

با استفاده از روش رسوب بخار شیمیایی حرارتی

حمید خرسند^۱، اسماعیل گنجه^۲، محمد حسین سیادت^۱، سجاد نصیری خلیل آباد^۳

۱ دانشکده مهندسی و علم مواد، دانشگاه صنعتی خواجه نصیر الدین طوسی

۲ دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران شمال، باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، تهران، ایران navidganjehie@yahoo.com

۳ دانشجوی دکتری، دانشکده مهندسی مواد، دانشگاه صنعتی سهند

تاریخ دریافت: ۹۲/۸/۵ تاریخ پذیرش: ۹۳/۱۰/۱۴

چکیده

با توجه به اهمیت بالای نانولوله‌های کربنی و کاربرد گسترده این مواد در صنایع و زمینه‌های مختلف، روش‌های تولید و پارامترهای مختلف تأثیرگذار می‌تواند در خواص نانولوله‌های تولیدی بسیار چشم‌گیر باشد در این مقاله برای اولین بار، با استفاده از شبکه عصبی به بررسی پارامترهای تأثیرگذار (با توجه اقتصادی و صنعتی) در روش رسوب بخار شیمیایی حرارتی بر مشخصات نانولوله کربنی چندجداره پرداخته شد. بدین صورت که پارامترهای دما و زمان عملیات آنیل، ضخامت کاتالیست، دما و زمان رشد و دبی گاز هیدروکربن به عنوان پارامترهای ورودی شبکه عصبی و دو پارامتر قطر و طول نانولوله‌ها به عنوان خروجی شبکه عصبی در نظر گرفته شده است. پس از انجام آزمون‌های تجربی، نتایج پیش‌بینی به مقادیر در شرایط واقعی (تجربی) بسیار نزدیک بود. مقدار خطا برای قطر و طول به ترتیب تقریباً برابر ۵/۵ و ۷/۸ درصد بود. اندازه‌گیری خاصیت نشر میدانی، چگالی جریان مطلوبی را در ولتاژ ۵-۸ ولت نشان داد. در نهایت با استفاده از شبکه مدل شده برای تخمین قطر و طول نانولوله‌ها، می‌توان دفعات تکرار سیستم را به نحو مطلوبی کاهش داد.

کلمات کلیدی

نانولوله‌های کربنی، شبکه عصبی مصنوعی، رسوب بخار شیمیایی حرارتی، طول و قطر

مقدمه

معمولاً از سه روش تخلیه قوس الکتریکی^۱، استفاده از لیزر^۲ و نشست بخار شیمیایی^۳ برای تولید نانولوله‌های کربنی استفاده می‌شود [۲]. در دو روش ابتدائی معایبی مانند مشکل تولید به صورت انبوه و دیگری تولید به صورت منظم وجود دارد. با روش نشست بخار شیمیایی می‌توان تا یک لایه ضخیم از نانوتیوب به ضخامت ۵۰ میکرون را بر روی یک سطح رسوب داد. نانولوله‌های رسوب داده شده دارای نظم بالا و به صورت عمود بر سطح رسوب داده می‌شوند. در این روش مخلوطی از گازهای هیدروکربن مانند استیلن، متان یا اتیلن و نیتروژن وارد محفظه احتراق خواهند شد. از منبع انرژی برای شکستن مولکول‌های کربن به اتم‌های کربن فعال استفاده می‌شود. در این حالت کربن به داخل زیر لایه که قبلاً حرارت داده شده و با کاتالیزور پوشیده شده است، نفوذ کرده و در آن جا پیوند تشکیل می‌دهد. در حین واکنش، نانولوله‌ها بر روی زیر لایه و در نتیجه تجزیه هیدروکربن‌ها در دمای ۷۰۰-۹۰۰°C و

با تولید نانولوله‌های کربنی ماده ای در اختیار بشر قرار گرفته است که از مس رساناتر، از فولاد مقاوم تر، از آلومینیوم سبک تر و در رسانایی گرمایی هم طراز با الماس می‌باشد. خواص جالب نانولوله‌های کربنی و کاربرد مفید آن‌ها در صنایع مختلف مانند الکترونیک (نمایشگرهای نشر میدان) به مشخصات ساختاری این نانولوله‌ها مثل قطر، تعداد لایه‌ها، طول و وجود عیوب ارتباط دارد. نمایشگرهای نشر میدانی، مصرف انرژی کمتر، روشنایی بیشتر، زمان واکنش کمتر و شعاع بینایی بیشتری دارند. بالا بودن نسبت طول به قطر در نانولوله‌های کربنی، که معمولاً بیشتر از ۱۰۰۰ می‌باشد، منتج به ایجاد خاصیت نشر بهتر در یک میدان الکتریکی می‌شود. نانولوله‌های کربنی از لحاظ حرارتی و شیمیایی پایدار هستند و این خاصیت باعث پایداری خاصیت نشری آن‌ها نیز می‌شود [۱].

1. Electric Arc Discharge (EAD)
2. Laser Ablation (LA)
3. Chemical Vapor Deposition (CVD)

پیچیده مهندسی هستند. عموماً در مسائل مهندسی برای تعیین تأثیر عوامل مختلف بر خواص نهایی محصول از روش آزمون و خطا و در موارد کمی نیز از روش های آماری بهره گرفته می شود. روش آزمون و خطا به دلیل تحمیل هزینه و نتایج تجربی کاربردی نمی باشند. روش های آماری نیز به دلیل عدم پیش بینی نتایج بعدی از سودمندی کمتری برخوردارند. اما شبکه های عصبی مصنوعی هزینه کمتری را تحمیل می کنند و همچنین به دلیل قابلیت پیش بینی نتایج قابلیت های بیشتری در کاربردهای صنعتی و آزمایشگاهی از خود به نمایش می گذارند.

انتخاب مواد و روش

در این پژوهش تلاش شده است با استفاده از داده های تجربی منتج شده از مقالات معتبر علمی و پژوهشی، رشد نانولوله های کربنی چند جداره به وسیله شبکه های عصبی مصنوعی مدل سازی شده و برای پیش بینی فاکتورهای نظیر طول و قطر نانولوله های کربنی چند جداره مورد استفاده قرار گیرند. با توجه به مطالب گفته شده، در این پژوهش جنس زیرلایه سیلیکون انتخاب شده است. این ماده علاوه بر توانایی ذاتی برای رشد هم راستای نانولوله های کربنی بروی سطح خود، ماده نیمه رسانای مناسبی بعنوان صفحه کاتدی در نمایشگر می باشد [۵]. از فلز آهن خالص ۹۹/۹۹ بعنوان کاتالیست جهت تسریع فرآیند رشد استفاده شد. در میان فلزات مختلفی (مانند آهن، کبالت یا نیکل) که برای رشد نانولوله های کربنی استفاده می شود، فلز آهن بعلت در دسترس بودن و ارزان تر بودن، گزینه بسیار مناسبی است. استفاده از این کاتالیست می تواند به اقتصادی کردن فرآیند رشد نیز کمک بسزایی نماید [۶]. جهت پوشش کاتالیست بر سطح زیرلایه از روش بخار اشعه الکترونی^۴ استفاده خواهد شد. این روش، توزیع یکنواختی را بروی سطح زیرلایه ایجاد می کند و همچنین می تواند ضخامت هایی در مقیاس ۱۰۰-۰/۱ نانومتر ایجاد کند [۷]. گاز هیدروکربن استیلن بعنوان عامل رشد نانولوله های کربنی انتخاب گردید. این گاز نرخ رشد مناسبی را برای رشد نانولوله های کربنی ایجاد می کند [۸]. در نهایت از روش نشست بخار شیمیایی حرارتی برای رشد نانولوله های کربنی استفاده خواهد شد. مجموعه این عوامل منجر به تولید نانولوله های کربنی چند جداره خواهد شد که کاربرد بیشتری در صنایع الکترونیک دارند [۹، ۱۰]. نمونه ها با پارامترهای مختلف، ولی تحت شرایط آماده سازی و رشد یکسان سنتز و آنالیز شدند.

فشار اتمسفر به وجود می آید. روش نشست بخار شیمیایی در حقیقت شامل دو مرحله آماده سازی کاتالیزور و ساخت نانولوله ها می باشد. در روش رسوب بخار شیمیایی، رشد و خواص نانولوله های کربنی به شرایط رشد، مشخصات کاتالیست شامل ترکیب، مورفولوژی و زیرلایه بستگی دارد [۳]. روش رسوب بخار شیمیایی یکی از پرکاربردترین روش های رشد می باشد، زیرا از مزایایی مثل روشی ساده، خلوص بالا، قابلیت کنترل فرایند رشد، هم راستایی عمودی، هزینه کمتر و قابلیت تولید بیشتر در مقیاس صنعتی برخوردار می باشد. با توجه به این که در این روش تولید پارامترهای تأثیرگذار زیادی وجود دارند و نیز هر یک از این پارامترها با توجه به نتایج حاصله می توانند در محدوده گسترده ای تغییر کنند، استفاده از نرم افزار شبیه ساز شبکه عصبی می تواند ابزار بسیار مفیدی برای تعیین مقادیر بهینه در این زمینه هستند. شبکه های عصبی در انسان و دیگر موجودات از تعداد بسیار زیادی عصب تشکیل شده اند که پالس های الکتریکی را مبادله می کنند. الگوریتم های کامپیوتری که این ساختار بیولوژیکی را تقلید می کنند، به طور کلی شبکه های عصبی مصنوعی نامیده می شوند. ساختار شبکه های عصبی شامل اجزایی است که به روشی مشابه با توابع بنیادی در عصب های بیولوژیکی عمل می کند. این اجزاء بنیادی به شکلی که شبیه به ساختار مغز می باشند، سازماندهی می شوند. این شبکه قادر به تشخیص رابطه میان داده هایی است که با تکنیک های تحلیلی معمولی موجود قابل رؤیت و مشهود نیستند. قابلیت شبکه های عصبی مصنوعی بر اساس یادگیری و تمرین بر روی داده های ورودی قبلی استوار است. بر پایه این آگاهی قبلی، شبکه عصبی مصنوعی می تواند روابط موجود در داده های مجموعه جدید ارائه شده به آن را پیش بینی نماید [۴]. در این پژوهش از پارامترهای تأثیرگذار در فرایند رسوب بخار شیمیایی حرارتی به ترتیب: دما و زمان عملیات آنیل، ضخامت کاتالیست، دما و زمان رشد و فشار گاز هیدروکربن به عنوان پارامترهای ورودی شبکه عصبی و دو پارامتر قطر و طول نانولوله ها به عنوان خروجی شبکه عصبی در نظر گرفته شده است تا بتوان نانولوله کربنی چند جداره ای را روی زیرلایه رشد داد که دارای قطر حداقل و طول حداکثر باشد. این خاصیت به بهبود خاصیت نشر میدانی کمک شایانی می کند.

روش تحقیق

در این تحقیق ابتدا به تعیین پارامترهای بهینه آماده سازی و رشد نانولوله های کربنی به روش رسوب بخار شیمیایی حرارتی با استفاده از نرم افزار شبیه سازی شبکه عصبی پرداخته شده و سپس با استفاده از پارامترهای بهینه بدست آمده حاصل از نتایج نرم افزار، نانولوله های کربنی چند جداره بر یک زیرلایه رشد داده می شوند. شبکه های عصبی مصنوعی رهیافتی نوین در حل مسائل

4. Electron Beam Evaporation (EBV)

شبیه سازی فرایند توسط شبکه عصبی

پس از انتخاب و تهیه مواد و تجهیزات لازم، جهت رسیدن به نانولوله‌های کربنی چند جداره‌ای که که دارای طول حداکثر و قطر حداقل باشند از مدل‌سازی شبکه عصبی استفاده خواهد شد. انتخاب این مشخصه‌ها، خاصیت نشر میدانی را به شدت افزایش می‌دهد [۱۱]. فاکتورهای نظیر ضخامت زیرلایه، دمای عملیات آنیل، زمان عملیات آنیل، زمان رشد، دمای رشد و دبی گاز استیلن به عنوان فاکتورهای ورودی و دو فاکتور طول و قطر نانولوله‌های کربنی به عنوان خروجی در نظر گرفته می‌شوند. با مطالعه و بررسی مقالات معتبر علمی در زمینه ساخت نانولوله‌های کربنی، تعداد ۵۰ دسته "داده" استخراج گردید. پارامترهای فرآیند رشد و لایه نشانی بر اساس شروط ذیل انتخاب گردیدند:

- ۱- ضخامت کاتالیست آهنی حداقل 10 nm باشد تا بتوان توسط دستگاه‌های موجود به آن رسید.
- ۲- دمای عملیات آماده‌سازی سطح کاتالیست و رشد نانولوله‌ها جهت کاهش مصرف انرژی، حداقل باشند.
- ۳- زمان عملیات آماده‌سازی سطح کاتالیست و رشد نانولوله‌ها جهت تسریع فرآیند رشد، حداقل مقدار باشند.
- ۴- دبی گاز استیلن جهت کاهش مصرف گاز، حداقل باشد.
- ۵- قطر و طول نانولوله کربنی به ترتیب حداقل و حداکثر باشند.

پس از بررسی داده‌های استخراج شده مشاهده گردید که برخی از داده‌ها برای استفاده در فرآیند آموزش مناسب نیستند، لذا برای کاهش خطای آموزش و همچنین جلوگیری از آموزش بیش از حد در برخی فاکتورها، اجباراً می‌بایست برخی از داده‌ها حذف می‌شدند. اما به جهت جلوگیری از حذف داده‌های مفید دو شبکه عصبی مجزا برای طول و قطر نانولوله‌های کربنی آموزش داده شدند. پس از حذف داده‌های نامناسب، دو دسته داده مجزا برای آموزش شبکه تهیه شدند. اینک تکنیک‌های مورد استفاده جهت بهینه‌سازی مدل معرفی می‌شوند.

داده‌های مورد نیاز جهت مدل‌سازی و آموزش شبکه از پژوهش‌های منتشر شده در مجلات علمی معتبر و نمایه شده در ISI منتج شده است. پس از مطالعه این پژوهش‌ها، در مجموع ۵۰ دسته "داده" حاصل شد. داده‌های حاصله به صورت خام بوده و قابلیت استفاده جهت مدل‌سازی و آموزش شبکه را ندارند، لذا می‌بایست پیش از شروع آموزش شبکه، آماده‌سازی شوند. از آنجایی که خروجی شبکه عصبی شامل دو متغیر طول و قطر نانولوله‌های کربنی است، بسیاری از داده‌های حاصله به دلیل کمبود اطلاعات طول و یا قطر نانولوله‌ها غیر قابل استفاده بودند. با حذف این داده‌ها، در عمل تعداد داده‌های باقیمانده جهت آموزش شبکه بسیار کمتر از حداقل مقداری مورد نیاز برای آموزش صحیح شبکه می‌گردید. در نتیجه اقدام به مدل‌سازی دو شبکه عصبی مجزا برای پیش‌بینی طول و قطر نانولوله‌های کربنی گردید. تفکیک شبکه‌های عصبی این امکان را می‌دهد که داده‌های کمتری حذف شده و عملاً راندمان آموزش افزایش یابد، هر چند که این تفکیک حجم کار را افزایش داده و زمان بیشتری را برای مدل‌سازی و آموزش شبکه مصرف می‌کند.

جدول ۱ داده‌های اولیه حاصل از پژوهش‌های منتشر شده در مجلات علمی را نشان می‌دهد.

مناطق قرمز رنگ نشان دهنده نقص اطلاعات مورد نیاز جهت آموزش شبکه می‌باشند و مناطق زرد رنگ داده‌های نرماله شده جهت استفاده در آموزش شبکه عصبی را نشان می‌دهند. همچنین ردیف‌های مشخص شده به رنگ قرمز، به دلیل نامشخص بودن برخی متغیرهای رشد، به طور کلی حذف شده‌اند و ردیف‌های مشخص شده به رنگ نارنجی به دلیل در دسترس نبودن مقادیر قطر نانولوله‌های کربنی، در فرآیند آموزش شبکه برای پیش‌بینی قطر نانولوله مورد استفاده قرار نگرفته‌اند. پس از تفکیک دو شبکه عصبی و انجام آموزش‌های اولیه مشاهده شد که خطای آموزش بسیار زیاد است و عملاً مدل شبکه عصبی همگرا نمی‌گردد.

جدول ۱. داده‌های اولیه حاصل از پژوهش‌های علمی

ردیف	ضخامت کاتالیست (nm)	زمان عملیات آماده سازی (min)	دمای عملیات آماده سازی (°C)	دما (°C)	زمان (min)	دبی گاز C ₂ H ₂ (sccm)	طول نانو لوله کربنی (nm)	قطر نانو لوله کربنی (nm)	منبع
1	1	15	750	750	10	12	5600	N/A	[7]
2	10	20	800	800	12.5	40	25180	N/A	[12]
3	30	20	850	750	10	30	5000	30	[13]
4	30	20	850	850	10	30	10000	60	
5	30	20	850	950	10	30	20000	130	
6	0.3	N/A	800	10	10	60	115000	5	[14]
7	1	N/A	800	10	10	60	115000	8	
8	2	N/A	800	10	10	60	115000	11	
9	3	N/A	800	10	10	60	115000	16.5	
10	30	20	850	850	5	30	15830	55	[15]
11	1	3	750	750	30	5	100000	N/A	[16]
12	1	3	750	750	30	10	700000	6	
13	5	8	600	750	10	100	20780	36.95	[17]
14	5	10	600	750	10	100	17000	38.39	
15	5	12	600	750	10	100	19000	29.24	
16	5	14	600	750	10	100	20780	31.15	
17	2.5	N/A	750	750	30	20	13500	N/A	[8]
18	3.5	N/A	750	750	30	20	50000	42.5	
19	7.5	N/A	750	750	30	20	36670	50	
20	16	N/A	750	750	30	20	N/A	55	
21	7.5	N/A	750	750	30	30	21000	N/A	
22	50	20	950	950	10	30	12000	130	[18]
23	50	120	950	950	10	30	18000	60	
24	50	240	950	950	10	30	8000	240	
25	50	20	950	950	3	30	3600	130	
25	50	20	950	950	3	30	3600	130	[18]
26	50	20	950	950	20	30	20000	130	
27	50	20	950	950	20	30	28000	130	[19]
28	50	20	950	950	10	30	10000	130	
29	13	5	900	900	10	30	40000	35	[20]
30	27	5	900	900	10	10	35000	150	
31	10	N/A	700	700	20	25	10000	23.7	[21]
32	5	25	700	750	20	10	3460	40	[22]
33	7	25	700	750	20	10	3460	40	

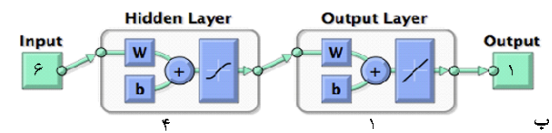
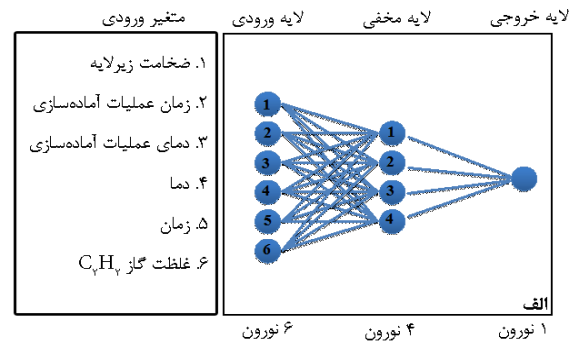
ادامه جدول ۱. داده‌های اولیه حاصل از پژوهش‌های علمی

منبع	قطر کربنی (nm)	طول کربنی (nm)	دبی گاز C ₂ H ₂ (sccm)	زمان (min)	دما (°C)	دمای آماده‌سازی (°C)	زمان عملیات آماده‌سازی (min)	عملیات	ضخامت کاتالیست (nm)	ردیف	
[23]	N/A	75000	3	15	625	725	15	زمان عملیات	1	34	
	N/A	149000	3	15	650	725	15	زمان عملیات	1	35	
	N/A	240000	3	15	675	725	15	زمان عملیات	1	36	
	N/A	290000	3	15	700	725	15	زمان عملیات	1	37	
	13.31	340000	3	15	725	725	15	زمان عملیات	1	38	
	N/A	260000	3	15	750	725	15	زمان عملیات	1	39	
	N/A	175000	3	5	725	725	5	زمان عملیات	1	40	
	N/A	229000	3	10	725	725	10	زمان عملیات	1	41	
	N/A	350000	3	15	725	725	15	زمان عملیات	1	42	
	N/A	349000	3	15	725	725	15	زمان عملیات	1	43	
	N/A	225000	4.5	15	725	725	15	زمان عملیات	1	44	
	[24]	70	8500	120	30	700	700	30	زمان عملیات	8	45
		40	6500	120	30	700	800	30	زمان عملیات	8	46
		50	1500	120	30	700	900	30	زمان عملیات	8	47
[23]	90	7500	30	5	850	50	5	30	48		
[25]	40	30000	400	60	750	580	30	5	5	49	
	85	100000	400	60	750	580	30	5	5	50	

در تمامی مدل‌سازی‌های از این دست بهترین و قابل اطمینان‌ترین گزینه می‌باشد. همچنین به دلیل استفاده از روش پس‌خور خطا، نتایج با تقریب بسیار خوبی به مقادیر خروجی نزدیک می‌گردند. در این مدل از یک شبکه خطی با یک لایه و چهار نورون در لایه مخفی استفاده گردیده است که توپوگرافی و شماتیک این شبکه در شکل ۱۳ نشان داده شده است. برای آموزش شبکه جهت پیش‌بینی قطر نانولوله‌های کربنی، از ۱۶ سری داده به عنوان داده‌های آموزش، سه سری به عنوان داده‌های تست و در نهایت سه سری نیز به عنوان داده‌های تأییدیه استفاده شده است. برای آموزش شبکه جهت پیش‌بینی طول نانولوله‌های کربنی نیز از ۱۷ سری داده به عنوان داده‌های آموزش، ۴ سری به عنوان داده‌های تست و در نهایت ۴ سری نیز به عنوان داده‌های تأییدیه استفاده شده است. از الگوریتم آموزش Levenberg - Marquardt استفاده گردید، و از تابع سیگموئید به عنوان تابع تحریک استفاده شد.

با بررسی داده‌های آموزش مشاهده گردید که برخی از داده‌ها انحراف بسیار زیادی نسبت به دامنه پراکندگی داده‌ها دارند، چنین داده‌هایی عملاً قادر به آموزش صحیح یک شبکه عصبی و حصول یک مدل با خطای کم را نداشتند، لذا می‌بایست نرمال شده و سپس مورد استفاده قرار گیرند. برای نرمال کردن این داده‌ها، خروجی‌ها (طول و قطر نانولوله کربنی) نسبت به هر یک از متغیرهای رشد، مورد مقایسه قرار گرفتند و داده‌های دارای انحراف زیاد نسبت به دامنه متغیرها از مجموعه آموزش حذف گردیدند. در نتیجه داده‌های آموزش از همگرایی مناسبی برخوردار شدند. در نهایت تعداد ۲۲ دسته "داده" برای آموزش شبکه عصبی جهت مدل‌سازی قطر نانولوله‌های کربنی و ۲۵ دسته "داده" برای آموزش شبکه عصبی جهت پیش‌بینی طول نانولوله‌های کربنی حاصل گردید. جهت ایجاد مدل شبکه عصبی روش‌های متفاوتی وجود دارد، از جمله می‌توان به کد نویسی و یا استفاده از مجموعه نرم‌افزارهای توسعه یافته به این منظور استفاده کرد. در میان مجموعه نرم‌افزارهای توسعه یافته به این منظور، نرم‌افزار Matlab با بهره‌گیری از جعبه ابزار شبکه عصبی و قابلیت کد نویسی به یک مجموعه بسیار قدرتمند در این زمینه بدل شده است. به همین جهت برای مدل‌سازی این شبکه از جعبه ابزار شبکه عصبی در Matlab استفاده شده است. نسخه Matlab مورد استفاده 7.10.0 R2010a نسخه ۶۴ بیتی در محیط Mac OSX 10.6.8 همراه با جعبه ابزار شبکه عصبی نسخه 6.0.4 می‌باشد. شبکه مورد استفاده از نوع Feed Forward Back Propagation Error بود. این شبکه قابلیت مدل‌سازی داده‌های خطی پیچیده را دارد و

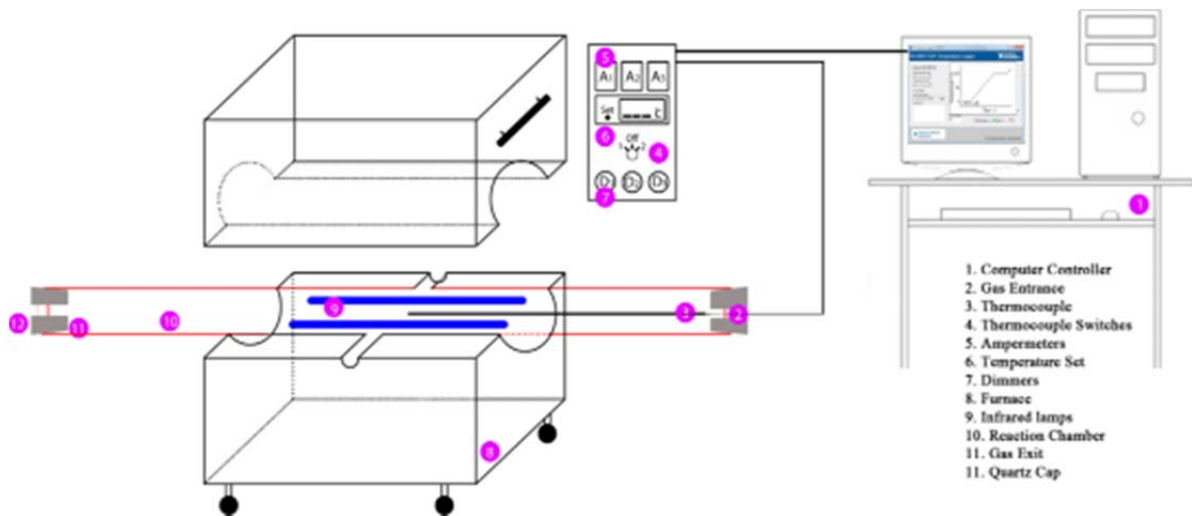
نانولوله های کربنی، کوره تیویی با سیستم گرمایشی مادون قرمز بود. این لامپها می توانند میزان ۶۰۰۰ وات توان الکتریکی را به انرژی حرارتی تبدیل کنند که می توان نرخ گرمایش را از $1^{\circ}\text{C}/\text{min}$ تا $200^{\circ}\text{C}/\text{min}$ انتخاب نمود. محفظه اصلی واکنش کوره (راکتور)، لوله ای از جنس کوارتز می باشد که نسبت به محفظه های قبلی مورد استفاده در انواع کوره ها، دارای این مزیت است که هم داخل آن در هر زمان قابل رویت و هم عایق حرارتی مناسبی برای تمرکز حرارتی است. علاوه بر این، امواج مادون قرمز به راحتی از محفظه کوارتز عبور می کنند و محفظه کوره تاثیری بر میزان جذب این امواج ندارد. محفظه کوارتز طوری طراحی گردید تا گاز هیدروکربن (استیلن) که عامل اصلی رشد است با نمونه در تماس مستقیم قرار گیرد. این کار باعث کاهش مصرف گاز در سیستم، حین فرآیند رشد خواهد شد. همچنین قرار دادن دو لوله در روبروی یکدیگر، امکان رشد نانولوله ها را در هر دو طرف سطح مهیا می کند که نتیجه آن باعث افزایش میزان تولید محصول در هر بار استفاده از کوره است. شماتیک کوره به همراه قسمت های مختلف آن در شکل ۱۴ رسم شده است.



شکل ۱۳. الف) توپوگرافی و ب) شماتیک شبکه عصبی مورد استفاده.

عملیات رشد نانولوله های کربنی چندجداره

بعد از آماده سازی نمونه ها، آن ها درون کوره مادون قرمز [۲۶] رسوب بخار شیمیایی حرارتی جهت انجام فرایند رشد نانولوله های کربنی چند جداره قرار گرفتند. کوره مورد استفاده جهت رشد



شکل ۱۴. شماتیک کوره مادون قرمز به همراه قسمت های مختلف تشکیل دهنده آن [۲۶].

مستخرج از شبکه عصبی برای رشد در سه محدوده متفاوت پارامتری است که نانولوله های کربنی حاصله بیشترین طول و کمترین قطر را خواهند داشت. با توجه به هزینه بر بودن فرآیند نشست بخار شیمیایی حرارتی، لذا انتخاب پارامترها طوری صورت گرفت تا بتوان علاوه بر اندازه گیری مقدار خطای پیش بینی توسط شبکه عصبی، دفعات تکرار را نیز کاهش داد.

تعیین پارامترهای فرایند

گام بعدی در این پژوهش بدست آوردن مقادیر بهینه برای رشد نانولوله های کربنی با حداقل قطر و حداکثر طول بود. برای این منظور مشخصات امکانات موجود برای رشد نانولوله های کربنی بررسی گردیده و محدوده پارامتری هر ابزار استخراج گردید. این بررسی محدود کردن شبکه عصبی و در نتیجه مقادیر پارامتریک رشد در محدوده امکانات موجود است. جدول ۲ نشان دهنده نتایج

جدول ۲. مقادیر بهینه پارامترهای رشد برای بدست آوردن حداقل قطر و حداکثر طول نانولوله‌های کربنی با استفاده از شبکه عصبی

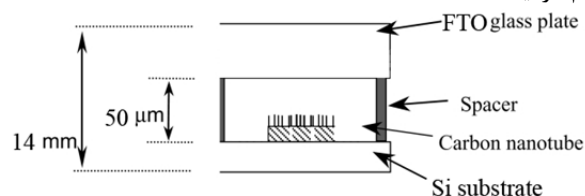
کد نمونه	پیش بینی مشخصات نانولوله‌های تولید شده		پارامترهای رشد			پارامترهای آماده‌سازی	
	قطر (nm)	طول (μm)	C_2H_2 (sccm)	زمان (min)	دما ($^\circ\text{C}$)	دما ($^\circ\text{C}$)	زمان (min)
TCVD1	۱۴/۲۵	۳۰/۵	۱۰	۱۰	۷۰۰	۷۰۰	۱۰
TCVD2	۱۸/۲۲	۳۱/۱	۱۵	۵	۷۰۰	۶۰۰	۴

آنالیز و مشخصه یابی محصول تولیدی

بعد از رشد نانولوله‌های کربنی چند جداره با استفاده از روش رسوب بخارشیمیایی حرارتی، مشخصات ریزساختاری (مانند طول و قطر) آن‌ها به ترتیب توسط میکروسکوپ‌های الکترونی روبشی و عبوری (SEM و TEM) مورد بررسی قرار گرفت و نتایج حاصل از شبیه سازی با نتایج حاصل از روش عملی با یکدیگر مقایسه شده و میزان هوشمندی شبکه تعیین خواهد شد.

اندازه‌گیری خاصیت نشر میدانی و ساخت نمایشگر

خاصیت الکتریکی نشر میدان در یک محفظه در خلا 10^{-6} torr صورت گرفت. جنس صفحه آند اکسید قلع آلئیده به فلئور^۱ با مقاومت $10 \Omega/\text{cm}^2$ انتخاب شد و توسط یک جداکننده سیلیکونی در فاصله $50 \mu\text{m}$ از صفحه کاتد (نانولوله کربنی رشد یافته بر سیلیسیم تک کریستال) قرار داده شد (شکل ۱۵). خاصیت نشر میدانی توسط منحنی جریان - ولتاژ ارزیابی می‌شود، بطوریکه میزان ولتاژ از ۵ تا ۸ ولت متغیر در نظر گرفته شد و میزان تغییرات جریان بر حسب ولتاژ رسم گردید.



شکل ۱۵. نمایش شماتیک سیستم اندازه گیری خاصیت نشر میدانی.

نتایج و بحث

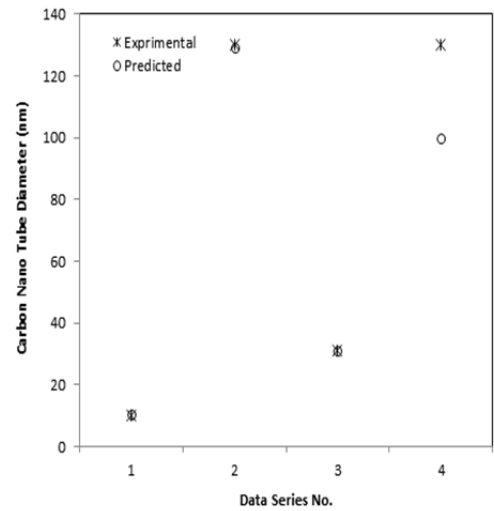
محاسبه خطا

در مدل شبکه عصبی برای محاسبه درصد خطا می‌توان از تقسیم متوسط اختلاف مقادیر پیش‌بینی شده با مقادیر اصلی (متوسط خطا) بر متوسط مقادیر اصلی استفاده کرد. پس از محاسبه، مقدار خطای بدست آمده برای شبکه عصبی مدل شده برای پیش‌بینی قطر نانولوله‌های کربنی برابر $4/0528$ و درصد خطا برابر $0/1485$ است.

صحت سنجی شبکه عصبی

برای صحت‌سنجی^۲ شبکه عصبی معمولاً از مقایسه نتایج بدست آمده از آزمون عملی نسبت به مقادیر پیش‌بینی شده توسط شبکه عصبی مدل شده استفاده می‌گردد. از آنجا که در این پژوهش آزمون عملی بر مبنای نتایج پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه عصبی انجام نگرفته است، لذا از نتایج پژوهش‌های عملی انجام گرفته استفاده گردید. چنین داده‌هایی برای استفاده به عنوان آزمون صحت سنجی باید دارای شرایط خاصی باشند. نخست اینکه پارامترهای سنتز (متغیرهای ورودی) می‌بایست در محدوده آموزش داده شده باشند. این پارامترها نباید در مرحله آموزش شبکه عصبی استفاده شده باشند، به عبارت دیگر، شبکه عصبی مدل شده نباید این پارامترها را قبلاً دیده باشد. همچنین نتایج آن می‌باید به دقت تعیین شده باشد، یعنی صحت نتایج گزارش شده مورد وثوق باشد. شبیه‌سازی این داده‌ها با استفاده از شبکه عصبی بهبود یافته برای پیش‌بینی قطر نانولوله‌های کربنی انجام گرفته شده است. مقایسه نتایج عملی و شبیه‌سازی شده در شکل ۱۶ ارائه شده است. شبکه عصبی مدل شده با تقریب بسیار خوبی نتایج بدست آمده از شرایط عملی را پیش‌بینی می‌کند. بر اساس این نتایج می‌توان انتظار داشت که شبکه عصبی مدل شده بتواند دیگر نتایج را نیز با چنین دقتی پیش‌بینی کرده و باعث کاهش زمان و هزینه‌های پژوهش با حذف سعی و خطا گردد. نتایج بدست آمده نشان می‌دهد که شبکه عصبی مدل شده، با وجود محدودیت در تعداد داده‌های آموزشی، نتایج بسیار چشمگیری داشته و نتایج پیش‌بینی شده از خطای بسیار پایینی برخوردار است. همچنین این شبکه به خوبی رفتار این داده‌ها را شناسایی کرده و علاوه بر پیش‌بینی‌های کم خطا، قابلیت پیش‌بینی رفتار رشد را نیز دارا می‌باشد. این نتایج نشان می‌دهند که شبکه عصبی ابزاری بسیار مناسب برای پیش‌بینی نتایج می‌باشد.

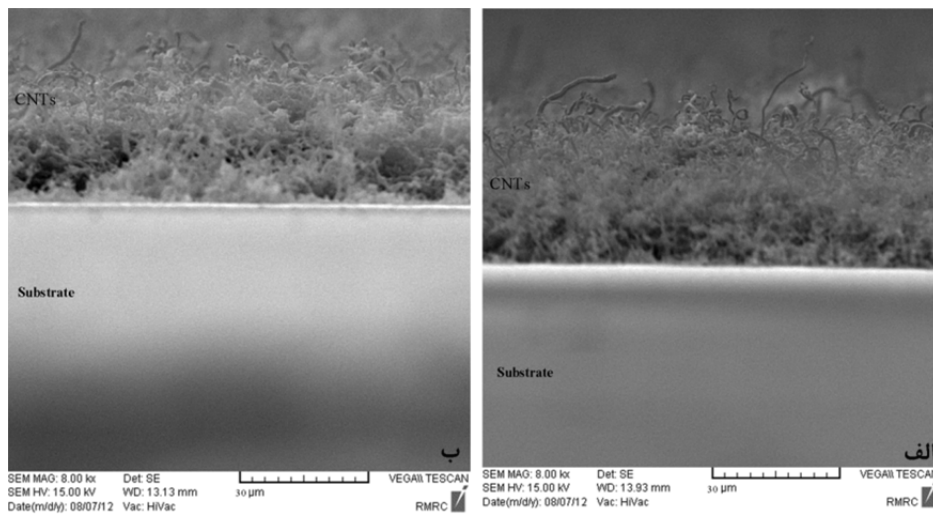
سپس صفحات گرافیت را بر سطح آن‌ها ایجاد می‌کنند. انباشته شدن اتم‌های کربن درون سطوح ذرات کاتالیستی احتمالاً باعث وقوع پدیده نفوذ شبکه‌ای می‌باشد که باعث ساخته شدن قسمتی از لایه گرافیتی می‌شود. با اعمال گاز استلین به صورت مداوم به محفظه واکنش، نرخ رشد ثابت خواهد شد و نتیجه آن ساخته شدن لایه‌های مختلف نانولوله‌های کربنی بصورت تناوبی است. وجود نیروی واندروالس در میان نانولوله‌های در حال رشد، بر پدیده همراستایی تأثیر زیادی دارد. طبق قوانین ترمودینامیکی، در دمای رشد، نانوذرات آهن ابتدا به FeO سپس به Fe₃O₄ و در نهایت به Fe₂O₃ تبدیل می‌شوند. اثبات شده است که فیلم نازک آهن در حین فرآیند رشد به ذرات Fe₂O₃ تبدیل می‌شود. حتی اگر میزان خلاء بسیار بالا (10⁻⁶ Torr) باشد، نانوذرات آهن اکسید خواهند شد. بنابراین در فشار اتمسفریک فرآیند رشد، اکسید شدن ذرات آهن دور از انتظار به نظر نمی‌رسد. پس می‌توان نتیجه گرفت که وجود اکسیژن حتی به میزان اندک باعث وقوع پدیده اکسیداسیون می‌شود. تزریق گاز هیدروژن در حین فرآیند رشد باعث احیا شدن ذرات آهن خالص از اکسید آن‌ها خواهد شد. در محفظه واکنش گازهای هیدروژن، آرگون و استیلن وجود دارند که جهت تشکیل و رشد نانولوله‌های کربنی تجزیه می‌شوند. لازم به ذکر است که گاز آرگون بر نحوه انجام واکنش اثری ندارد و در نقش گاز خنثی عمل می‌کند [۱۸].



شکل ۱۶. مقایسه مقادیر قطر نانولوله‌های کربنی پیش‌بینی شده توسط مدل شبکه عصبی با داده‌های عملی.

اندازه گیری طول و قطر نانولوله‌های کربنی

شکل ۱۷ تصویر SEM عرضی از نانولوله‌های کربنی می‌باشد که به خوبی اندازه طول آن‌ها را نشان می‌دهد. اندازه طول برای هر دو نمونه تقریباً ۳۲/۸-۳۴/۵ μm است که خطای بسیار کمی با نتایجی که شبکه پیش‌بینی کرده بود، دارند (جدول ۳). اتم‌های کربن تشکیل شده ناشی از تجزیه گاز استیلن، به درون ذرات کاتالیست نفوذ می‌کنند و



شکل ۱۷. تصویر SEM نشان دهنده نانولوله‌های کربنی رشد یافته برای نمونه الف (TCVD1) و ب (TCVD2).

شکل ۱۸ نشان می‌دهد که نانولوله‌های کربنی رشد یافته از نوع چندجداره هستند و به وضوح می‌توان قطر داخلی و خارجی آن را اندازه‌گیری نمود. شبکه عصبی (طبق جدول ۲)، مقدار قطر نانولوله‌های کربنی چند جداره را ۱۴/۲۵ nm (نمونه TCVD1) پیش‌بینی کرده بود که با توجه به شکل ۱۸ اثبات می‌شود که شبکه عصبی آموزش دیده با درصد خطای کمی (۶/۶۷ درصد) مقدار قطر را تخمین زده

جدول ۳. مقایسه نتایج بدست آمده از طول نانولوله‌های کربنی توسط شبکه مدل شده و آزمون عملی

کد نمونه	پیش بینی شبکه مدل شده از طول (μm)	اندازه طول بدست آمده از آزمون عملی (μm)	درصد خطا
TCVD1	۳۰/۵	۳۴/۴	۱۱/۲
TCVD2	۳۱/۱	۳۲/۹	۵/۴

می‌شود افزایش دمای عملیات آماده سازی باعث بهبود چگالی جریان در یک ولتاژ ثابت شده است. افزایش زمان عملیات آماده سازی و رشد به میزان تقریبی دو برابر نیز به افزایش این خاصیت کمک شایانی کرده است. در واقع با افزایش تواما زمان و دما، چگالی نانولوله‌های کربنی افزایش یافته است و در نتیجه میزان عواملی که باعث کاهش خاصیت نشر الکترون می‌شوند، کمتر شده است.

در تحقیق صورت گرفته توسط هوه^۲ و همکارانش [۳] خاصیت نشر میدانی برای مجموعه‌ای از نانولوله‌های رشد یافته بر سطح سیلیسیومی پوشش داده شده با عنصر کروم (بعنوان کاتالیست) اندازه‌گیری شده است. یکی از پارامترهای مهم در خاصیت نشر میدانی، میزان ولتاژ برای شروع فرآیند نشر^۳ است. این مقدار، در این تحقیق برابر ۵۵ ولت بدست آمده است. همچنین بیشینه جریان ایجاد شده بر سطح آند $2 \mu A$ در ولتاژ ۱۰۰ می‌باشد. با مقایسه نتایج، آشکار است که میزان ولتاژ برای شروع فرآیند نشر کمتر از ۵ ولت می‌باشد که یک مزیت محسوب می‌شود. بهترین چگالی جریان در تحقیق حاضر برای نمونه‌ای حاصل شد که در دمای $700^\circ C$ آماده‌سازی شده بود و مقدار این پارامتر در ولتاژ ۸ تقریباً برابر $9 \mu A/cm^2$ بدست آمد. بنابراین شکل تقریباً خطی نمودار ولتاژ - چگالی جریان، مبین این مطلب است که نانولوله‌های کربنی رشد یافته می‌توانند بعنوان منابع نشر میدانی در نمایشگرها استفاده شوند.

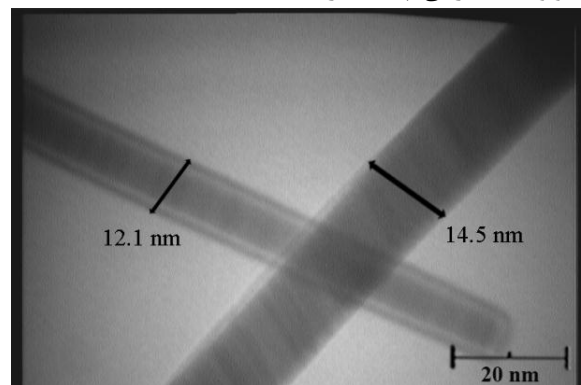
نتیجه‌گیری

در این تحقیق پس از بهینه‌سازی پارامترهای رشد (شامل دما و زمان عملیات آنیل، ضخامت کاتالیست، دما و زمان رشد، دبی گاز هیدروکربن) توسط شبکه عصبی مصنوعی برای نانولوله‌های کربنی و انجام آزمون‌های عملی، نتایج داده‌های شبیه‌سازی (قطر و طول نانولوله‌ها) با مقدار بدست آمده از آزمون‌های عملی با یکدیگر مقایسه شدند. پس از مقایسه دو نمونه که در دماهای $600^\circ C$ و $700^\circ C$ (عملیات آماده سازی) و در زمان‌های ۵ و ۱۰ دقیقه، رشد یافته بودند، نتایج زیر حاصل شد:

۱- شبکه عصبی مدل شده نشان داد که با وجود محدودیت در تعداد داده‌های آموزشی، نتایج بسیار چشمگیری داشته و نتایج پیش‌بینی شده از خطای بسیار پایینی برخوردار است. همچنین این شبکه به خوبی رفتار این داده‌ها را شناسایی کرده و علاوه بر پیش‌بینی‌های کم خطا، قابلیت پیش‌بینی رفتار رشد را نیز دارا می‌باشد. نتایج آزمون صحت سنجی نیز نشان دهنده توانایی بسیار بالای شبکه عصبی مدل شده برای پیش‌بینی نتایج رشد نانولوله‌های کربنی می‌باشد.

۲- جنس زیرلایه و کاتالیست به ترتیب سیلیکون و آهن انتخاب گردید تا بتوان نانولوله‌هایی را رشد داد که با یکدیگر هم‌راستا باشند. گاز هیدروکربن نیز استیلن انتخاب شد. برای اینکه بتوان نانولوله‌های

است. این مطلب نشان‌دهنده سازگاری نرم‌افزار با روش عملی برای رشد نانولوله‌های کربنی چند جداره است.



شکل ۱۸. تصویر TEM از دو نانولوله کربنی که به خوبی چند جداره بودن را نشان می‌دهد.

اثر پارامترها بر فرآیند رشد

همانطور که پیش‌تر نیز بدان اشاره گردید، پارامترهای مختلف فرآیند رشد طوری انتخاب شدند تا در محدوده ای قرار گیرند که محصول تولیدی با کمترین مصرف انرژی تولید شود. انتخاب پارامترها بر اساس منابع مذکور در تعیین پارامترهای فرآیند رشد و نتایج مدلسازی انجام گردید. با بررسی داده‌های مستخرج از مقالات مختلف دسته بندی شده در جدول ۱ افزایش ضخامت کاتالیست و دمای فرآیند رشد به ترتیب باعث کاهش نرخ رشد و قطر تر شدن نانولوله کربنی خواهد شد که تحت شرایط خاصی به حالت بهینه خواهند رسید. همچنین افزایش دبی گاز هیدروکربن و دما که عوامل اصلی تشکیل نانولوله کربنی هستند، باعث تشکیل آلوتروپ‌های دیگر کربن خصوصاً گرافن^۱ خواهند شد [۱]. دبی گازهای آرگون و هیدروژن تأثیر چندانی روی محصول نهایی ندارند، زیرا تنها به عنوان گازهای واسطه برای کنترل غلظت گاز استفاده می‌شوند. مقدار عددی این پارامترها توسط شبکه عصبی تحلیل شد و در نهایت در جدول ۳ لیست گردید. با توجه به اعداد مذکور در جدول ۲، مشاهده می‌شود که با افزایش دبی گاز هیدروکربن، طول و قطر نانولوله کربنی نسبت به نمونه اولیه (TCVD1) که در دمای کمتری رشد یافته است، بیشتر شده است که موید اثر موثرتر دبی گاز نسبت به زمان عملیات رشد می‌باشد.

اندازه‌گیری خاصیت نشر میدانی

منحنی ولتاژ - چگالی جریان که یکی از مشخصه‌های خاصیت نشر میدانی است، برای نانولوله‌های رشد یافته بر سطح زیرلایه در دو دمای مختلف آماده سازی در شکل ۱۹ ارائه شده است. همانطور که مشاهده

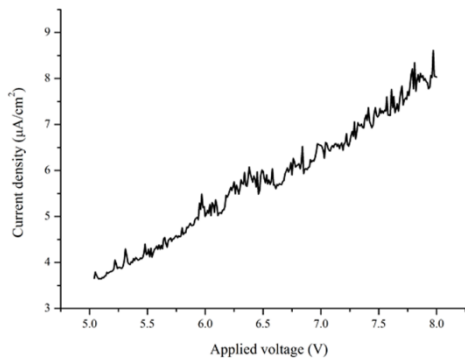
2. Y. Huh
3. Turn-on voltage

1. Graphene

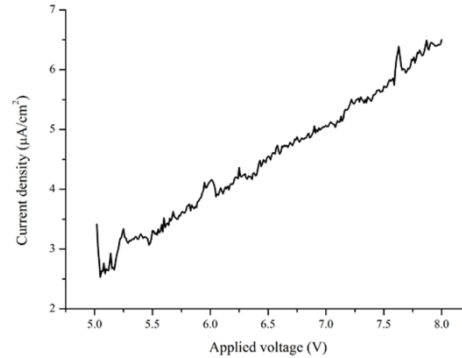
۴- میزان نشر الکترون از سطح زیرلایه بر صفحه آند بیانگر خاصیت نشر میدانی است. افزایش دما و زمان عملیات آماده سازی و رشد باعث بهبود خاصیت نشری شده است. بهترین چگالی جریان در سطح آند برای نانولوله های کربنی چندجداره که در دمای 700°C آماده سازی شده بودند، بدست آمد و مقدار این پارامتر در اختلاف پتانسیل ۸ ولت تقریباً برابر $9 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ اندازه گیری شد. علت اصلی این پدیده، چگالی متراکم تر نانولوله های کربنی بر سطح زیرلایه و در نتیجه افزایش عوامل نشر الکترون می باشد.

تشکر و قدردانی

بدین وسیله از حمایت های مالی صندوق حمایت از پژوهشگران و فناوران کشور (کد طرح: ۹۰۰۰۱۰۸۸) صمیمانه تقدیر می نمایم.



ب



الف

شکل ۱۹. اندازه گیری خاصیت نشر میدانی برای نمونه عملیات حرارتی شده در دمای 600°C (الف) و 700°C (ب)

مرجع ها

carbon nanotube films during thermal CVD, Carbon, 2007, 45, 2065-2071.

[8] A. Rizzo, R. Rossi, M. A. Signore, E. Piscopiello, L. Capodieci, R. Pentassuglia, T. Dikonimos and R. Giorgi, Effect of Fe catalyst thickness and $\text{C}_2\text{H}_2/\text{H}_2$ flow rate ratio on the vertical alignment of carbon nanotubes grown by chemical vapour deposition, Diamond & Related Materials, 2008, 17, 1502-1505.

[9] M. Endo, S. Iijima and M. S. Dresselhaus, Carbon Nanotubes, Elsevier, 1996, USA, 78-122.

[10] A. Loiseau, P. Launois, P. Petit, S. Roche and J.-P. Salvetat, Understanding Carbon Nanotubes From Basics to Applications, Springer, 2006, Germany, 140-195.

[11] N. S. Lee, D. S. Chung, I. T. Han, J. H. Kang, Y. S. Choi, H. Y. Kim, S. H. Park, Y. W. Jin, W. K. Yi, M. J. Yun, J. E. Jung, C. J. Lee, Y. J.H, S. H. Joc, C. G. Lee and J. M. Kim, Application of carbon nanotubes to field emission displays, Diamond and Related Materials, 2001, 10, 270-265.

[12] J. I. Sohn, C. Nam and S. Lee, Vertically aligned carbon nanotube growth by pulsed laser deposition and thermal chemical vapor deposition methods, Applied Surface Science, 2002, 197-198, 568-573.

[1] Y. M. Wong, S. Wei, W. P. Kang, J. L. Davidson, W. Hofmeister, J. H. Huang and Y. Cui, Carbon nanotubes field emission devices grown by thermal CVD with palladium as catalysts, Diamond & Related Materials, 2004, 13, 2105-2112.

[۲] علی شکوه فر و کسری مؤمنی، مقدمه ای بر نانوتکنولوژی، انتشارات نشرگستر، ۱۳۸۴، تهران.

[3] Y. Huh, M. L. H. Green and C. J. Lee, Cross-sectional transmission electron microscopic study on the initial stage growth of carbon nanotubes, Diamond & Related Materials, 2006, 15, 239 - 243.

[۴] محمد باقر منهج، مبانی شبکه های عصبی، انتشارات دانشگاه امیرکبیر، ۱۳۸۷، تهران، ۶۰-۱۰.

[5] N. Jeong, Y. Seo and J. Lee, Vertically aligned carbon nanotubes synthesized by the thermal pyrolysis with an ultrasonic evaporator, Diamond & Related Materials, 2007, 16, 600-608.

[6] M. Escobar, M. S. Moreno, R. J. Candal, M. C. Marchi, A. Caso, P. I. Polosecki, G. H. Rubiolo and S. Goyanes, Synthesis of carbon nanotubes by CVD: Effect of acetylene pressure on nanotubes characteristics, Applied Surface Science, 2007, 254, 251-256.

[7] Y. Yao, L. K. L. Falk, R. E. Morjan, O. A. Nerushev and E. E. B. Campbell, Nucleation and aligned growth of multi-wall

- [13] C. J. Lee, J. Park, Y. Huh and J. Y. Lee, Temperature effect of the growth of carbon nanotube using thermal chemical vapor deposition, *Chemical Physics Letters*, 2001, 343, 33-38.
- [14] C. C. Chiu, T. Y. Tsai, N. H. Tai and C. Y. Lee, Synthesis of ultra long vertically aligned carbon nanotubes using the rapid heating and cooling system in the thermal chemical vapor deposition process, *Surface & Coatings Technology*, 2006, 200, 3215 – 3219.
- [15] Y. Huh, J. Y. Lee, J. H. Lee, T. J. Lee, S. C. Lyu and C. J. Lee, Selective growth and field emission of vertically well-aligned carbon nanotubes on hole-patterned silicon substrates, *Chemical Physics Letters*, 2003, 375, 388–392.
- [16] C. Zhang, S. Pisana, C. T. Wirth, A. Parvez, C. Ducati, S. Hofmann and J. Robertson, Growth of aligned millimeter-long carbon nanotube by chemical vapor deposition, *Diamond And Related Materials*, 2008, 17, 1447-1451.
- [17] H. Liu, G. A. Cheng, R. Zheng, Y. Zhao and C. Liang, Effects of the restructuring of Fe catalyst films on chemical vapor deposition of carbon nanotubes, *Surface & Coatings Technology*, 2008, 202, 3157–3163.
- [18] C. J. Lee, S. C. Lyu, Y. R. Cho, J. H. Lee and K. I. Cho, Diameter-controlled growth of carbon nanotubes using thermal chemical vapor deposition, *Chemical Physics Letters*, 2001, 341, 245-249.
- [19] C. J. Lee, J. Park and J. A. Yu, Catalyst effect on carbon nanotubes synthesized by thermal chemical vapor deposition, *Chemical Physics Letters*, 2002, 360, 250–255.
- [20] J. B. Park, G. S. Choi, Y. S. Cho, S. Y. Hong, D. Kim, S. Y. Choi, J. H. Lee and K. I. Cho, Characterization of Fe-catalyzed carbon nanotubes grown by thermal chemical vapor deposition, *Journal of Crystal Growth*, 2002, 244, 211–217.
- [21] C. Liu, A. Cheng, M. Clark and Y. Tzeng, Effects of interfacial layers on thermal chemical vapour deposition of carbon nanotubes using iron catalyst, *Diamond & Related Materials*, 2005, 14, 835–840.
- [22] J. K. Radhakrishnan, P. S. Pandian, V. C. Padaki, H. Bhusan, K. U. B. Rao, J. Xie, J. K. Abraham and V. K. Varadan, Growth of multiwalled carbon nanotube arrays by chemical vapour deposition over iron catalyst and the effect of growth parameters, *Applied Surface Science*, 2009, 255, 6325–6334.
- [23] G. H. Jeonga, N. Olofssona, L. K. L. Falk and E. E. B. Campbell, Effect of catalyst pattern geometry on the growth of vertically aligned carbon nanotube arrays, *Carbon*, 2009, 47, 696-704.
- [24] S. Chianga, N. Suttisiri and P. Nilsaengrat, Effect of temperature on carbon nanotubes growth on thin Iron film by thermal chemical vapor deposition method under the low pressure, *Physics Procedia*, 2009, 2, 107-111.
- [25] H. Liu, G. Cheng, R. Zheng, Y. Zhao and C. Liang, Layered growth of aligned carbon nanotubes arrays on silicon wafers, *Journal of Molecular Catalysis A: Chemical*, 2006, 247, 52–57.
- [۲۶] اسماعیل گنجیه، هادی سرخوش، امین صمدی مقدم و میثم فتاحی بافقی، طراحی و ساخت کوره مادون قرمز با نرخ گرمایش و سرمایش بسیار سریع تحت اتمسفر، فشار و دمای قابل کنترل، شماره ثبت اختراع: ۷۴۶۸۷، ۱۳۹۱، تهران.

