

تأثیر هندسه قطعات بر رفتار نیتروژن دهی پلاسمایی به روش معمولی و توری فعال در فولاد گرم

کار AISI H13

کیانوش طاهر خانی^{۱*} و فرزاد محبوبی^۲

چکیده

این مقاله به تأثیر پارامترهای نیتروژن دهی، فرکانس و چرخه کاری بر قطعات با هندسه پیچیده در دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی معمولی و نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال می‌پردازد. در این پژوهش عملیات نیتروژن دهی در دمای 500 °C، چرخه‌های کاری 40٪، 60٪، 80٪ و فرکانس‌های 8 و 10 کیلو هرتز روی نمونه‌های شیار دار از جنس AISI H13 با ضخامت‌های شیار 2، 4، 6، 8، 10 میلی متر به مدت 5 ساعت به دو روش معمولی و توری فعال انجام گرفت. تمامی نمونه‌های عملیات شده به کمک آزمایش‌های متالوگرافی، ریز سختی سنجی، زبری سنجی، میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM) و آنالیز پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج آزمایش نشان دادند که زبری و سختی سطح در هر دو روش با افزایش چرخه کاری زیاد می‌شود. در روش نیتروژن دهی پلاسمایی معمولی در چرخه کاری 80٪ و با ضخامت شیار 2 میلی متر پدیده کاتد توخالی رخ می‌دهد که منجر به بیش گرمایش نمونه شده و در نتیجه، باعث افزایش زبری سطح و کاهش سختی سطح می‌شود. این پدیده در روش نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال رخ نمی‌دهد. ریخت شناسی سطح نمونه‌های نیتروژن پلاسمایی شده به روش معمولی شامل ذرات گل کلمی شکل می‌باشد. در حالی که نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش توری فعال از ذرات نیتريدی به شکل هگزاگونال با توزیع یکنواخت پوشیده شده‌اند. هم‌چنین، نتایج XRD نشان داد که در هر دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی روی کلیه سطوح فازهای ϵ و γ' تشکیل می‌شود.

واژه‌های کلیدی: چرخه کاری، فرکانس، نیتروژن دهی پلاسمایی معمولی، نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال.

1- کارشناسی ارشد مهندسی مواد و متالورژی، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر .

2- دکترای مهندسی مواد و متالورژی، دانشیار، گروه مهندسی مواد و متالورژی، دانشگاه صنعتی امیرکبیر.

*- نویسنده‌ی مسئول مقاله: kiyanoosh@aut.ac.ir

پیشگفتار

فولادهای ابزار گروهی از فولادهای کربنی و فولادهای آلیاژی هستند که با عملیات حرارتی آنها می‌توان ویژگی‌های فیزیکی و مکانیکی بهینه‌ای در آنها بوجود آورد، به گونه‌ای که بتوان از آنها ابزارهایی نظیر ابزارهای برشی سنبه و ماتریس‌های برش، خم‌کاری، فرم دادن، کشش، قالب‌های پلاستیک، دایکست و اکستروژن ساخت. برخی از ویژگی‌های مطلوب فولادهای ابزار مقاومت سایشی و سختی زیاد، مقاومت گرمایی خوب و استحکام کافی برای کار روی مواد است. فولادهای گرم کار کرم دار $5\%Cr$ مثل H11, H12, H13 سختی پذیری زیادی دارند و مقاطع نسبتاً بزرگ این فولادها را می‌توان با حداقل تغییر ابعاد با سرد کردن در هوا سخت کرد. درصد نسبتاً زیاد سیلیسیم در نوع H13 برای بهبود مقاومت به اکسایش در دمای آستینیتی است. در این آلیاژها به دلیل داشتن $5\%Cr$ و $1/5\%Mo$ در محلول جامد زمان لازم برای رسوب کاربیدها کوتاه است. نیتروژن دهی پلاسمایی یکی از فرایندهای اصلاح ساختار سطوح فلزات است که موجب بهبود مقاومت سایشی، خوردگی و خستگی قطعات صنعتی شده و در نتیجه، منجر به افزایش عمر و کارایی بهتر آنها می‌شود [2,1]. بسیاری از انواع نیتروژن دهی وجود دارد که شامل: نیتروژن دهی پلاسمایی پالسی، نیتروژن دهی پلاسمایی با فشار کم، نیتروژن دهی سنتی و غیره می‌باشد. عملیات نیتروژن دهی فولادها به گونه‌ی سنتی هنوز هم به وسیله‌ی یکی از روش‌های گازی یا مایع انجام می‌پذیرد، اما استفاده از پلازما در عملیات نیتروژن دهی با کنترل بهتر فازهای سطحی تشکیل شونده و کیفیت بهتر سطوح قطعات، سبب کاهش مصرف گاز، کاهش انرژی مصرفی و کاهش خطرات زیست محیطی می‌شود [3,4]. امروزه نیتروژن دهی پلاسمایی متداول بیش‌ترین کاربرد را در نیتروژن دهی فولاد دارد. با وجود تمام مزایایی که روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول¹ (CPN) نسبت به روش‌های سنتی نیتروژن دهی دارد، مشکلاتی از قبیل: نگهداری و حفظ یکنواختی دما در محفظه ورودی قطعه، محدودیت انجام عملیات روی قطعات با اشکال پیچیده، ایجاد لایه‌ی نا یکنواخت در

سطح قطعه، خطر آسیب قوس و پدیده‌ی کاند توخالی در طی انجام فرایند دیده می‌شود [5]. تلاش‌هایی که بمنظور بر طرف کردن کاستی‌های این روش صورت گرفته، ضمن این‌که منجر به توسعه‌ی روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول و ابداع روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال² (ASPN) یا TC^3 شده است. اساس روش کار عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال همانند روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول است، با این تفاوت که در روش نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال، با وصل شدن توری به قطب منفی و تشکیل پلازما روی سطح توری نه روی سطح قطعه کار وظیفه تولید اجزای فعال نیتروژن و هم چنین، گرم کردن نمونه‌ها که نسبت به کاتد در پتانسیل خنثی قرار دارد، بر عهده توری فعال است [5,6]. نشان داده شد که نیتروژن دهی به روش توری فعال می‌تواند نتایج مشابهی با نیتروژن دهی پلاسمایی متداول داشته باشد و با این حال، مشکلات موجود در روش نیتروژن دهی متداول نظیر آسیب ناشی از قوس سطح، اثر لبه و هم چنین، اثر پدیده‌ی کاند توخالی را بر طرف می‌نماید [5]. با توجه به مشکلاتی که در نیتروژن دهی قطعات با شیارهای نازک و عمیق وجود دارد و نیاز به کیفیت سطحی بالا در قالب‌های اکستروژن و دایکست که معمولاً هندسه پیچیده دارند، کنترل عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی با تغییر پارامترهای تأثیرگذار آن می‌تواند صرفه جویی اقتصادی را افزایش دهد. هدف اصلی از این پژوهش، مطالعه و بررسی تأثیر پارامترهای فرکانس و چرخه کاری در روش نیتروژن پلاسمایی پالسی به روش معمولی و توری فعال بر قطعات با هندسه پیچیده از جنس فولاد گرم کار H13 که فولاد مورد نیاز قالب‌های اکستروژن می‌باشد و تاکنون مورد بررسی قرار نگرفته، می‌باشد.

مواد و روش پژوهش

ابتدا نمونه‌های مکعبی با ابعاد $60 \times 40 \times 30$ میلی مترمکعب با استفاده از عملیات ماشین کاری از جنس فولاد گرم کار AISI H13، DIN1/2344 با ترکیبی که

² - Acture Screen Plasma Nitriding

³ - Through Cage

¹ - Conventional Plasma Nitriding

عایق سرامیکی آن را از پتانسیل منفی (کاتد) جدا می‌کند، قرار داده شدند. سپس توری ساخته شده پس از چربی زدایی، اسید شویی در محلول فروکیلین و خشک کردن، روی سکوی موجود در محفظه دستگاه قرار گرفت. در روش نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال، با وصل شدن توری به قطب منفی (کاتد) پلاسمای روی سطح توری تشکیل می‌شود. هم چنین، تولید اجزای فعال نیتریدی و هم چنین، گرم کردن نمونه‌ها بر عهده توری فعال می‌باشد. در نهایت، ویژگی‌های سطحی، ساختار و فازهای تشکیل شده روی نمونه‌های نیتروژن دهی شده با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی (SEM)، ریز سختی سنجی، زبری سنجی و آنالیز پراش اشعه‌ی ایکس (XRD) مورد بررسی قرار گرفت. پس از عملیات نیتروژن دهی نمونه‌های عملیات شده را از لبه شیار تا ته شیار به فاصله 1 cm جدا کرده و به ترتیب از بالا (لبه شیار) مناطق را با نام‌های A, B, C, D نام‌گذاری کرده و هم چنین، در این گزارش نتایج مربوط به منطقه‌ی A نزدیک لبه شیار برای زبری سنجی، SEM و XRD گزارش شده است.

نتایج و بحث

شکل (3) نتایج زبری سنجی سطوح شیارها که به روش توری فعال نیتروژن دهی پلاسمایی شده‌اند را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت شیار از 2 به 10 میلی متر زبری سطح نمونه‌ها از $0.22-0.24$ به $0.46-0.48$ μm در چرخه کاری 80٪ و فرکانس 8 kHz افزایش می‌یابد. دلیل آن می‌تواند حضور بیش‌تر نیتروژن، در نتیجه‌ی برخورد بیش‌تر یون‌های پر انرژی موجود در محیط پلاسمای با سطح توری پیرامون نمونه باشد. در نتیجه، به دلیل برخورد یون‌های نیتروژن با آهن در فضای اطراف سطح توری فاز نیترید آهن بیش‌تری تشکیل می‌شود. بخشی از این فازهای نیتریدی تشکیل شده به صورت رسوب دوباره روی سطح توری قرار می‌گیرند و بخشی دیگر از سوراخ‌های موجود در توری استوانه‌ای و در پوشش مشبک عبور کرده و روی سطح نمونه مورد عملیات رسوب می‌کنند. هم چنین، با حضور بیش‌تر نیتروژن، ذرات نیتریدی بزرگ‌تر شده و

جدول 1 نشان داده شده آماده گردیده سپس در نمونه‌های آماده شده به شکل مکعب مستطیل، شیارهایی با ارتفاع ثابت 40 میلی متر، پهنای ثابت 20 میلی متر و ضخامت‌های متغیر 2، 4، 6، 8 و 10 میلی متر که در شکل (1) با (t) نشان داده شده در آن ایجاد شد. دلیل استفاده از نمونه‌هایی با ضخامت‌های شیار گوناگون به نوعی شبیه‌سازی قالب‌های اکستروژن و دایکست که شکل هندسی پیچیده‌ای دارند و دارای حفره‌های با ابعاد متفاوت‌اند و باید در معرض عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی قرار گیرند، می‌باشد. هم چنین، بمنظور کنترل دقیق درجه حرارت در حین فرآیند نیتروژن دهی پلاسمایی، درون نمونه‌ها محلی برای تعبیه ترموکوپل در نظر گرفته شد که در شکل (1) با پیکان نشان داده شده است. شکل (1) شمایی از نمونه تهیه شده را نشان می‌دهد. سطح مورد بررسی در این پژوهش سطح قسمت مشخص شده در قسمت (ب) شکل (1) می‌باشد. پس از آماده شدن نمونه‌ها، آن‌ها را در دمای 1050°C به مدت 1 ساعت آستینته کرده و بلافاصله در روغن کوئچ شدند. جهت جلوگیری از هرگونه تغییر در ساختار فولاد هنگام نیتروژن دهی پلاسمایی، دمای تمپر بالاتر از دمای نیتروژن دهی در نظر گرفته شد و نمونه‌ها در دمای 530°C به مدت 1 ساعت تمپر شدند. سختی نمونه‌ها 54-57 راکول سی شد. سپس تمامی سطوح نمونه‌ها با استفاده از روش‌های متالوگرافی بمنظور ایجاد سطوح صاف برای عملیات نیتروژن دهی، سنباده و پولیش شدند. جهت انجام عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی به روش معمولی و توری فعال، از دستگاه نیتروژن دهی پلاسمایی متداول که در دانشگاه صنعتی امیر کبیر طراحی و ساخته شده، استفاده شد شکل (2). نمونه‌ها در اتمسفر حاوی 25N_2 ٪- 75H_2 ٪ در دمای 500°C با فرکانس‌های 8 و 10 kHz، در چرخه‌های کاری 40٪، 60٪ و 80٪ برای مدت زمان 5 ساعت نیتروژن دهی پلاسمایی شدند. برای عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال، ورق مشبکی از جنس فولاد ساده‌ی کربنی به ضخامت 0/8 میلی متر که حاوی سوراخ‌های با توزیع یکنواخت به قطر 8 میلی متر به صورت استوانه‌ای تهیه شد. درپوش بکار رفته نیز از ورق مشبک تهیه شد. نمونه‌ها روی میز کار که یک

زبری سطح بیش تر می شود. شکل (4) نتایج زبری سنجی سطوح شیارهایی که به روش متداول (معمولی) نیتروژن دهی پلاسمایی شده اند را نمایش می دهد. مشاهده می شود که با افزایش ضخامت شیار از 4 به 10 میلی متر زبری سطح نمونه ها از $(0/39-0/41) \mu\text{m}$ به $(0/52-0/54) \mu\text{m}$ در چرخه کاری 80٪ و فرکانس 8 kHz افزایش پیدا می کند. دلیل آن می تواند حضور بیش تر نیتروژن، در نتیجه ی کندوپاش بیش تر سطح نمونه ها باشد. هم چنین، با حضور بیش تر نیتروژن، ذرات نیتریدی تشکیل شده در سطح بیش تر و بزرگ تر شده در نتیجه زبری سطح بیش تر می شود [7]. در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول نکته ی قابل توجهی در زبری سطح نمونه با چرخه کاری 80٪ و ضخامت شیار 2 میلی متر دیده می شود. مقدار زبری سطح این نمونه در دمای 500°C و فرکانس 8 kHz برابر $0/56 \mu\text{m}$ (بیش ترین مقدار زبری سطح) می باشد. دلیل آن می تواند بیش گرمایش نمونه در اثر پدیده کاتد تو خالی باشد. به دلیل کوچک بودن ضخامت شیار، پلاسمای در دو طرف شیار هم پوشانی کرده و باعث گیر افتادن الکترون ها و یونیزاسیون بیش تر می شود. در نتیجه کندوپاش سطح بیش تر و زبری سطح افزایش می یابد. در هر دو روش مقدار زبری برای چرخه کاری 60٪ و 80٪ نسبتاً بالا و برای 40٪ نسبتاً پایین است. از سوی دیگر، زبری سطح با افزایش چرخه کاری افزایش می یابد. هم چنین، با افزایش فرکانس نیز زبری سطح افزایش می یابد. بر اساس گزارش ها افزایش اتم های طبیعی و مولکول های پایدار اتم نیتروژن سبب تشدید بمباران یونی، نفوذ سریع نیتروژن و کندوپاش می شود. در نتیجه، با افزایش فرکانس و چرخه کاری، زبری سطوح افزایش یابد. در مقایسه با روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول زبری سطوح نمونه های نیتروژن دهی پلاسمایی شده با توری فعال کمتر و سطوح نمونه ها یکنواخت تر است. هم چنین، اثر پدیده ی کاتد تو خالی مشاهده نمی شود [3].

در شکل های (5) و (6) نتایج ریز سختی از لبه ی شیار تا ته شیار نمونه های نیتروژن دهی شده به روش متداول و توری فعال در فرکانس 8 kHz، دمای 500°C در چرخه های کاری 40٪ و 80٪ نمایش داده می شود. مشاهده می شود که با افزایش ضخامت شیار از 2 به 10

میلی متر سختی سطح شیار در همه ی نمونه ها افزایش می یابد. از آن جایی که غلظت نیتروژن درون شیار با ضخامت 10 میلی متر، بیش تر است، درصد نیتریدهای تشکیل شده در آن بیش تر می شود. این موجب افزایش سختی سطح در ضخامت 10 میلی متر می شود. با توجه به نتایج بدست آمده، سختی سطح در نمونه ی نیتروژن دهی شده به روش متداول با ضخامت شیار 2 میلی متر و با چرخه کاری 80٪ کم ترین مقدار سختی را نمایش می دهد. علت این امر اثر پدیده ی کاتد تو خالی بوده همان گونه که گفته شد، سطح این نمونه بیش گرم شده و باعث رشد ناگهانی ذرات نیتریدی می شود. در نتیجه، سختی سطوح کاهش می یابد [8]. هم چنین، مشاهده می شود که در هر دو روش نیتروژن دهی متداول و توری فعال با افزایش چرخه کاری از 40٪ به 80٪ سختی سطح افزایش می یابد. به دلیل این که با افزایش چرخه کاری انرژی یون ها و فعالیت آن ها بیش تر می شود و ضریب نفوذ نیتروژن افزایش پیدا می کند و با افزایش ضریب نفوذ، نیتروژن تا عمق بیش تری از سطح نفوذ کرده و باعث می شود نیترید آهن و عناصر آلیاژی بیش تری تشکیل شود که این امر موجب زیاد شدن سختی می شود. با افزایش فرکانس سختی سطوح به گونه ی ناچیزی کاهش می یابد [9]. هم چنین مشاهده می شود که سختی سطح نمونه های نیتروژن دهی شده به روش متداول بیش تر از سختی سطح نمونه هایی است که به روش توری فعال نیتروژن دهی شده اند [7]. سختی در مناطق نزدیک لبه بیش تر است. علت آن نفوذ بیش تر نیتروژن به سطح قطعه در این بخش می باشد. چون در نزدیکی لبه نسبت سطح به حجمی که در معرض پلاسمای بوده، بیش تر است، این باعث شده نیتروژن بیش تری به سطح نفوذ کند. هم چنین، سختی به ترتیب از A تا D کاهش می یابد که نشان می دهد نفوذ نیتروژن به درون شیار از لبه به ته شیار کاهش می یابد و این تأثیر در حفره هایی با پهنای شیار کم تر، بیش تر مشهود است.

در شکل (7) تصاویر SEM با بزرگ نمای 2000 از نمونه های نیتروژن دهی شده به روش متداول در چرخه کاری 80٪، فرکانس 8 kHz و در دمای ثابت 500°C در ضخامت های شیار 2، 6 و 10 میلی متر نمایش داده

شیار و کندوپاش بیش‌تر سطح با افزایش ضخامت باشد [8]. به گونه‌ی مشابه در نمونه‌های عملیات شده به روش توری فعال مقدار نیتريد آهن با بزرگ‌تر شدن ضخامت شیار افزایش می‌یابد. با این حال، نیتريد‌های آهن تشکیل شده در سطح نمونه با ضخامت شیار 2 میلی متر بسیار ناچیزند و به وسیله‌ی XRD مشاهده نمی‌شود و تنها پیک α -Fe به وضوح مشاهده می‌شود. هم چنین، با مقایسه‌ی نتایج XRD نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش متداول و توری فعال مشاهده می‌شود که شدت فاز ϵ در روش توری فعال نسبت به روش متداول کاهش می‌یابد و بر عکس شدت فاز γ' افزایش می‌یابد. علت این امر حضور بیش‌تر نیتروژن و نیتريد‌های آن درون شیارها در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول می‌باشد [9]. در کل، نتیجه‌ای که بدست آمد این است که نیتروژن دهی پلاسمایی به روش توری فعال به علت جلوگیری از بوجود آمدن پدیده‌ی کاتد توخالی، ایجاد لایه‌ی یکنواخت در سطح، تشکیل فازهای نیتريدی به گونه‌ی یکنواخت و منظم در سطح و امکان نیتروژن دهی کردن قطعات با شیارهای نازک و عمیق نسبت به روش متداول (معمولی) برتری دارد.

نتیجه گیری

- 1- زبری سطح در هر دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی با افزایش ضخامت شیار، فرکانس و چرخه کاری به دلیل افزایش نیتريد‌های آهن تشکیل شده در سطح شیارها و درشت شدن رسوبات تشکیل شده بیش‌تر می‌شود.
- 2- در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول زبری سطح نمونه با ضخامت شیار 2 میلی متر و چرخه کاری 80٪ برابر $0/56 \mu\text{m}$ (بیش‌ترین مقدار) می‌باشد زیرا پدیده‌ی کاتد توخالی باعث بیش گرم شدن نمونه و درشت شدن ناگهانی ذرات نیتريدی گل کلمی شکل می‌شود.
- 3- در هر دو روش نیتروژن دهی پلاسمایی سختی سطح شیارها با افزایش ضخامت شیار و افزایش چرخه کاری بیش‌تر می‌شود زیرا غلظت نیتروژن درون شیارها و درصد نیتريد‌های تشکیل شده نیز بیش‌تر شده که این موجب افزایش سختی سطح می‌شود. سختی سطح نمونه‌های

می‌شود. در شکل (8) نیز تصاویر SEM با بزرگ‌نمایی 5000 از نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش توری فعال در چرخه کاری 80٪، فرکانس 8 kHz، دمای ثابت 500°C در ضخامت‌های شیار 2، 6 و 10 میلی متر نمایش داده می‌شود. با توجه به شکل‌های (7) و (8) مشاهده می‌شود که سطح نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول به وسیله‌ی ذرات گل کلمی و سطح نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش توری فعال با ذرات نیتريدی هگزاگونالی پوشیده شده است. هم چنین، مشخص شده که ذرات گل کلمی شکل بوجود آمده در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول ناشی از کندوپاش و باز رسوب اتم‌های سطح به وسیله‌ی اتم‌ها یا یون‌های نیتروژن در طی این فرایند می‌باشد. در هر دو روش نیتروژن دهی مشاهده می‌شود که با افزایش ضخامت شیار از 6 به 10 میلی متر ذرات نیتريدی درشت‌تر، سطح فلز نا هموارتر و زبرتر می‌شود و هم چنین، با کاهش آن سطح هموارتر و ذرات نیتريدی کوچک‌تر می‌شود. مشاهده می‌شود که سطوح نیتروژن دهی شده به روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال هموارتر و یکنواخت‌تر از سطوح نیتروژن دهی شده به روش متداول می‌باشد [10، 11]. هم چنین، اثر پدیده‌ی کاتد توخالی در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول در ضخامت شیار 2 میلی متر و چرخه کاری 80٪ باعث شده اندازه‌ی ذرات گل کلمی شکل در شیار 2 میلی متر بزرگ‌تر و درشت‌تر از شیار 10 میلی متر شود. با توجه به تصاویر SEM نمونه‌های عملیات شده به روش توری فعال مشاهده می‌شود که اثر پدیده‌ی کاتد توخالی در شیار 2 میلی متر در چرخه کاری 80٪ رخ نمی‌دهد [7]. شکل‌های (9) و (10) نتایج XRD نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش معمولی و توری فعال در دمای 500°C ، فرکانس 8 kHz و چرخه کاری 80٪ در ضخامت‌های شیار 2، 6، و 10 میلی متر را نمایش می‌دهند. در سطح همه نمونه‌ها فازهای Fe_4N ، γ' و ϵ : Fe_{2-3}N تشکیل می‌شود [12، 13]. با افزایش ضخامت شیار در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول مقدار فاز ϵ (فاز غنی از نیتروژن) افزایش پیدا می‌کند. این امر می‌تواند به دلیل افزایش حضور بیش‌تر نیتروژن درون

5- در سطح کلیه‌ی نمونه‌ها فازهای γ' :Fe₄N و ϵ :Fe₂ تشکیل شده است. با افزایش ضخامت شیار شدت فاز ϵ به γ' افزایش می‌یابد. در سطح نمونه عملیات شده با توری فعال با ضخامت 2 میلی‌متر فقط فاز α مشاهده می‌شود.

عملیات شده در روش (CPN) بیش‌تر از سختی سطح در روش (ASPEN) می‌باشد.

4- سطح نمونه‌های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش متداول به وسیله‌ی ذرات گل کلمی و سطح نمونه‌های نیتروژن دهی شده به روش توری فعال با ذرات نیتريدی هگزاگونالی با توزیع یکنواخت پوشیده شده است.

منابع

1- M. Karakan, A. Alsaran and A. Celik, "Effects of Various Gas Mixtures on Plasma Nitriding Behavior of AISI 5140 Steel", Material characteristics, Vol. 49, pp. 241-6, 2003.

2- B. Y. Jeong and M. H. Kim, "Effects of the Process Parameters on the Layer Formation Behavior of Plasma Nitrided Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 141, pp. 182-6, 2001.

3- Goo-Hwan Jeong, Min-Sun Hwang, Yong Jeong, Myun-Hokim and Chong Lee, "Effect of the Duty Factor on the Surface Characteristics of the Plasma Nitride and Diamond-Like Carbon Coated High-Speed Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 124, pp. 222-227, 2000.

4- G. Nayal, DB. Lewis, M. Lembke and E. Cockremje, "Influence of Sample Geometry on the Effect of Pulse Plasma Nitriding of M2 Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 57, pp. 147, 1999.

5- CZ. Li and T. Bell, "Principals Mechanisms and Applications of Active Screen Plasma Nitriding", Heat Treatment of Metal, Vol. 30, pp. 1-7, 2003.

6- J. Gorges, "TC Plasma Nitriding", Plasma Metal, proceeding of 12th IFHTSE Congress, Melbourne, Australia, International Federation of Heat Treating and Surface Engineering, Vol. 3, pp. 225-229, 2000.

7- Z. Soltani Asadi and F. Mahboubi, "Effect of Component Geometry on the Plasma Nitriding Behavior of AISI 4340", Materials and Design, pp. 1-6, 2011.

8- SH. Ahangarani and F. Mahboubi, AR.Sabour, "Effect of Various Nitriding Parameters on Active Screen Plasma Nitriding Behavior of a Low-Alloy Steel", Vacuum, Vol. 1032, pp. 1-7, 2006.

9- Bong-Yong Jeong and Myung-Ho kim, "Effect of Pulse Frequency and Temperature on the Nitride Layer and Surface Characteristics of Plasma Nitrided Stainless Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 137, pp. 249-254, 2001.

10- C. Zaho, CX. Li, H. Dong and T. Bell, "Study on the Active Screen Plasma Nitriding and it is Nitriding Mechanism", Surface and Coatings Technology, Vol. 201, pp. 15-20, 2006.

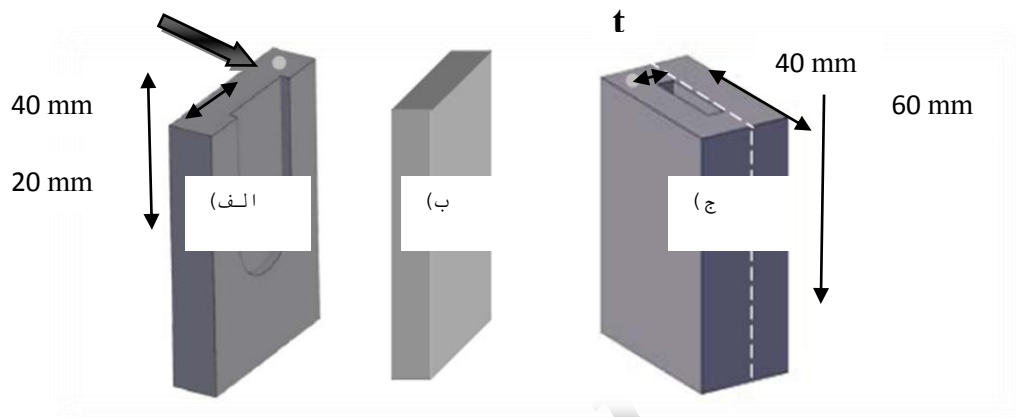
11- SH. Ahangarani, AR. Sabour and F. mahboubi, "Surface Modification of 30 Cr Ni Mo8 Low-Alloy Steel by Active Screen Step and Conventional Plasma Nitriding Methods", Surface and Coatings Technology, Vol. 254, pp. 27-35, 2007.

12- A. Nishimoto, K. Nagatsuka, R. Narita, H. Nii and K. Akamatsu, "Effect of the Distance between Screen and Sample on Active Acreen Plasma Nitriding Properties", Surface and Coatings Technology, Vol. 205, pp. 365-8, 2010.

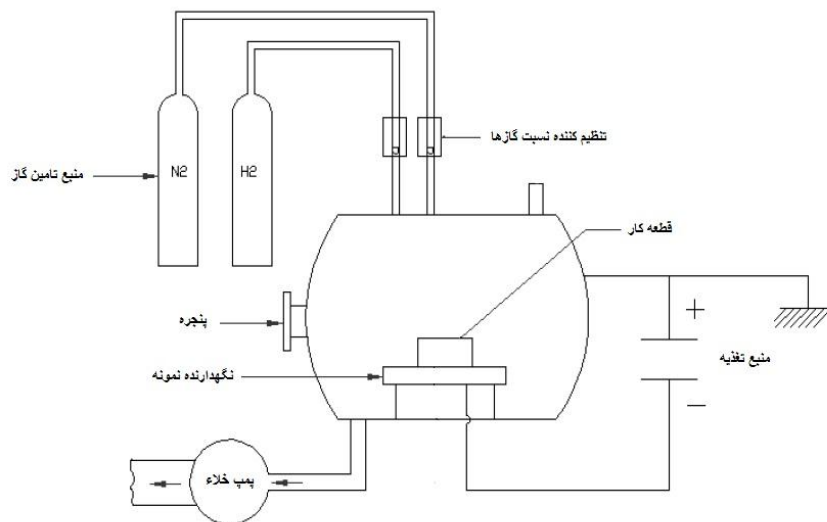
13- F. Mahboubi, M. Samandi, D. Dunne, A. Bloyce and T. Bell, "Plasma Nitriding of Microalloyed Steel", Surface and Coatings Technology, Vol. 71, pp. 135-41, 1995.

جدول 1- در صد ترکیب فولاد گرم کار AISI H13 (Wt%).

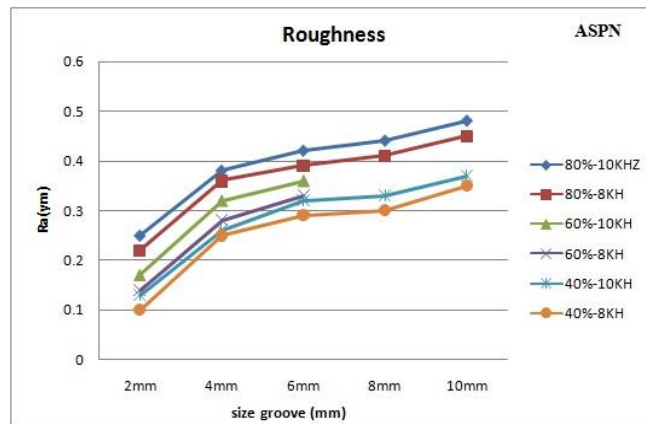
| عناصر | C | Si | Mn | P | V | S | Cr | Mo |
|-------|------|------|------|------|-----|------|-----|------|
| ٪وزنی | 0.42 | 0.82 | 0.45 | 0.03 | 0.3 | 0.02 | 4.7 | 1.52 |



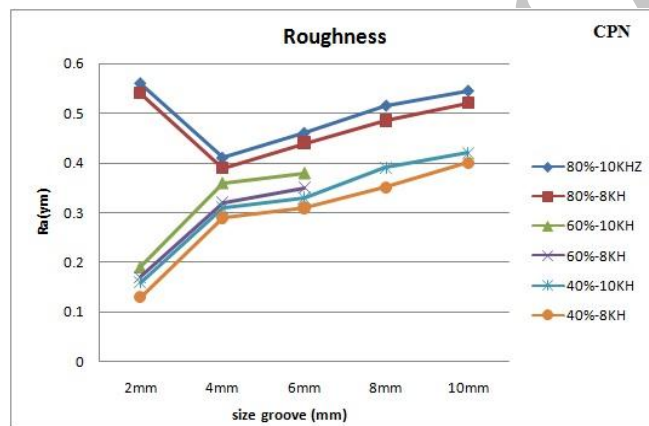
شکل 1- شمایی از (الف) مجموعه نمونه عملیات نیتروژن دهی پلاسمایی شده متشکل از (ب) سطح مورد آزمایش از جنس AISI H13 و (ج) سطح شیار دار که با پیچ و مهره به هم وصل شده‌اند، بیکان محل استقرار ترموکوپل را نمایش می‌دهد.



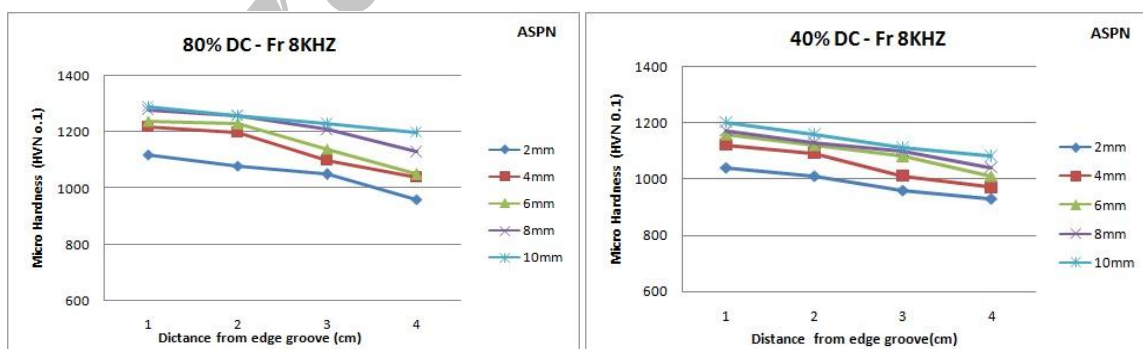
شکل 2- طرح شمایی از سیستم نیتروژن دهی پلاسمایی موجود در دانشگاه صنعتی امیر کبیر.



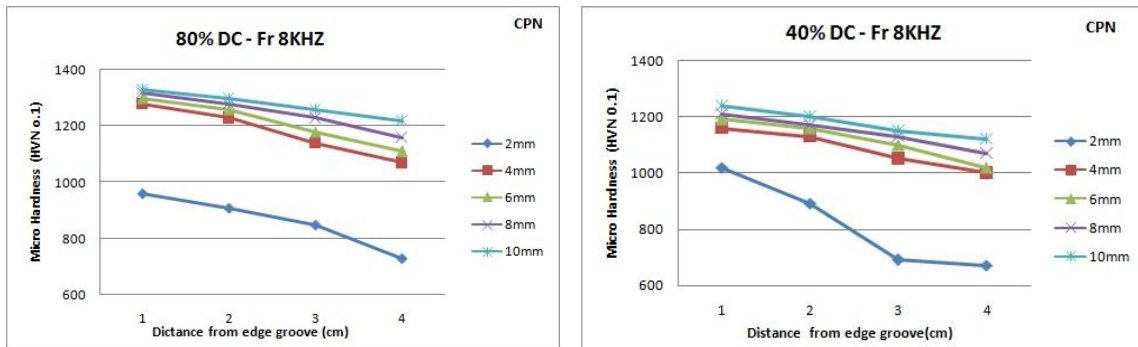
شکل 3- نتایج زبری سطوح نمونه های عملیات شده به روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال (ASPN).



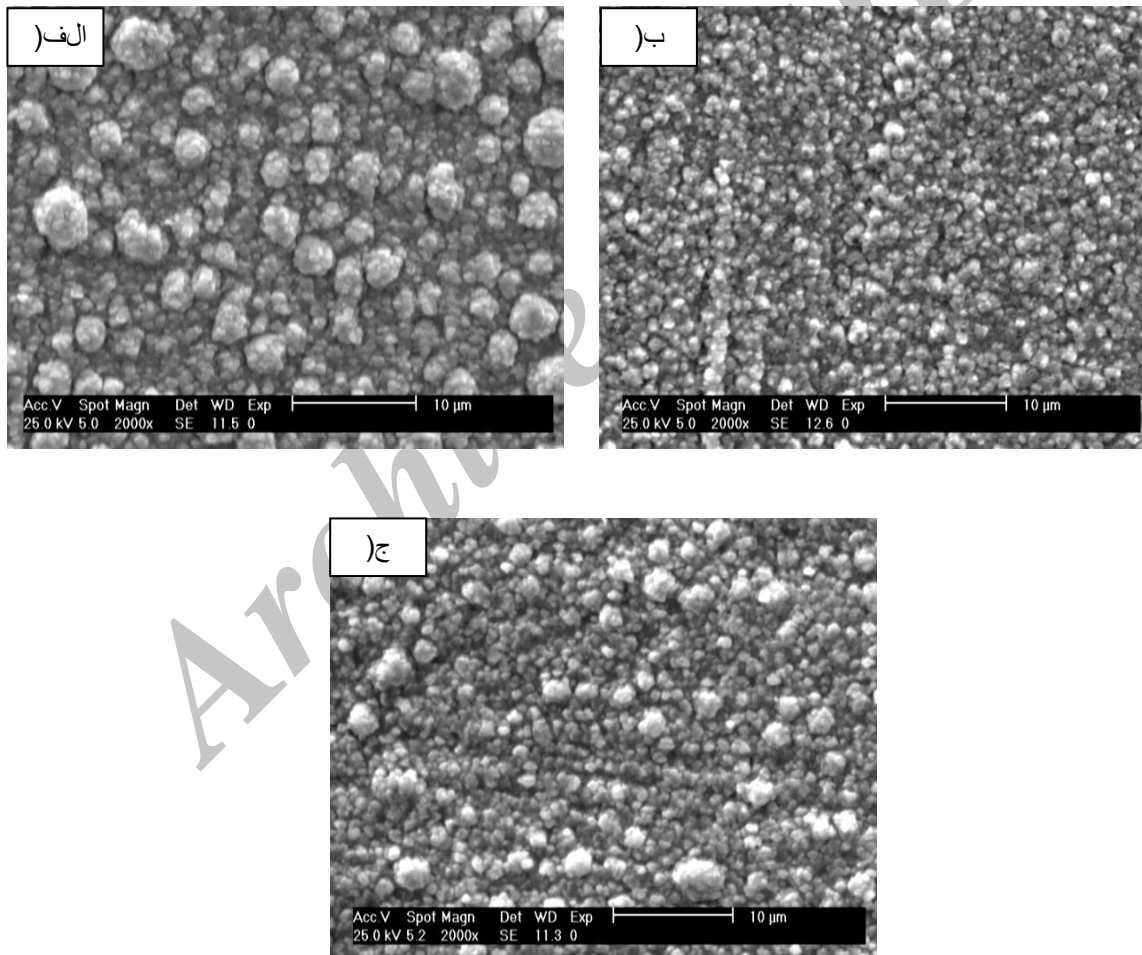
شکل 4- نتایج زبری سطوح نمونه های عملیات شده به روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول (CPN).



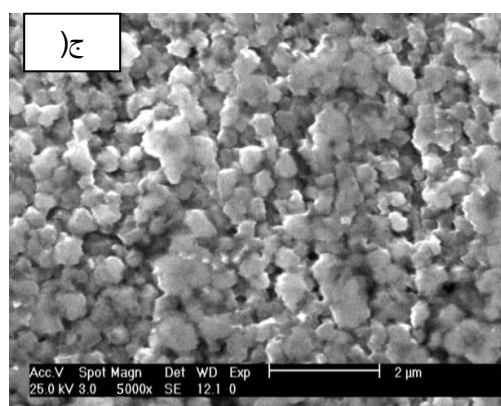
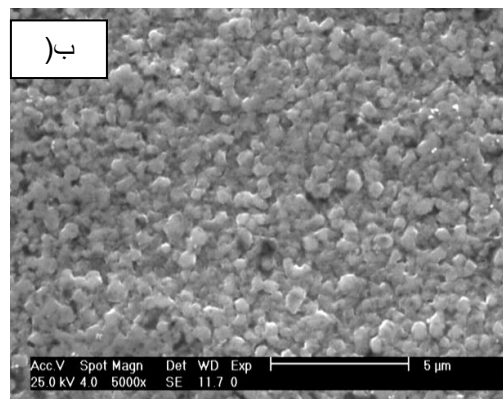
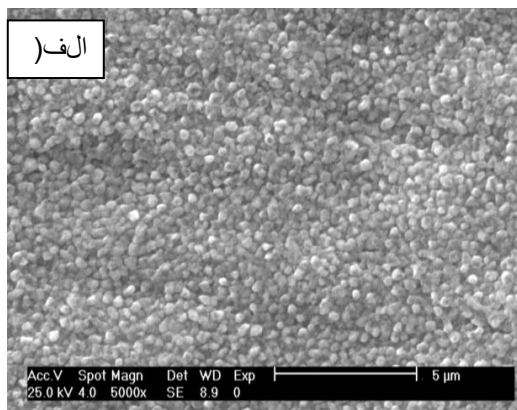
شکل 5- نتایج سختی سطح نمونه های نیتروژن دهی پلاسمایی شده به روش توری فعال از لبه شیار تا ته شیار در فرکانس 8 کیلو هرتز، دمای 500 درجه سانتی گراد و در چرخه های کاری الف) 40٪ و ب) 80٪.



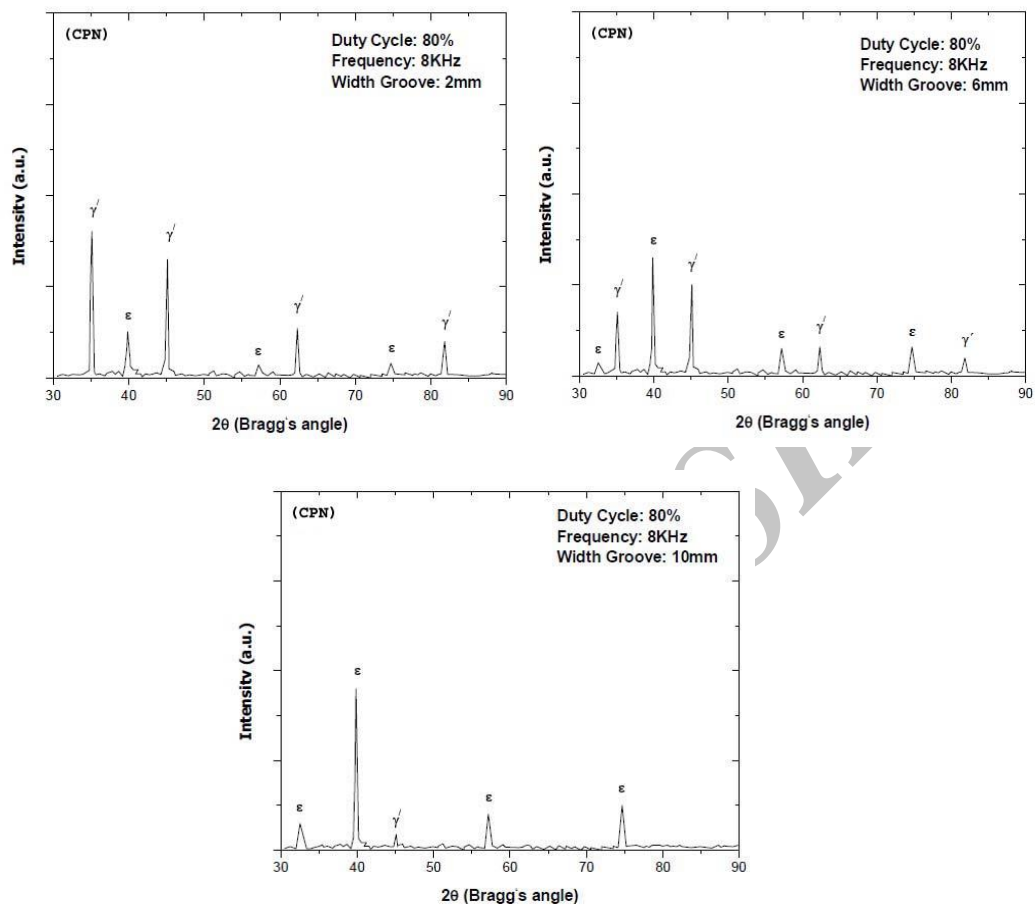
شکل 6- نتایج سختی سطح نمونه های نیتروژن دهی شده به روش متداول از لبه شیار تا ته شیار در فرکانس 8 کیلو هرتز، دمای 500 درجه سانتی گراد و در چرخه های کاری الف) 40٪ و ب) 80٪.



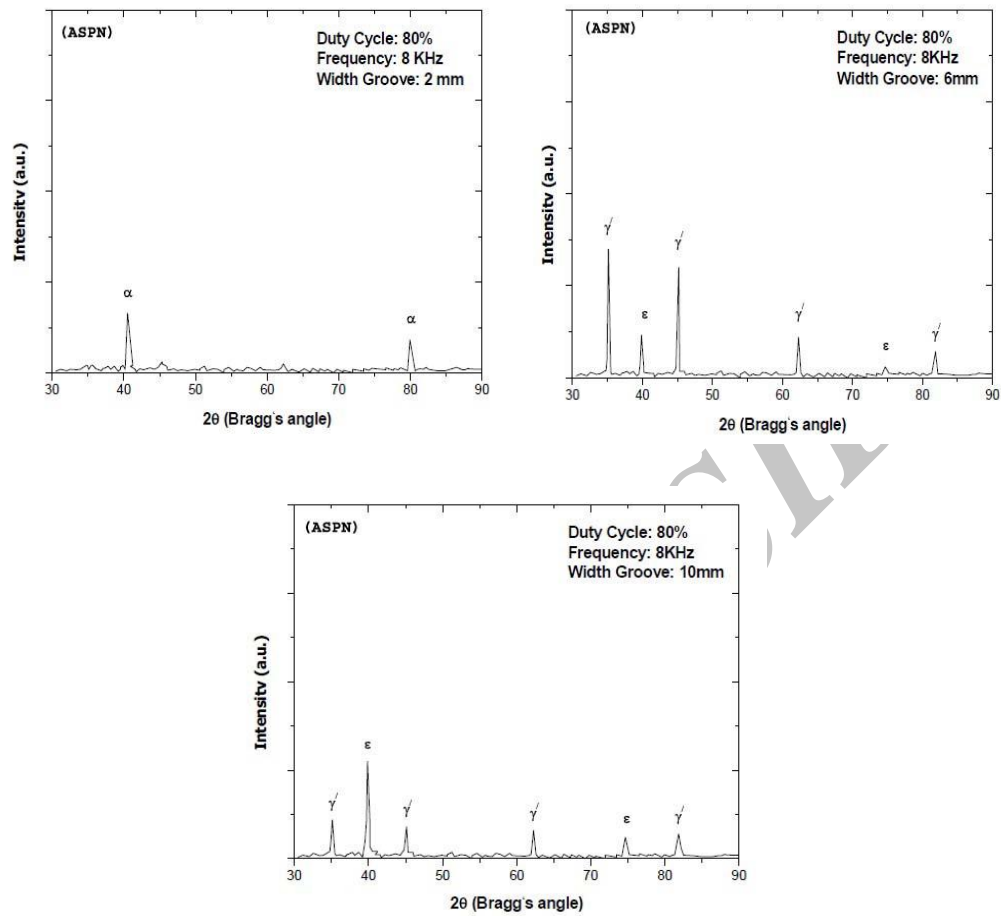
شکل 7- تصاویر SEM با بزرگنمایی 2000 از نمونه های نیتروژن دهی شده به روش متداول در دمای 500 درجه سانتی گراد، چرخه کاری 80٪ و در ضخامت های شیار الف) 2 mm، ب) 6 mm و ج) 10 mm.



شکل 8- تصاویر SEM با بزرگنمایی 5000 از نمونه های نیتروژن دهی شده به روش توری فعال در دمای 500 درجه سانتی گراد، چرخه کاری 80٪ و در ضخامت های شیار الف) 2 mm، ب) 6 mm و ج) 10 mm.



شکل 9- نتایج XRD نمونه‌های عملیات شده در چرخه کاری 80% و فرکانس 8 kHz در روش نیتروژن دهی پلاسمایی متداول برای ضخامت‌های شیار الف) 2 mm، ب) 6 mm و ج) 10 mm.



شکل 10- نتایج XRD نمونه‌های عملیات شده در چرخه کاری 80٪ و فرکانس 8 kHz در روش نیتروژن دهی پلاسمایی با توری فعال برای ضخامت‌های شیار الف) 2 mm، ب) 6 mm و ج) 10 mm.