ای، آسیاکاری شده و سپس در شرایط مختلف دما و زمان تحت عملیات کربن دهی قرار گرفت. سطح نمونه‌های آسیا شده توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) بررسی گردید. عمق لایه کربوره شده به کمک تصاویر متالوگرافی و تهیه منحنی تغییرات میکروسختی از سطح به مغز مقایسه گردید. برای اندازه‌گیری عمق لایه کربوره شده در تصاویر متالوگرافی از سیستم‌های پردازش تصویر خودکار استفاده گردید. نتایج حاکی از افزایش عمق لایه کربوره شده تا نزدیک به 100 درصد برای نمونه‌های آسیا شده می‌باشد. همچنین در مورد مکانیزم افزایش ضریب نفوذ کربن در این نمونه‌ها بحث گردید.

**واژه‌های کلیدی:** کربن دهی فولاد، آسیاکاری سطحی، میکروسکوپ الکترونی روبشی، پردازش تصویر، میکروسختی، اندازه دانه آستنیت

<sup>۱</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد دانشکده مهندسی متالورژی و مواد - دانشگاه تهران

<sup>۲</sup> دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

<sup>۳</sup> عضو هیأت علمی گروه مهندسی مواد - دانشکده مهندسی - دانشگاه فردوسی مشهد

## مقدمه

امروزه یکی از مهمترین دغدغه‌های محققین و صنعتگران افزایش مقاومت به سایش قطعات صنعتی در عین حفظ چقرمگی قطعات می‌باشد که در این راستا سالانه پروژه‌های تحقیقاتی بسیاری نیز انجام می‌شود. از رایج‌ترین و به صرفه‌ترین روش‌های افزایش مقاومت به سایش قطعات صنعتی کربن‌دهی سطح این قطعات می‌باشد. کربن‌دهی از آن دسته از عملیات سخت‌کاری سطحی است که منجر به تغییر ترکیب شیمیایی سطح فولاد می‌شود و به عملیات حرارتی - شیمیایی یا عملیات ترموشیمی موسوم است. [1]

در روش کربن‌دهی پودری (جامد) دما تا حدود 900 درجه سانتیگراد بالا برده شده و برای مدت زمان مشخصی در این دما نگه داشته می‌شود تا کربن به عمق نمونه‌ی مورد نظر نفوذ کند. نگهداری نمونه‌ها در این دما به منظور کربن‌دهی، اثرات مضر بر ریزساختار فولاد مورد نظر دارد که از آن جمله می‌توان به درشت شدن دانه‌های آستنیت، امکان ترد شدن و ترک خوردن در صورت سرد کردن مستقیم در آب اشاره نمود. در صنعت معمولاً از عملیات حرارتی ثانویه به منظور حذف اثرات مخرب دمای بالای کربن‌دهی استفاده می‌شود. لذا افزایش بازدهی عملیات کربن‌دهی به گونه‌ای که این عملیات در دماهای پایین‌تر قابل انجام باشد می‌تواند بسیار جالب توجه و راهگشا باشد.

از آنجا که نفوذ از طریق مرز دانه‌ها و عیوب کریستالی بسیار سریعتر از نفوذ از طریق توده ماده می‌باشد. لذا با کاهش اندازه دانه در ساختار به جهت افزایش دانسیته مرز دانه‌ها ضریب نفوذ به شدت افزایش می‌یابد. [2، 3 و 4] بنابراین ایجاد ساختار ریزدانه در سطح می‌تواند در افزایش عمق لایه کربوره شده مؤثر باشد. همچنین به وجود آمدن عیوب سطحی نیز خصوصاً در زمان‌ها اولیه عملیات کربن‌دهی و پیش از بازیابی ساختار در افزایش عمق لایه کربوره شده می‌تواند مؤثر باشد.

در دهه گذشته پژوهش‌های زیادی در رابطه با تاثیر تغییر شکل پلاستیک شدید و تغییر شکل‌های کرنش بالا بر کاهش اندازه دانه و به کارگیری روش‌های مختلف به منظور کاهش اندازه دانه آستنیت صورت گرفته است. [5، 6 و 7] همچنین استفاده از تکنولوژیهای جدید به منظور کاهش اندازه دانه در سطح فلزات، روز به روز در حال گسترش و بهبود می‌باشد. این روش‌ها عمدتاً بر کاهش اندازه دانه بر پایه سیلان فلز و شکستن دانه‌های درشت، در لایه سطحی فلزات استوار می‌باشد. [8 تا 11] در این راستا تشکیل لایه نانو ساختار در سطح فولاد یوتکتوئید توسط روش پرتاب توپ (Ball drop) توسط اوموتو<sup>1</sup> و همکارانش [8] و بررسی اثر تغییر شکل شدید پلاستیک بر اندازه‌های دانه‌های آستنیت و تاثیر آن بر مارتنزیت تشکیل شده از ساختار استنیت مربوطه توسط بوجون هن<sup>2</sup> و همکارش [12] صورت گرفته است.

در این پژوهش از آسیاکاری مکانیکی به منظور ایجاد لایه کارسرد شده در سطح فولاد و ایجاد تغییرات ساختاری در سطح بهره برده شده است. هدف از این پژوهش نیز به کارگیری عملیات آسیاکاری در سطح نمونه به منظور افزایش بازدهی عملیات کربوراسیون نهایی می‌باشد.

## مواد و روش تحقیق

در این تحقیق از میلگرد فولاد ساده کربنی CK20، تولیدی شرکت فولاد آلیاژی ایران به عنوان نمونه آزمایش استفاده شد. ترکیب شیمیایی این فولاد در جدول 1 نمایش داده شده است. در ابتدا فولاد مذکور برای مدت 30 دقیقه و در دمای 1100 درجه سانتیگراد تابکاری شد. سپس با استفاده از عملیات ماشین کاری، نمونه‌های استوانه‌ای با قطر 24/3 میلیمتر و

<sup>1</sup>M. Umemot  
<sup>2</sup>Boajun Han

ارتفاع 5/15 ميليمتر از فولاد مذکور تهيه گرديد. همچنين برای انجام عمليات آسیاکاری مکانیکی نگاهدارنده‌ای از جنس فولاد CK45 طراحی و تهيه شد. این نگاهدارنده به گونه‌ای طراحی شد که نمونه را در حین فرایند آسیاکاری مکانیکی، در کف محفظه آسیاب گلوله‌ای ثابت نگه دارد. تصویر شماتیک نمونه استوانه‌ای و نگاهدارنده آن در شکل 1 نمایش داده شده است.

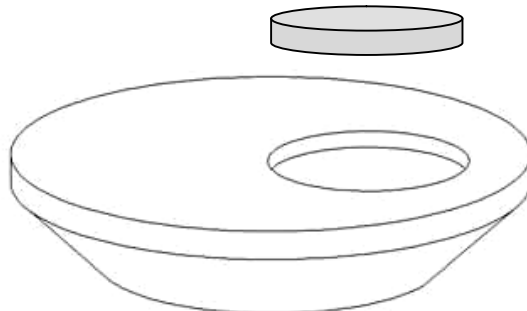
جهت انجام آسیاکاری مکانیکی از آسیاب گلوله‌ای ماهواره‌ای (Planetary Ball mill) استفاده شد. عمليات آسیاکاری با سرعت 250 دور در دقیقه و تحت شرایط نسبتاً همدمما انجام گرديد. به منظور ایجاد قدرت بهینه در آسیاکاری از 15 گوی 8 ميليمتری، 15 گوی 10 ميليمتری و 15 گوی 12 ميليمتری در هر محفظه آسیاب استفاده شد [13]. نمونه‌ها پس از جاسازی در محفظه آسیاب برای مدت زمان‌های 6، 12 و 18 ساعت آسیاکاری شد.

برای بررسی اثر آسیاکاری سطحی بر عمليات کربن‌دهی ثانویه، نمونه‌های آسیاکاری شده در سه شرایط مختلف دمایی و زمانی تحت عمليات کربن‌دهی جامد قرار گرفتند. شرایط کربن‌دهی در دمای 850 برای مدت 120 دقیقه، در دمای 800 برای مدت 120 دقیقه و در دمای 800 برای مدت 15 دقیقه بدین منظور انتخاب گرديد. در هر کدام از این شرایط سه نمونه آسیاکاری شده برای مدت زمان‌های 6، 12 و 18 ساعت و یک نمونه‌ی آسیاکاری نشده تحت عمليات کربن‌دهی قرار گرفت. عمليات کربن‌دهی به صورت جامد و توسط مخلوط حاوی 90 درصد زغال چوب و 10 درصد کربنات باریم (BaCO<sub>3</sub>) صورت پذیرفت.

در ادامه مقطع عرضی نمونه‌ها مورد بررسی متالوگرافی قرار گرفت. آماده سازی نمونه‌ها مطابق استاندارد ASTM-E3 صورت پذیرفت. سپس نمونه‌ها توسط محلول نایتال 2 درصد حکاکي<sup>1</sup> گرديد. محاسبه عمق لایه کربوره شده مطابق با روش ارزیابی متالوگرافی (Method B) در استاندارد ASTM-G79-83 صورت پذیرفت. برای محاسبه عمق لایه کربوره شده در تصاویر تهيه شده از ریزساختار، از سیستم پردازش اتوماتیک تصاویر بهره برده شد. بدین منظور از نرم‌افزار Clemex ساخت شرکت Clemex Technologies inc و نرم‌افزار MIP ساخت شرکت نهمین پردازان آسیا استفاده شد.

جدول شماره 1 - ترکیب شیمیایی فولاد CK20

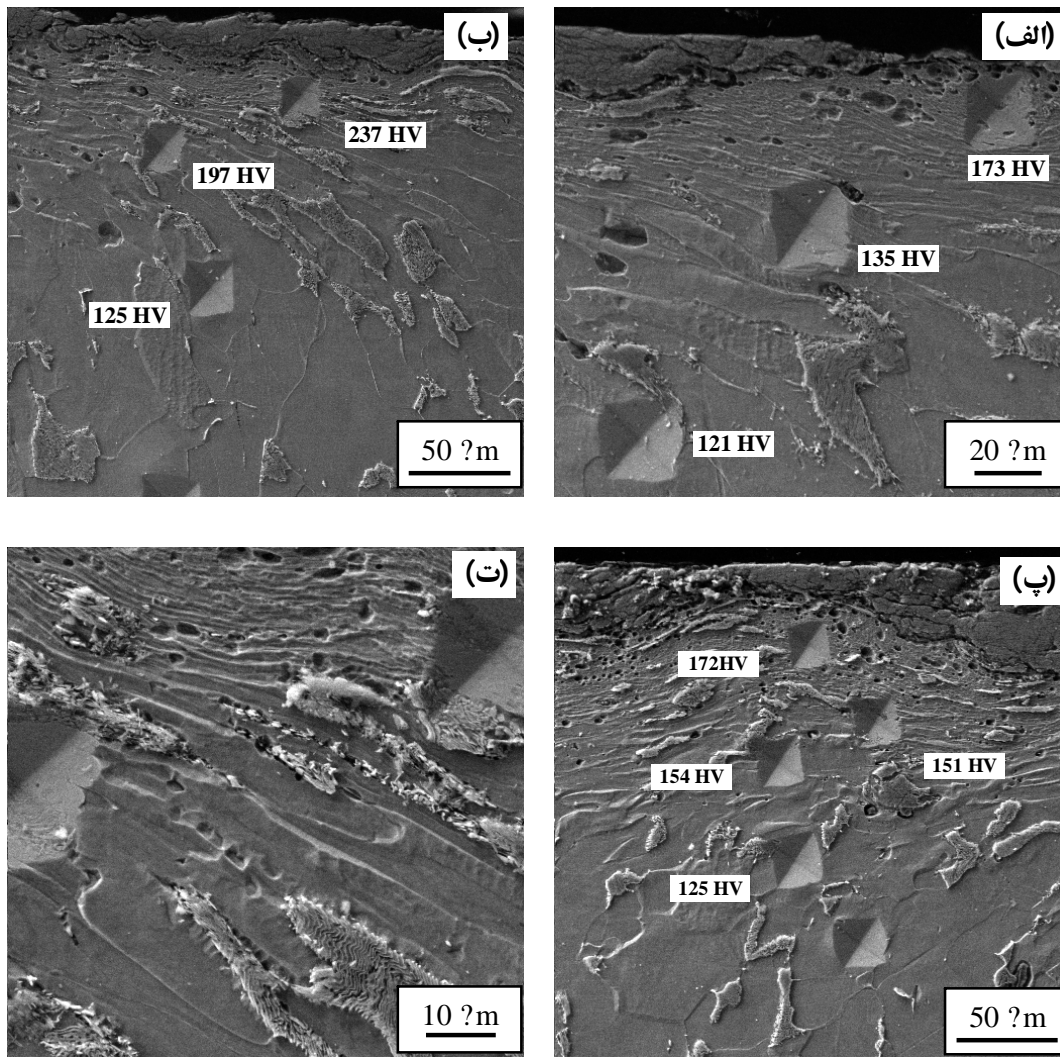
نام عنصر	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Cr%	Mo%	Ni%	Fe%
درصد وزنی	0.18	0.30	0.92	0.006	0.009	0.14	0.02	0.08	مابقی



شکل 1 - شکل شماتیک نگاهدارنده طراحی شده از جنس فولاد CK45 به همراه نمونه استوانه‌ای CK20

میکروسختی نمونه‌ها توسط دستگاه میکروسختی Buehler-micromet2100 موجود در آزمایشگاه متالوگرافی دانشگاه فردوسی مشهد انجام شد. بدین منظور از بار اعمالی 9/8 نیوتن و برای مدت زمان 15 ثانیه استفاده شد. به منظور آشکارسازی دانه‌های آستنیت اولیه، نمونه‌های کربوره شده در دمای 850 درجه سانتیگراد، برای مدت 16 ساعت در دمای 510 درجه سانتیگراد نگه‌داشته شدند. سپس پس از آماده‌سازی مجدد و پولیش، توسط محلول آبی فوق‌اشباع اسید پیکریک جوشان برای مدت 35 ثانیه حکاکی شدند. در ادامه نمونه‌ها به طور جزئی مجدداً پولیش شده و جهت اندازه‌گیری اندازه‌دانه در حین عملیات کربن‌دهی تحت بررسی متالوگرافی قرار گرفتند. [14]

بررسی ریزساختار ناحیه تغییر شکل یافته در نمونه‌های فقط آسیاکاری شده نیز توسط میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM-Tescan Vega) موجود در مرکز پژوهش متالورژی رازی صورت پذیرفت. نمونه‌ها جهت مشاهدات SEM پس از آماده‌سازی، توسط محلول 5% نایتال حکاکی گردید. [8]



شکل 2 - تصویر SEM از سطح مقطع فولاد آسیاشده برای مدت (الف) 6 ساعت، (ب و ت) 12 ساعت و (پ) 18 ساعت

## یافته ها

### الف) مشاهدات SEM لایه تغییر شکل یافته

شکل 2 تصویر SEM سطح مقطع نمونه آسیا شده برای مدت زمان های 6، 12 و 18 ساعت را نشان می دهد. در این تصاویر ناحیه کار سخت شده با ساختاری متشکل از لایه های تغییر شکل یافته به وضوح قابل مشاهده است. همانگونه که ملاحظه می شود ساختار لایه ای پرلیت ها در نزدیک سطح دیگر قابل مشاهده نیست. تشکیل لایه کمی تیره تر در سطح حاکی از ریزدانه شدن شدید ساختار در سطح نمونه می باشد. تشکیل لایه های تیره در پژوهش های پیشین به عنوان ناحیه نانوساختار به کرات مشاهده شده است. [8، 15 و 16] نتایج میکروسختی نیز وقوع تغییر شکل شدید در سطح را تایید می نماید. همچنین باندهای موج<sup>1</sup> در شکل 2-ت و در نزدیکی سطح قابل مشاهده است. ریزساختار فوق تاحدودی با ریزساختار نمونه های پودری آسیاکاری شده همخوانی دارد. [16]

### ب) محاسبه ضخامت لایه کربوره شده به کمک ارزیابی تصاویر متالوگرافی

هرچند اندازه گیری ضخامت لایه کربوره شده به کمک تصاویر متالوگرافی یکی از روش های استاندارد محاسبه ضخامت لایه کربوره می باشد، اما لزوماً عمق محاسبه شده به کمک این روش، عمق کل ناحیه نفوذ کربن نمی باشد. ولی به هر حال اندازه های محاسبه شده توسط این روش، معیار مناسبی برای مقایسه نمونه های مختلف می باشد. [17] تصاویر متالوگرافی با بزرگنمایی 50 برابر برای نمونه کربن دهی شده در دمای 850 درجه سانتیگراد و با بزرگنمایی 100 برابر برای نمونه های کربن دهی شده در دمای 800 درجه سانتیگراد تهیه گردید. بزرگنمایی ها به گونه ای انتخاب گردید که ناحیه دید تصویر حداقل 1/5 برابر ضخامت پوشش باشد. [18، 19] پردازش تصاویر توسط دو نرم افزار MIP و Clemex و به صورت اتوماتیک انجام شد. تمام مراحل پردازش تصاویر به صورت یکسان و توسط نرم افزار انجام گردید تا از عامل خطای انسانی در محاسبات جلوگیری شود. در هر تصویر 900 میکرومتر از سطح نمونه توسط نرم افزار انتخاب و پردازش گردید. برای تمام تصاویر از شدت نور آستانه ای<sup>2</sup> 155 استفاده شد.

شکل 3 ریزساختار سطح و نتایج پردازش تصویر نرم افزار MIP نمونه کربن دهی شده در دمای 800 درجه سانتیگراد و برای مدت 15 دقیقه را نشان می دهد. شکل 3-الف مربوط به نمونه آسیاکاری نشده با عمق لایه کربوره ای متوسط 46.54 میکرومتر و شکل 3-ب مربوط به نمونه آسیاکاری شده با عمق متوسط 84.33 میکرومتر می باشد. همانگونه که ملاحظه می شود عمق لایه کربوره شده در نمونه آسیا شده نسبت به نمونه آسیا نشده در حدود 80 درصد افزایش داشته است. عمق لایه کربوره ای تمام نمونه ها، اندازه گیری شده توسط دو نرم افزار MIP و Clemex، در جدول 3 آورده شده است.

### پ) بررسی تغییرات میکروسختی

برای ترسیم تغییرات سختی از سطح به مغز، نیروی اعمالی به نمونه با توجه به استاندارد ASTM-E384 به گونه ای انتخاب شد که علاوه بر امکان تهیه پروفیل سختی و رعایت فاصله ای استاندارد تعیین شده بین نقاط اثر فرورونده، از تکرارپذیری<sup>3</sup>

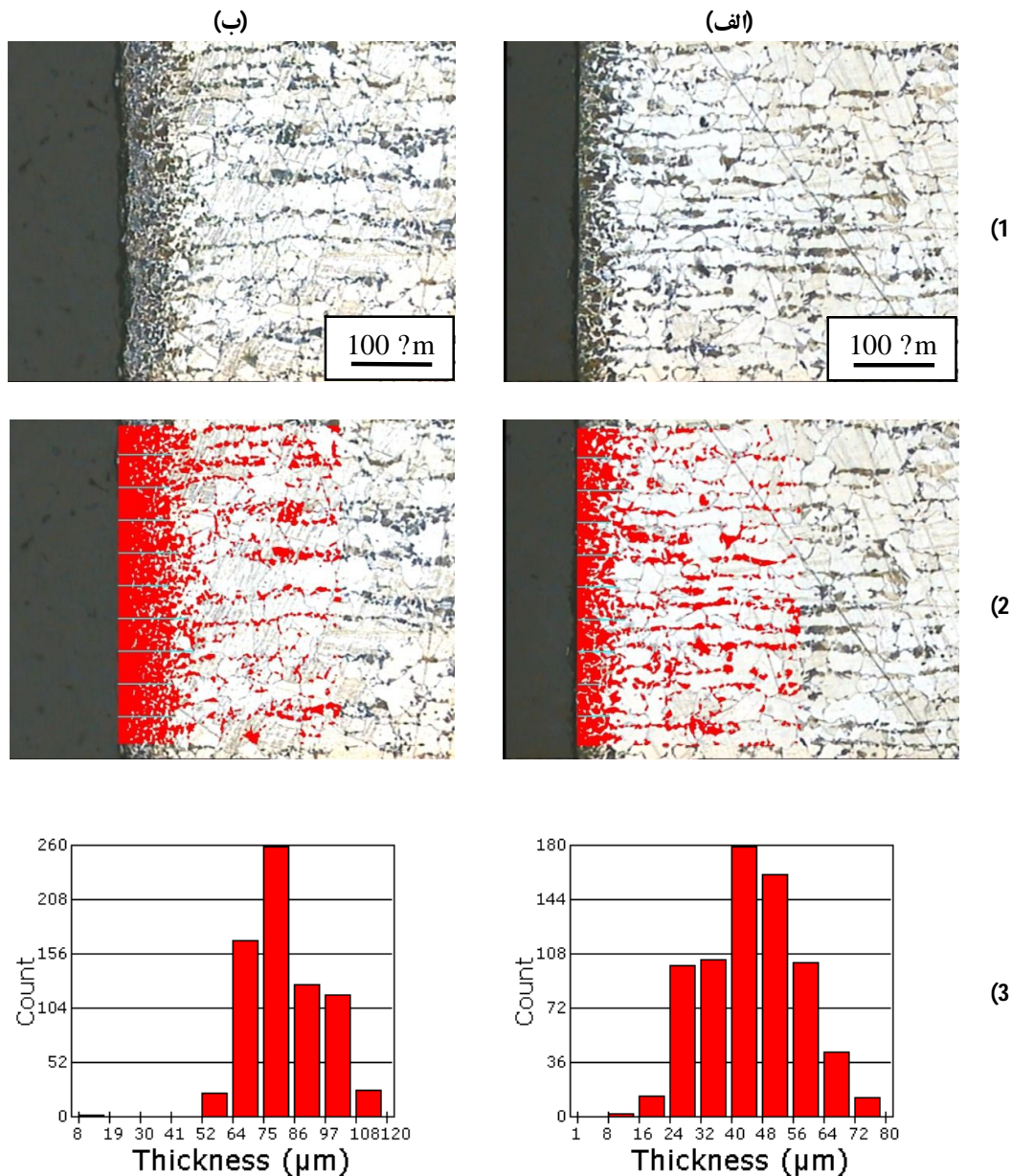
<sup>1</sup> Wavy bands

<sup>2</sup> Threshold

<sup>3</sup> Repeatability

مناسب ( $\pm 30\text{HV}$ ) نیز برخوردار باشد. لازم به ذکر است که خطای بیشتر مشاهده شده در سختی‌های نمونه، ناشی از ناهمگنی ساختار می‌باشد.

شکل 4 و 5 تغییرات سختی برای نمونه‌های کربن‌دهی شده در دمای 850 و 800 درجه سانتیگراد و به مدت 120 دقیقه را نشان می‌دهد. نتایج میکروسختی در نمونه‌های کربوره شده در دمای 800 درجه سانتیگراد و به مدت 15 دقیقه، بدلیل عمق کم لایه کربوره شده دارای خطای قابل توجهی بوده و به همین دلیل از ذکر نتایج آن خودداری شده است.



شکل 3 - نمونه کربن‌دهی شده در دمای 800 درجه سانتیگراد و به مدت 30 دقیقه

(الف) نمونه آسیاکاری نشده: (1) ریزساختار (2) پردازش اتوماتیک تصویر (3) توزیع فراوانی عمق لایه کربوره شده  
(ب) نمونه آسیاکاری شده به مدت 12 ساعت: (1) ریزساختار (2) پردازش اتوماتیک تصویر (3) توزیع فراوانی عمق لایه

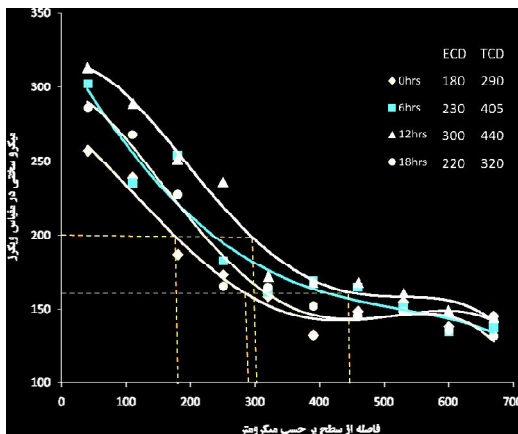
در اشكال 4 و 5، مقادير مربوط به عمق كل لايه كربوره شده<sup>1</sup> (TCD) و عمق موثر لايه كربوره شده<sup>2</sup> (ECD) نیز با توجه به منحنی تخمین زده شده است. عمق كل لايه كربوره شده (TCD) برابر فاصله از سطح مكاني در نظر گرفته شده است كه سختی نمونه تنها 10 درصد از سختی مغز نمونه بیشتر باشد و عمق موثر لايه كربوره شده (ECD) نیز با توجه به شرایط نمونه برابر عمقی كه سختی برابر 200 ویکرز است تعريف گردید. [19 و 20]

### ت) اندازه گیری اندازه دانه آستنیت اولیه

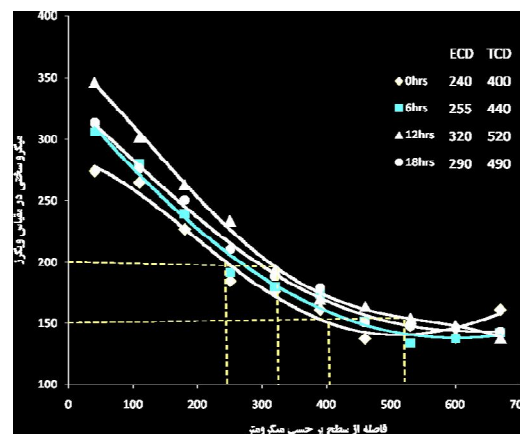
برای بررسی تاثیر اندازه دانه های آستنیت اولیه بر ضریب نفوذ کربن و عمق لایه کربن دهی شده، دانه های آستنیت در نمونه کربن دهی شده در دمای 850 درجه سانتیگراد آشکار گردید. برای محاسبه اندازه دانه از روش تقاطع (Intercept) طبق استاندارد ASTM-E112 استفاده شد. تصاویر تهیه شده توسط نرم افزار MIP پردازش گردید كه نتایج آن در جدول 2 نشان داده شده است. در جدول مذکور NL تعداد برخوردهای خطوط فرضی با مرزهای دانه در هر میلیمتر از طول خطوط فرضی، Dm قطر متوسط دانه و G عدد اندازه دانه ASTM می باشد.

جدول 2- اندازه دانه آستنیت در نمونه های کربن دهی شده در دمای 850 و برای مدت 120 دقیقه

شماره نمونه	مدت زمان آسیابکاری مکانیکی	NL (1/mm)	Dm (? m)	G
1	0 hrs	63.45	17.78	8.69
2	6 hrs	76.75	14.70	9.24
3	12 hrs	80.83	13.96	9.39
4	18 hrs	77.41	14.58	9.26



شكل 5- منحنی تغییرات سختی برای نمونه کربن دهی شده در دمای 800 درجه سانتیگراد و به مدت 120 دقیقه



شكل 4- منحنی تغییرات سختی برای نمونه کربن دهی شده در دمای 850 درجه سانتیگراد و به مدت 120 دقیقه

## بحث

نتایج بررسی‌های متالوگرافی و آزمون میکروسختی تمام نمونه‌ها در جدول 3 نمایش داده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود هر چند که مقادیر عمق کل لایه کربوره شده (TCD) و عمق موثر لایه کربوره شده (ECD) و مقادیر گزارش شده توسط بررسی‌های متالوگرافی دارای تفاوت زیادی با یکدیگر می‌باشند، اما تغییرات این پارامترها از روند یکسانی تبعیت می‌کند. تفاوت در اندازه‌گیری‌های ضخامت لایه کربوره شده پیش از این نیز در پژوهش‌های مختلف گزارش شده است. معمولاً ضخامت لایه اندازه‌گیری شده توسط بررسی‌های متالوگرافی از ضخامت کل اندازه‌گیری شده توسط آزمون میکروسختی (TCD) مقدار کوچکتری می‌باشد. [14]

همچنین ملاحظه می‌شود که عمق محاسبه شده توسط هر دو نرم‌افزار پردازش تصویر در حد مطلوبی با یکدیگر تطابق دارد. (در تمام موارد نتایج حاصل از این دو نرم‌افزار کمتر از 6 درصد با یکدیگر تفاوت دارند) برای مقایسه بهتر نتایج جدول 3، پارامتر ضریب بازدهی (K) برای هر یک از شرایط کربن‌دهی تعریف می‌شود. این پارامتر از تقسیم ضخامت لایه کربوره شده در هر یک از نمونه‌ها بر ضخامت لایه کربوره شده در نمونه آسیاکاری نشده حاصل می‌شود. برای محاسبه این ضریب از ضخامت اندازه‌گیری شده توسط نرم‌افزار MIP استفاده شده است. همانگونه که مشاهده می‌شود که بیشترین بازدهی مربوط به نمونه‌ی 12 ساعت آسیاکاری شده و سپس کربوره شده در دمای 800 درجه سانتیگراد، می‌باشد. در این نمونه عمق لایه کربوره شده در حدود 90 درصد نسبت به نمونه‌ی آسیاکاری نشده افزایش یافته است.

شکل 6 ضریب بازدهی عملیات کربن‌دهی را برای زمان‌های مختلف آسیاکاری مکانیکی نمایش می‌دهد. همانگونه که در این شکل ملاحظه می‌شود نمونه‌های 12 ساعت آسیاکاری شده، در تمام شرایط کربن‌دهی دارای بیشترین بازدهی می‌باشند. این مطلب با نتایج ناشی از مطالعات SEM و میکروسختی (شکل 2) که حاکی از وقوع بیشترین کارسرد در نمونه‌های 12 ساعت آسیاکاری شده می‌باشد تطابق دارد. پدیده فوق ناشی از ترد شدن سیکلی سطح بدلیل کارسختی، کنده شدن لایه ترد شده و تغییر شکل مجدد لایه سطحی در حین عملیات آسیاکاری مکانیکی می‌باشد.

جدول 3- نتایج حاصل از آسیاکاری مکانیکی و کربن‌دهی نمونه‌ها

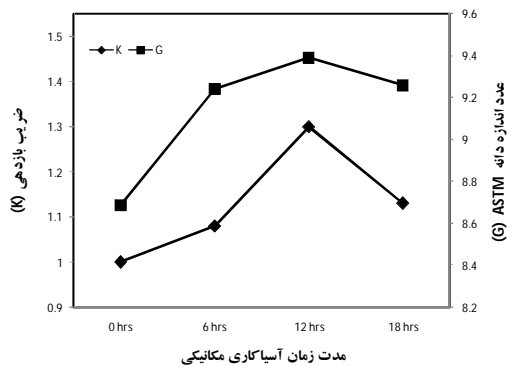
شماره نمونه	مدت زمان آسیاکاری مکانیکی	دمای کربن‌دهی	پردازش تصویر		مدت زمان کربن‌دهی	میکروسختی	
			CLEMEX (?m)	MIP (?m)		TCD (?m)	ECD (?m)
1	0 hrs	850 c°	325.6	316.03	120 min	400	240
2	6 hrs	850 c°	352.8	341.64	120 min	440	255
3	12 hrs	850 c°	389.5	411.61	120 min	520	320
4	18 hrs	850 c°	345.3	357.33	120 min	490	290
5	0 hrs	800 c°	100.24	102.54	120 min	290	180
6	6 hrs	800 c°	156.65	164.51	120 min	405	230
7	12 hrs	800 c°	205.18	194.55	120 min	440	300
8	18 hrs	800 c°	192.34	190.24	120 min	320	220
9	0 hrs	800 c°	49	46.54	15 min	---	---
10	6 hrs	800 c°	57.6	58.63	15 min	---	---
11	12 hrs	800 c°	82.4	84.33	15 min	---	---
12	18 hrs	800 c°	70	73.33	15 min	---	---



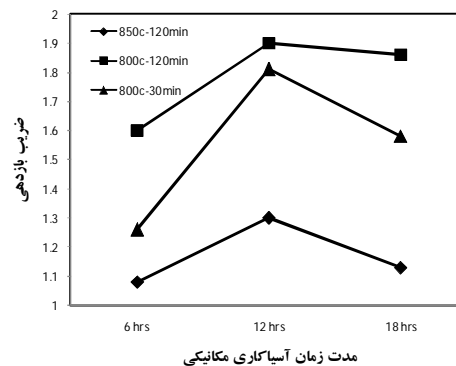
شکل 7 تغییرات ضریب بازدهی عملیات کربن دهی و تغییرات اندازه دانه آستنیت اولیه را برای نمونه های کربوره شده در دمای 850 درجه سانتیگراد و به مدت 120 دقیقه، نمایش می دهد. همانگونه که انتظار می رود با کاهش اندازه دانه آستنیت به دلیل آسیاکاری مکانیکی، عمق لایه کربوره شده نیز افزایش می یابد.

از آنجا که اندازه دانه آستنیت در نمونه های آسیاکاری شده به مدت 12 ساعت کوچکتر بوده و از طرفی عمق لایه تغییر شکل یافته در این نمونه ها بیشتر است، می توان نتیجه گرفت که افزایش عمق نفوذ کربن در نمونه های 12 ساعت آسیاکاری شده ناشی از کارسرد بیشتر در سطح و در نتیجه ریزدانه شدن بیشتر آستنیت در این نمونه ها می باشد. علاوه بر این افزایش عیوب سطحی در زمان های اولیه کربن دهی مکانیزم محتمل دیگر برای افزایش عمق لایه کربوره شده می باشد.

با توجه به کاهش اندازه دانه آستنیت در اثر آسیاکاری مکانیکی اولیه، همچنین پیش بینی می شود در صورت کوئنچ مستقیم نمونه پس از عملیات کربن دهی، بدلیل تشکیل ساختار ریزتری از مارتنزیت و کاهش دانسیته میکروترک ها در ساختار، شاهد بهبود خواص مکانیکی خصوصا مقاومت خستگی نمونه نسبت به نمونه های مشابه باشیم. [21]



شکل 7- منحنی تغییرات ضریب بازدهی و اندازه دانه برای نمونه های کربن دهی شده در دمای 850 درجه سانتیگراد



شکل 6- منحنی تغییرات ضریب بازدهی عملیات کربن دهی برای زمان های مختلف آسیاکاری

## نتیجه گیری

1. با بهره گیری از آسیا کاری سطحی به عنوان یک عامل ایجاد تغییر شکل شدید در سطح فولاد، ضخامت لایه کربوره شده نسبت به نمونه کربوره نشده تا نزدیک به دو برابر افزایش یافت.
2. با مقایسه اندازه دانه آستنیت در نمونه های آسیا کاری شده و آسیا کاری نشده در می یابیم که ریز دانه شدن ساختار در سطح نمونه یکی از مکانیزم های اصلی افزایش ضریب نفوذ کربن در نمونه های آسیا شده می باشد.
3. بیشترین بازدهی برای عملیات کربن دهی در نمونه 12 ساعت آسیا کاری شده و کربن دهی شده در دمای 800 درجه سانتیگراد بدست آمد.
4. بررسی های SEM سطح نمونه های آسیا کاری شده و همچنین مقایسه عمق لایه کربوره شده در نمونه های آسیا کاری شده برای مدت زمان های مختلف، حاکی از تغییر ضخامت لایه تغییر شکل یافته در زمان های مختلف آسیا کاری می باشد. این اتفاق بدلیل ترد شدن دوره ای سطح نمونه ها و کنده شدن لایه ی کار سرد شده به وسیله ی گلوله های آسیا رخ می دهد.

## تشکر و قدردانی

نویسندگان بدین وسیله از شرکت نهایم پردازان آسیا به جهت در اختیار قرار دادن نرم افزار پردازش تصویر MIP در طی مراحل پژوهش، قدردانی می نمایند. همچنین از جناب آقای دکتر فاضلی و جناب آقای مهندس ظهور کریمی به جهت راهنمایی های راهگشایشان در طول پروژه، تشکر می شود.

## مراجع

1. Fan-Shiong Chen and Kuo-Liang Wang, "Super-carburization of low alloy steel and low carbon steel by fluidized-bed furnaces", *Surface and Coatings Technology*, 132, 2000, 36-44.
2. H. Mehrer, *Diffusion in Solids*, 2007, New York, Springer Berlin Heidelberg.
3. D. Manova, S. Mandl, H. Neumann and B. Rauschenbach, "Influence of grain size on nitrogen diffusivity in austenitic stainless steel", *Surface & Coatings Technology*, 201, 2007, 6686-6689.
4. O.D. Sherby and J. Wadsworth, "Superplasticity-Recent Advances and Future Directions", *Prog. Mater. Sci*, 33, 1989, p. 169.
5. N. Kamikawa, N. Tsuji, Y. Minamino, "Microstructure and texture through thickness of ultralow carbon IF steel sheet severely deformed by accumulative roll-bonding", *Science and Technology of Advanced Materials*, 5, 2004, 163-172.
6. Rajib Saha, R.K. Ray, "Formation of nano- to ultrafine grains in a severely cold rolled interstitial free steel", *Materials Science and Engineering A*, 459, 2007, 223-226.
7. J. Majta, K. Muszka, "Mechanical properties of ultra fine-grained HSLA and Ti-IF steels", *Materials Science and Engineering A*, 464, 2007, 186-191.
8. M. Umemoto, B. Huang, K. Tsuchiya, N. Suzuki, "Formation of nanocrystalline structure in steels by ball drop test", *Scripta Materialia*, 46, 2002, 383-388.
9. X. Y. Wang and D. Y. Li, "Mechanical, electrochemical and tribological properties of nano-crystalline surface of 304 stainless steel", *Wear* 255, 2003, 836-845.
10. M. Sato, N. Tsuji, Y. Minamino and Y. Koizumi, "Formation of nanocrystalline surface layers in various metallic materials by near surface severe plastic deformation", *Science and Technology of Advanced Materials*, 5, 2004, 145-152.
11. T. Hanlon, Y.-N. Kwon, S. Suresh, "Grain size effects on the fatigue response of nanocrystalline metals", *Scripta Materialia*, 49, 2003, 675-680.
12. Baojun Han, Zhou Xu, "Martensite microstructure transformed from ultra-fine-grained Fe-32%Ni alloy austenite", *Materials Science and Engineering A*, 487, 2008, 64-67.
13. پویا ولی‌زاده، میثم شیخ‌امیری و جلیل وحدتی خاکی، روشی نوین برای رسوب سختی سطحی آلیاژهای آلومینیوم، دومین همایش مشترک انجمن مهندسين متالورژی ايران و جامعه ريخته گران ايران، دانشگاه آزاد اسلامی واحد کرج، آبان‌ماه 1387.
14. Vander Voort, *Materials science and engineering series, Metallography Principles and Practice ...*
15. Z.G. Liu, X.J. Hao, K. Masuyama, K. Tsuchiya, M. Umemoto and S.M. Hao, "Nanocrystal formation in a ball milled eutectoid steel", *Scripta mater*, 44, 2001, 1775-1779.
16. Y. Xu, M. Umemoto, K. Tsuchiya, "Comparison of nano crystalline Ferrite in Fe-0.89C steels with pearlite and spheroidite structure produce by ball milling", *Materials Transactions*, 43, 2002, 2205-2212.
17. ASTM G79-83
18. ASTM B487-85
19. ASTM B721-91

20. L. Liu, F. Chen, "The influences of alloy elements on the carburized layer in steels using vacuum carburization in an acetylene atmosphere", *Materials Chemistry and Physics*, 82, 2003, 288–294.
21. K. Genel, M. Demirkol, "Effect of case depth on fatigue performance of AISI 8620 carburized steel", *International Journal of Fatigue*, 21, 1999, 207–212.