

کنترل رادارگریزی سازه‌های نظامی با استفاده از پوشش اکسید گرافن $\text{RGO}/\text{NiFe}_2\text{O}_4$ و پایش پروفایل چند جمله‌ای

کریم آتشگر و رضا مسعودی*

دانشگاه صنعتی مالک اشتر، دانشکده مهندسی صنایع

(تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱/۲۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۴/۴)

چکیده: توانایی ردیابی سازه‌ها و ادوات یکی از موارد ایجاد برتری در نبردهای نظامی است. استفاده از استتار از دیرباز به‌منظور کاهش احتمال کشف سازه‌ها و تجهیزات نظامی مورد استفاده قرار گرفته است. توسعه دانش در زمینه ردیابی و کشف سازه‌ها و ادوات نظامی از یک سو و ضرورت اختفا به‌منظور کاهش آسیب‌پذیری در هنگام جنگ از سوی دیگر، اهمیت استفاده از روش‌های استتار و رادارگریزی نوین را افزایش داده است. استفاده از فناوری نانو در زمینه رادارگریزی تأسیسات نظامی با معرفی گرافن به‌عنوان جاذب بسیار قوی امواج الکترومغناطیس به‌عنوان نقطه عطف در این صنعت مطرح است. ایجاد پوشش گرافن بر روی تأسیسات نظامی باعث جذب امواج الکترومغناطیس و در نتیجه عدم کشف این تأسیسات توسط رادار دشمن می‌شود. با توجه به اینکه بین قطر اکسید گرافن به‌کار برده شده و میزان رادارگریزی تجهیزات یک رابطه تابعی وجود دارد، لذا در این مقاله برای اولین بار سعی شده تا به‌منظور کنترل و پایش کیفیت رادارگریزی با استفاده از اکسید گرافن (با نام علمی $\text{RGO}/\text{NiFe}_2\text{O}_4$) در طیف امواج میکروویو ۷ گیگا هرتز به‌کمک رویکرد پروفایلی یک رابطه رگرسیونی ارائه شود. از این رابطه می‌توان به‌منظور پایش کیفیت تولیدات رادارگریز (ارزان‌تر و سریع‌تر از روش‌های موجود) استفاده کرد. در پایان تحلیل حساسیت مدل نشان داد به‌ازای تغییر در پارامترهای مدل رگرسیونی توانایی تشخیص عدم انطباق در محصولات تولیدی به‌سرعت (بین ۱ تا ۲۰ نمونه) قابل تشخیص است.

واژه‌های کلیدی: گرافن، اختفا، نمودار کنترل، پایش پروفایل چند جمله‌ای، سازه‌های نظامی.

Radar Evasion Control of Military Structures Using Graphene Oxide Coating $\text{RGO}/\text{NiFe}_2\text{O}_4$ and Polynomial Profile Monitoring

K. Atashgar and R. Masoudi*

Malek Ashtar University of Technology, Industrial Engineering Faculty

* مسئول مکاتبات، پست الکترونیکی: rezamasoudi.ie@gmail.com

ABSTRACT

Tracking military structures and equipment is one of the parameters to create superiority in military battles. Camouflage has long been used to reduce the possibility of detection of military structures and equipment. Development of knowledge in the field of tracking and discovering military structures and equipment followed by the necessity of using the concealment in order to reduce vulnerability in war, has enhanced the importance of using new camouflage and radar evasion methods. The use of nanotechnology in the field of radar evasion of military facilities was developed by introducing graphene as a very strong absorber of electromagnetic waves. Graphene coating on the military installations causes the absorption of electromagnetic waves and as a result, these installations are not detected by the enemy's radar. Referring to the fact that there is a functional relationship between the diameter of the graphene oxide used and the radar evasion of the equipment, an attempt has been made in this article for the first time to find a solution to control and monitor the radar evasion quality using graphene oxide (with the scientific name of RGO/NiFe₂O₄) in the microwave spectrum of 7GHZ by the profile approach and presentation of a regression relationship. This model can be used to monitor the quality of radar evasion products (cheaper and faster than existing methods). Finally, sensitivity analysis of the model showed that the ability to detect non-conformity in the manufactured products can be detected quickly (between 1 and 20 samples) with the change in the parameters of the regression model.

Keywords: Graphene, Stealth, Control chart, Polynomial profile monitoring, Military structures.

۱- مقدمه

مورفولوژی ساده، خواص مغناطیسی این نانوساختارها را با مغناطیس سنج نمونه ارتعاشی^۲ مورد بررسی قرار دادند. در ادامه پوار و همکاران (۵)، قدرت بالای بسیاری از نانو مواد مشتق شده از گرافن را در جذب بالای امواج میکروویو نشان دادند. زیتللو و همکاران (۶)، از یک نانو ساختار با کارکرد فتوکاتالیست^۳ به منظور تجزیه رنگ‌های آلی موجود در پساب صنعتی استفاده کردند. مایکل و همکاران (۷)، ضمن بررسی تحقیقات انجام شده در جذب امواج میکروویو توسط مشتقات گرافن مانند گرافن تقویت شده با پلیمر، اکسید گرافن و فوم گرافن، طول موج‌های جذب توسط این مواد را جمع‌آوری کردند. تحقیقات در زمینه استفاده از این مواد در سال‌های اخیر گسترش یافته است. ژانگ و همکاران (۸)، در مقاله‌ای به‌طور تجربی یک متا سطح ساخته شده از ساختارهای ساندویچی گرافن طرح‌دار را پیشنهاد دادند که کنترل موج بی‌سابقه، شفافیت نوری عالی و انعطاف‌پذیری فوق‌العاده را نشان می‌داد. دینگ و همکاران (۹)، در تحقیقات خود در زمینه پنهان‌کاری مبتنی بر فراماده یک روپوش فراسطحی بر اساس حلقه‌های گرافن برای مخفی‌سازی اجرام پیشنهاد دادند. لی و همکاران (۱۰)، تأثیر نوع خاصی از گرافن در جذب امواج را بررسی کردند. همچنین مطالعه هوی و و همکاران (۱۱)، تأثیر پنهان‌سازی مادون قرمز و جذب ماکروویو در استفاده از گرافن

رادار به‌عنوان یک سیستم الکترومغناطیس برای تشخیص موقعیت اجسام توسط هرتس در سال ۱۸۸۶ معرفی و نخستین بار در سال ۱۹۳۰ مورد بهره‌برداری قرار گرفت (۱). این سیستم در جنگ جهانی دوم به‌عنوان یکی از مؤلفه‌های تعیین‌کننده در جنگ مورد استفاده قرار گرفت. در ادامه محققان نظامی تلاش خود را در زمینه گسترش قدرت تشخیص این ابزار به‌کار بردند و در پاسخ به این پیشرفت دانشمندان علوم نظامی تلاش خود را در جهت معرفی موادی جهت ساخت تجهیزات رادارگریز به‌کار بستند. ساخت ماده دو بعدی گرافن در سال ۲۰۰۴ توسط آندره گایم و کنستانتین نووسلف به‌عنوان یکی از جاذب‌های امواج الکترومغناطیسی به‌عنوان نقطه عطفی در علم رادارگریزی مطرح است (۲).

گرافن یکی از دگرواره‌های^۱ کربن، از یک ساختار بلوری لانه زنبوری دو بعدی و صفحه‌ای تشکیل شده است. برای اولین بار بررسی ویژگی‌های الکترومغناطیسی اکسید کاهش یافته گرافن و کاربرد آن به‌عنوان ماده جذب‌کننده امواج میکروویو توسط وانگ و همکاران بررسی و معرفی شد (۳). همزمان بررسی عملکرد مغناطیسی سایر نانومواد مورد توجه محققان قرار گرفت. بشکار و همکاران (۴)، با ارائه یک روش جدید جهت ساخت نانوساختارهای نیکل کرومیت با

تفاوت‌های متوالی پارامترهای مدل ارائه نمودند. پژوهش‌های زیادی در توسعه روش کنترل کیفیت بر پایه پایش پروفایل‌ها بر روی مدل‌های پیچیده‌تر انجام شد. نیکو و همکاران (۲۰)، از روش رگرسیون ناپارامتری به‌منظور پایش واریانس پروفایل غیرخطی استفاده کردند. سقایی و همکاران (۲۱)، با استفاده از پروفایل چند جمله‌ای به کنترل عملکرد ریه یک بیمار پرداختند. آتشگر و همکاران (۲۲)، از پایش پروفایل غیرخطی برای کنترل واریانس آلن با استفاده از رویکرد شبکه عصبی مصنوعی استفاده کردند. امروزه کاربرد استفاده پایش پروفایل در سایر علوم نیز گسترده شده است؛ دنگ و همکاران (۲۳)، با استفاده از پایش پروفایل روشی بهینه جهت کنترل وضعیت ماشین‌آلات دوار ارائه کردند. وانگ و همکاران (۲۴)، از این روش در تشخیص داده‌های دورافتاده استفاده کردند.

با توجه به تأثیر اکسید گرافن در زمینه جذب امواج الکترو-مغناطیس، در مسیر توسعه استفاده از این ماده ارائه روشی برای پایش کیفیت میزان جذب این امواج می‌تواند به مهندسين و مسئولین این فرآیند کمک قابل توجه و بی بدیلی نماید. این پژوهش برای اولین بار به‌کمک طراحی یک رابطه تابعی بین ضخامت اکسید گرافن استفاده شده در پوشش تأسیسات نظامی و میزان از دست دادن بازتاب امواج الکترومغناطیس موجب کنترل کیفیت عملکرد رادارگریزی این تأسیسات می‌شود.

۲- مواد و روش تحقیق

کنترل فرایند آماری از دو فاز تشکیل شده است. هدف از فاز یک، به‌دست آوردن پارامترهایی است که به‌وسیله آن می‌توان فرآیند را مدل کرد. به‌علاوه در این فاز عواملی که موجب می‌شود عملکرد طبیعی فرآیند تحت تأثیر قرار گیرد و فرآیند غیرطبیعی کار کند شناسایی و رفع می‌شود. در صورتی که فرآیند در فاز یک پایدار تشخیص داده شد، حدود کنترل و پارامترهای فرایند تخمین زده شده و امکان کنترل بر خط فرایند در فاز دو فراهم می‌شود. در فاز دو کنترل آماری، مهندسان کیفیت، فرایندی که از ثبات با دوام آن در فاز یک اطمینان حاصل شده

احیا شده را نشان داد. تجاری‌سازی و استفاده گسترده از گرافن نیاز به توسعه روش‌های کنترل کیفیت با سرعت تشخیص بالا، قابل اعتماد و مقرون به صرفه را مطرح می‌کند. امروزه تکنیک‌های مبتنی بر استفاده از میکروسکوپ برای اندازه‌گیری کیفیت این مواد و به‌صورت بازرسی صد درصد به‌کار برده می‌شود. این تکنیک‌ها در کشف تولیدات معیوب قدرتمند هستند؛ اما دارای محدودیت‌هایی مانند زمان تجزیه و تحلیل طولانی، و هزینه‌های بالا می‌باشند (۱۲). برای رفع این مشکل روش‌های آماری بر اساس الگوریتم‌های پردازش تصویر توسعه داده شده‌اند، که دارای سرعت قابل قبول در کنترل تغییرپذیری این مواد هستند (۱۳). این مقاله برای اولین بار یک رابطه تابعی مناسب برای کنترل تغییرپذیری این مواد استفاده کرده است؛ استفاده از این روش باعث می‌شود تا علاوه بر افزایش سرعت، هزینه کنترل کیفیت این مواد به‌شدت کاهش یابد.

تاریخچه توسعه کنترل کیفیت در صنایع نظامی به سال ۱۹۴۰ و انتشار راهنمای استفاده از نمودارهای کنترلی برای تجزیه و تحلیل داده‌های فرایندها توسط وزارت دفاع آمریکا باز می‌گردد (۱۴). همگام با توسعه استفاده از ابزارهای کنترل کیفیت در سایر صنایع، صنایع نظامی نیز برای کاهش تغییرپذیری در فرایند تولید، از این ابزارها استفاده کردند. با معرفی نمودار T^2 برای کنترل همزمان چند متغیر کیفی توسط هاتلینگ محققین زیادی نمودارهای کنترل را بر پایه این یافته ارائه نمودند (۱۵). کنترل کیفیت مبتنی بر رابطه تابعی بین متغیر مستقل و متغیر پاسخ یکی از جدیدترین روش‌هایی است که مورد توجه محققین و مهندسين کیفیت قرار گرفته است. مستک و همکاران (۱۶)، با رویکرد پروفایلی اقدام به کنترل فرایند در یک مطالعه موردی نمودند. استور و بریل (۱۷)، یک روش جدید برای پایش پروفایل‌های خطی در فاز یک کنترل کیفیت بر پایه مقادیر تخمین زده شده عرض از مبدأ و شیب پروفایل ارائه کردند. در ادامه پژوهش‌ها کنگ و آلباین (۱۸)، آماره T^2 را برای فاز اول کنترل با ارائه روشی جدید برای رویکرد پروفایلی توسعه دادند. ویلیامز و همکاران (۱۹)، روشی بر پایه

۳- ماتریس تفاوت‌های متوالی بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\hat{V}^T = [\hat{v}_1 \quad \hat{v}_2 \quad \dots \quad \hat{v}_{m-1}]$$

$$\hat{v}_i = \hat{\beta}_{i+1} - \hat{\beta}_i \quad i=1,2, \dots, m-1 \quad (2)$$

۴- با توجه به مقدار به دست آمده در مرحله قبل ماتریس واریانس-کواریانس بر اساس رابطه زیر به دست می‌آید.

$$S = \frac{\hat{V}^T * \hat{V}}{2(m-1)} \quad (3)$$

۵- در نهایت به‌ازای هر پروفایل مقدار آماره T^2 از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$T_j^2 = (\hat{\beta}_j - \bar{\beta})^T S^{-1} (\hat{\beta}_j - \bar{\beta}) \quad (4)$$

۶- حد کنترل مناسب برای این آماره از روش شبیه‌سازی به‌ازای خطای نوع اول ثابت با بهترین توان آزمون به دست می‌آید (۲۸).

۲-۲- فاز دو

در فاز دو کنترل کیفیت آماری، پارامترهای پروفایل فرایند یا محصول، معلوم و شناخته شده است. در این فاز مهندسان درصدد هستند تا پایداری فرایندی را که در فاز یک، تحت کنترل بود به صورت برخط کنترل نمایند (۲۵). روش کنگ و آلباین یکی از پر کاربردترین روش‌های کنترل تغییرپذیری پایش پروفایل‌های چند جمله‌ای در فاز دو است (۲۹). در این روش با در نظر گرفتن پارامترهای مدل $\beta_0=a, \beta_1=b, \beta_2=c, \beta_3=d$ به دست آمده از فاز یک مقدار آماره واریانس-کواریانس از رابطه زیر به دست می‌آید.

$$\sum = \begin{bmatrix} \sigma_a^2 & \sigma_{ab} & \sigma_{ac} & \sigma_{ad} \\ \sigma_{ab} & \sigma_b^2 & \sigma_{bc} & \sigma_{bd} \\ \sigma_{ac} & \sigma_{bc} & \sigma_c^2 & \sigma_{cd} \\ \sigma_{ad} & \sigma_{bd} & \sigma_{cd} & \sigma_d^2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

است را پایش می‌کنند و از ادامه پایداری عملکرد فرایند اطمینان حاصل می‌کنند به عبارت دیگر در فاز دو مهندسين از ادامه عملکرد طبیعی فرآیند مطمئن می‌شوند (۲۳).

در صورت به دست آوردن یک رابطه تابعی مناسب در یک فرایند، کنترل کیفیت از طریق کنترل پارامترهای پروفایل بسیار اثربخش تر از روش‌های سنتی کنترل فرایندهای آماری است (۲۴). در بسیاری از موارد رابطه تابعی بین متغیر مستقل و متغیر پاسخ به وسیله یک رگرسیون چند جمله‌ای مدل می‌شود. در این پژوهش با توجه به این موضوع که رگرسیون چند جمله درجه سه بهترین برازش و تطبیق‌پذیری را بر داده‌های مورد مطالعه دارد؛ از روش‌های مربوط به این نوع رابطه تابعی استفاده شده است.

۲-۱- فاز یک

در فاز یک کنترل برای پایش یک پروفایل، نیاز است پارامترهای مدل رگرسیونی تخمین زده شوند. در واقع تخمین این پارامترها و اطمینان از شایستگی و صحت مدل رگرسیونی طراحی شده در شرایطی که فرایند در حالت پایدار است، مهندسان کیفیت را از لحاظ آماری مطمئن می‌سازد که می‌توان پروفایل فرایند را در فاز دو کنترل، پایش کرد (۲۵). روش‌های مختلفی برای پایش پروفایل‌های چند جمله‌ای در فاز یک معرفی شده است (۲۶). یکی از این روش‌ها که توسط کاظم زاده و همکاران (۲۷)، توسعه داده شده، پایش پروفایل چند جمله‌ای مبتنی بر تفاوت‌های متوالی بر پایه آماره T^2 است. مراحل انجام فاز یک کنترل کیفیت برای پایش پروفایل‌های چند جمله‌ای به صورت زیر است:

۱- به‌ازای تمامی پروفایل‌های موجود در فاز یک مقدار پارامترهای $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ را تخمین زده می‌شود.

۲- به‌ازای هر پارامتر میانگین بر اساس رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$\bar{\beta} = \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m \hat{\beta}_j \quad (1)$$

جدول ۱- میزان از دست دادن بازتاب براساس قطر اکسید گرافن

قطر اکسید گرافن استفاده شده (میلی متر)					شماره پروفایل
۱/۹	۲/۵	۳	۳/۵	۴	
میزان جذب امواج (گیگا هرتز)					
-۱	-۳/۵	-۵/۱	-۹/۹	-۳۰/۴	۱
-۰/۹	-۲/۹	-۳/۹	-۱۲/۱	-۳۶/۵	۲
-۱/۱	-۳/۲	-۴/۸	-۹/۹	-۳۱/۲	۳
-۱	-۳/۲	-۶/۲	-۱۲/۴	-۳۶/۵	۴
-۱	-۲/۳	-۵/۳	-۸/۵	-۳۰/۳	۵
-۱	-۳/۳	-۵/۹	-۱۲/۶	-۳۶/۹	۶
-۱/۲	-۳/۷	-۵/۸	-۹/۹	-۳۰/۴	۷
-۱	-۲/۲	-۶/۱	-۱۰/۴	-۳۴/۸	۸
-۰/۹	-۳/۴	-۵/۲	-۱۰/۲	-۳۱/۳	۹
-۰/۸	-۲/۹	-۶/۳	-۸/۹	-۲۹/۵	۱۰
-۱	-۳/۲	-۵/۱	-۱۰/۲	-۳۲	۱۱
-۱/۲	-۲/۵	-۵	-۸	-۲۹/۳	۱۲
-۰/۹	-۱/۹	-۵/۴	-۹/۳	-۳۳/۱	۱۳
-۱/۱	-۳/۳	-۵	-۹/۲	-۲۹/۷	۱۴
-۰/۹	-۳/۹	-۵/۲	-۱۰/۳	-۳۰/۲	۱۵
-۰/۹	-۲/۳	-۴/۷	-۱۱/۳	-۳۶/۳	۱۶
-۱/۱	-۲/۹	-۴/۸	-۱۰/۲	-۳۲/۸	۱۷
-۰/۸	-۲/۷	-۵/۱	-۱۰/۱	-۳۲/۸	۱۸
-۱/۱	-۳	-۶/۱	-۱۱/۶	-۳۵/۳	۱۹
-۱/۱	-۲/۸	-۵/۲	-۱۱/۳	-۳۵/۳	۲۰
-۱	-۳/۸	-۶/۵	-۱۲/۵	-۳۵/۱	۲۱
-۰/۹	-۲/۹	-۵/۲	-۱۰	-۳۲/۱	۲۲
-۱/۲	-۲/۷	-۴/۸	-۹/۶	-۳۲	۲۳
-۱/۱	-۲/۸	-۴/۸	-۹/۹	-۳۲/۲	۲۴

با توجه به مقادیر به دست آمده برای پارامترهای هر پروفایل در فاز دو مقدار آماره T^2 برای کنترل تغییرپذیری به صورت زیر به دست می‌آید:

$$y_j = \hat{\beta}_{0j} + \hat{\beta}_{1j}x + \hat{\beta}_{2j}x^2 + \hat{\beta}_{3j}x^3 \quad (6)$$

$$T_j^2 = (Z_j - \mu)^T \Sigma^{-1} (Z_j - \mu) \quad (7)$$

امیری و همکاران (۲۹)، در پژوهشی مشخص کردند که حد کنترل بالای α مناسب برای این آماره برای $m > p^2 + 3p$ برابر با $UCL = \chi_{p,\alpha}^2$ می‌باشد. در این رابطه m تعداد پروفایل‌ها در فاز یک کنترل، p تعداد پارامترهای تخمین زده شده و خطای نوع اول α از رابطه زیر به دست می‌آید.

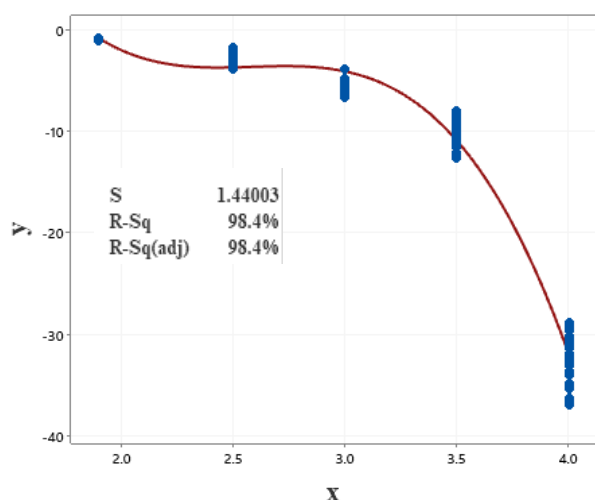
$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_{\text{overall}})^{\frac{1}{m}} \quad (8)$$

۳- نتایج و بحث

۳-۱- مدل پروفایل پیشنهادی برای کنترل کیفیت اکسید گرافن

در این تحقیق به منظور مدل‌سازی پروفایل مورد نیاز برای کنترل کیفیت تولیدات رادارگریز از پوشش اکسید گرافن با قطرهای ۱/۱۹، ۲/۵، ۳، ۳/۵، ۴ میلی‌متر بر روی قطعه‌ای از یک سازه نظامی استفاده شد. عملکرد بسیار قوی اکسید گرافن $RGO/NiFe_2O_4$ با قطرهای ذکر شده در جذب امواج مایکروویو توسط زونگ و همکاران نشان داده شده است (۳۰). بدین منظور نمونه‌های آزمایشگاهی با پوشش‌دهی ذکر شده در مقابل دستگاه اسپکتروم آنالیز قرار گرفته و میزان جذب امواج به عنوان متغیر پاسخ در نظر گرفته شده است. این آزمایش برای ۲۰۰ نمونه به صورت تصادفی انجام شد. میزان از دست دادن بازتاب بر اساس دسیبل در طیف امواج مایکروویو ۷ گیگا هرتز به دست آمده است در جدول (۱) ارائه شده است.

با توجه به داده‌های ارائه شده، و با استفاده از روش حداقل مربعات، رابطه رگرسیونی بین ضخامت اکسید گرافن و میزان از دست دادن بازتاب به صورت یک رابطه خطی چند جمله‌ای مرتبه سه به دست می‌آید. تجزیه و تحلیل آماری نمایش داده شده در شکل (۱) مقدار ضریب تعیین 0.98 را نشان می‌دهد



شکل ۱- پروفایل میزان جذب امواج بر اساس قطر اکسید گرافن.

با توجه به مدل برازش شده برای تعیین شایستگی مدل نمودار نرمال باقی مانده‌ها در شکل (۲) آورده شده است.

نمودارهای شکل (۲) نشان دهنده توزیع نرمال با میانگین صفر برای باقیمانده‌ها و عدم وابستگی بین باقیمانده‌ها و پروفایل‌هاست؛ نتایج حاصل نمایش دهنده کفایت مدل پروفایلی جهت ادامه فاز یک کنترل کیفیت است.

به منظور انجام فاز اول پایش فرایند بر اساس روش توسعه داده شده توسط کاظم زاده و همکاران نیاز است به ازای هر پروفایل مقادیر پارامترهای معادله شماره (۱۰) تخمین زده شود. مقادیر تخمینی در جدول (۲) نمایش داده شده است.

$$y_j = \hat{\beta}_{0j} + \hat{\beta}_{1j}x + \hat{\beta}_{2j}x^2 + \hat{\beta}_{3j}x^3 \quad (10)$$

بر اساس داده‌های به دست آمده مقدار ماتریس واریانس-کواریانس بر اساس تفاوت‌های متوالی به صورت زیر به دست می‌آید.

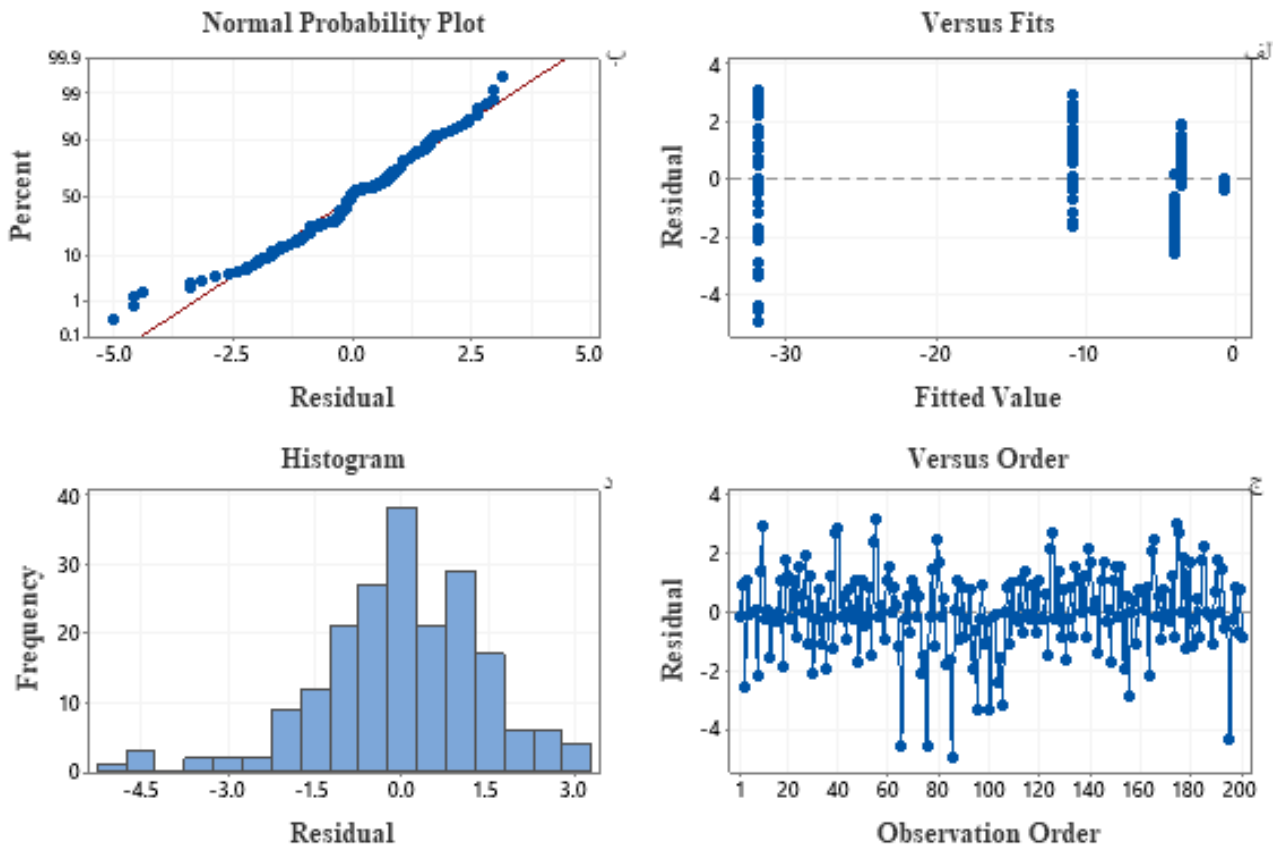
$$S = \begin{bmatrix} 6.0098 & -3.1477 & -0.5920 & 0.3150 \\ -3.1477 & 3.0308 & -0.7700 & 0.0348 \\ -0.5920 & -0.7700 & 0.9684 & -0.2050 \\ 0.3150 & 0.0348 & -0.2050 & 0.0507 \end{bmatrix} \quad (11)$$

ادامه جدول ۱-

شماره پروفایل	قطر اکسید گرافن استفاده شده (میلی متر)				
	۱/۹	۲/۵	۳	۳/۵	۴
	میزان جذب امواج (گیگا هرتز)				
۲۵	-۱/۱	-۳/۱	-۵/۶	-۸/۸	-۲۹/۳
۲۶	-۱/۱	-۲/۴	-۵	-۱۰/۲	-۳۳/۶
۲۷	-۱/۱	-۲/۹	-۵	-۹/۴	-۳۰/۹
۲۸	-۰/۹	-۲/۵	-۵	-۸/۸	-۳۰/۳
۲۹	-۰/۸	-۳/۴	-۵/۵	-۹/۹	-۳۰/۳
۳۰	-۱	-۲/۵	-۵/۴	-۸/۳	-۲۹/۱
۳۱	-۱	-۳/۲	-۵/۱	-۱۰/۲	-۳۱/۹
۳۲	-۱/۱	-۲/۷	-۵/۸	-۹/۹	-۳۲/۴
۳۳	-۱	-۲/۹	-۵/۶	-۸/۶	-۲۸/۸
۳۴	-۱	-۲/۸	-۶/۷	-۹/۹	-۳۲
۳۵	-۰/۹	-۳/۷	-۶/۳	-۹/۶	-۲۹
۳۶	-۱/۱	-۳/۷	-۵/۷	-۱۱/۱	-۳۲/۳
۳۷	-۰/۹	-۲/۷	-۶	-۹/۲	-۳۰/۷
۳۸	-۱/۱	-۲/۷	-۵	-۹/۴	-۳۱/۴
۳۹	-۰/۹	-۱/۸	-۵/۲	-۹/۷	-۳۴
۴۰	-۱/۱	-۳	-۵/۲	-۱۰/۸	-۳۳/۹

که به معنی آن است که ۹۸ درصد تغییرات در میزان جذب با برازش رابطه پروفایلی فوق حاصل می‌شود. به عبارت دیگر، ضریب تعیین فوق نشان می‌دهد که ۹۸ درصد تغییرات این فرآیند توسط مدل تخمین زده شده، نشان داده می‌شود که عدد بسیار خوبی است. معادله شماره (۹)، رابطه تابعی بین ضخامت اکسید گرافن و میزان از دست دادن بازتاب را نشان می‌دهد.

$$y = 172.43 - 205.76x + 79.91x^2 - 10.31x^3 \quad (9)$$



شکل ۲- الف) مقادیر باقیمانده‌ها به‌ازای مقادیر برازش شده، ب) نمودار احتمال نرمال باقیمانده‌ها، ج) مقادیر باقیمانده‌ها به‌ازای مشاهدات، د) هیستوگرام باقیمانده‌ها.

ترسیم نتایج آماره بدست آمده در جدول (۳) در نمودار کنترل شکل (۳) نشان دهنده تحت کنترل قرار گرفتن فرایند در فاز یک است. در نتیجه می‌توان از مدل تخمین زده شده شماره (۱) برای کنترل تغییرپذیری میزان جذب امواج در فاز دو با رویکرد پروفایلی استفاده کرد.

۳-۱-۱- فاز دو

در فاز دو کنترل با استفاده از پارامترهای به‌دست آمده در فاز یک بر اساس مدل تحت کنترل، میزان تغییرپذیری در فرایند پایش می‌شود.

بدین منظور با توجه به پارامترهای مدل برازش شده در فاز یک ماتریس واریانس- کواریانس برای پایش پروفایل‌های فاز دو به‌دست می‌آید.

بر اساس ماتریس به‌دست آمده معکوس ماتریس واریانس- کواریانس به‌صورت زیر است.

$$S^{-1} = \begin{bmatrix} 4.4318 & 7.5919 & 12.5855 & 18.1375 \\ 7.5919 & 18.8905 & 48.0947 & 134.3101 \\ 12.5855 & 48.0947 & 162.5487 & 545.9689 \\ 18.1375 & 134.3101 & 545.9689 & 2022.2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

محمود در پژوهشی با استفاده از ۲۰۰۰۰ تکرار در شبیه‌سازی جهت یافتن بهترین حدود کنترل به‌ازای تعداد ۴۰ پروفایل و $\alpha = 0.05$ حدود کنترل بالای ۱۲/۹۴ را برای این آماره پیشنهاد داد (۲۶).

ادامه جدول ۲-

$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_0$	شماره پروفایل
-۱۰/۲۷	۷۹/۸	-۲۰۵/۶	۱۷۲	۲۷
-۱۰/۲۳	۷۹/۶	-۲۰۵/۳	۱۷۲/۱	۲۸
-۱۰	۷۸/۴	-۲۰۴/۵	۱۷۳/۵	۲۹
-۹/۹۷	۷۸	-۲۰۲	۱۷۰	۳۰
-۱۰/۳۴	۸۰/۳	-۲۰۷/۱	۱۷۳/۷	۳۱
-۱۰/۲۷	۷۹/۵	-۲۰۴	۱۷۱	۳۲
-۹/۸۹	۷۷/۷	-۲۰۳	۱۷۱/۴	۳۳
-۱۰/۰۸	۷۸/۶	-۲۰۴	۱۷۲	۳۴
-۹/۷۶	۷۷/۳	-۲۰۴	۱۷۴/۷	۳۵
-۱۰/۰۱	۷۷/۷	-۲۰۱/۲	۱۶۹/۳	۳۶
-۱۰/۱۲	۷۹/۱	-۲۰۵	۱۷۴	۳۷
-۱۰/۳۴	۸۰/۱	-۲۰۵/۷	۱۷۱/۶	۳۸
-۱۰/۵۹	۸۱	-۲۰۵	۱۷۰	۳۹
-۱۰/۵۷	۸۱/۴	-۲۰۸	۱۷۳/۱	۴۰
-۱۰/۳۱	۷۹/۹۱	-۲۰۵/۷۶	۱۷۲/۴۳	$\bar{\beta}$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 5.7072 & -3.3281 & -0.1440 & 0.2109 \\ -3.3281 & 4.2522 & -1.6382 & 0.1944 \\ -0.1440 & -1.6382 & 1.4704 & -0.2753 \\ 0.2109 & 0.1944 & -0.2753 & 0.0613 \end{bmatrix} \quad (13)$$

معکوس ماتریس واریانس-کواریانس برای استفاده در آماره T^2 به دست می‌آید.

$$\Sigma^{-1} = \begin{bmatrix} 1.7589 & 2.1272 & 0.9207 & -8.6606 \\ 2.1294 & 3.4579 & 4.0005 & -0.3245 \\ 0.9313 & 4.0130 & 14.1986 & 47.8318 \\ -8.6170 & -0.2564 & 47.9119 & 261.9141 \end{bmatrix} \quad (14)$$

جدول ۲- ضرایب مدل در فاز یک

$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_0$	شماره پروفایل
-۱۰/۱۳	۷۹/۲	-۲۰۵/۸	۱۷۳/۶	۱
-۱۰/۷۹	۸۱/۶۸	-۲۰۵/۳	۱۶۸/۳۱	۲
-۱۰/۲۵	۷۹/۶	-۲۰۴/۹	۱۷۱/۴	۳
-۱۰/۴۷	۸۰/۱	-۲۰۴/۵	۱۷۰/۴	۴
-۱۰/۲۵	۷۹/۸	-۲۰۶	۱۷۲	۵
-۱۰/۶۳	۸۱/۳	-۲۰۷/۲	۱۷۲/۴	۶
-۱۰/۱۸	۸۰	-۲۰۸/۷	۱۷۶/۷	۷
-۱۰/۵۸	۸۱/۲	-۲۰۷	۱۷۲	۸
-۱۰/۲۵	۸۰	-۲۰۷/۴	۱۷۴/۸	۹
-۹/۹۹	۷۸/۷	-۲۰۶	۱۷۶	۱۰
-۱۰/۴	۸۰/۸	-۲۰۸/۴	۱۷۴/۷	۱۱
-۱۰/۳۹	۸۱/۲	-۲۱۰	۱۷۶	۱۲
-۱۰/۶	۸۱/۶	-۲۰۸	۱۷۳	۱۳
-۱۰/۲۴	۸۰/۲	-۲۰۸	۱۷۵/۶	۱۴
-۹/۹	۷۸/۳	-۲۰۶/۳	۱۷۶/۴	۱۵
-۱۰/۷۹	۸۱/۸	-۲۰۶	۱۶۹/۳	۱۶
-۱۰/۵۲	۸۱/۲	-۲۰۷/۶	۱۷۲/۶	۱۷
-۱۰/۵۲	۸۱/۴	-۲۰۸/۹	۱۷۴/۸	۱۸
-۱۰/۳۹	۷۹/۶	-۲۰۳/۵	۱۶۹/۵	۱۹
-۱۰/۶۱	۸۱	-۲۰۵/۷	۱۷۰/۱	۲۰
-۱۰/۱۶	۷۸/۵	-۲۰۲/۶	۱۷۰/۶	۲۱
-۱۰/۳۸	۸۰/۵	-۲۰۷/۴	۱۷۳/۹	۲۲
-۱۰/۴۴	۸۰/۶	-۲۰۶/۲	۱۷۱/۲	۲۳
-۱۰/۳۹	۸۰/۲	-۲۰۵/۱	۱۷۰/۶	۲۴
-۱۰/۱۵	۷۹/۸	-۲۰۸/۱	۱۷۵/۹	۲۵
-۱۰/۴	۷۹/۶	-۲۰۲	۱۶۷	۲۶

ادامه جدول ۳-

حد بالا	آماره	شماره پروفایل
۱۲/۹۴	۰/۸۳۴۶	۲۷
۱۲/۹۴	۰/۷۵۸	۲۸
۱۲/۹۴	۳/۱۱۴۲	۲۹
۱۲/۹۴	۹/۹۹۸۲	۳۰
۱۲/۹۴	۰/۸۵۴۱	۳۱
۱۲/۹۴	۳/۰۷۳۷	۳۲
۱۲/۹۴	۹/۴۱۳۵	۳۳
۱۲/۹۴	۳/۰۸۰۳	۳۴
۱۲/۹۴	۸/۹۶۵	۳۵
۱۲/۹۴	۱۰/۹۳۲۵	۳۶
۱۲/۹۴	۸/۶۴۴۱	۳۷
۱۲/۹۴	۰/۹۰۴۱	۳۸
۱۲/۹۴	۶/۳۰۱۲	۳۹
۱۲/۹۴	۲/۸۱۳۴	۴۰

جدول ۳- آماره T^2 در فاز یک کنترل

حد بالا	آماره	شماره پروفایل
۱۲/۹۴	۱/۲۵۳۶	۱
۱۲/۹۴	۵/۴۷۵۳	۲
۱۲/۹۴	۱/۱۴۴۶	۳
۱۲/۹۴	۶/۶۵۴۳	۴
۱۲/۹۴	۴/۳۵۷۵	۵
۱۲/۹۴	۷/۴۱۷۵	۶
۱۲/۹۴	۳/۶۹۶	۷
۱۲/۹۴	۲/۲۴۲۱	۸
۱۲/۹۴	۱/۳۷۰۸	۹
۱۲/۹۴	۶/۶۳۴۸	۱۰
۱۲/۹۴	۲/۷۱۹۴	۱۱
۱۲/۹۴	۶/۹۳۶۴	۱۲
۱۲/۹۴	۳/۷۱۳۵	۱۳
۱۲/۹۴	۲/۸۴۶۲	۱۴
۱۲/۹۴	۶/۸۷۹۹	۱۵
۱۲/۹۴	۵/۳۲۵۸	۱۶
۱۲/۹۴	۲/۳۱۳۷	۱۷
۱۲/۹۴	۴/۲۵۷۹	۱۸
۱۲/۹۴	۶/۸۴۹۴	۱۹
۱۲/۹۴	۳/۹۵۸۸	۲۰
۱۲/۹۴	۸/۸۷۵۳	۲۱
۱۲/۹۴	۱/۴۰۷۳	۲۲
۱۲/۹۴	۲/۳۷۸	۲۳
۱۲/۹۴	۱/۳۹۴۹	۲۴
۱۲/۹۴	۲/۷۲۸۴	۲۵
۱۲/۹۴	۶/۴۹۷۹	۲۶

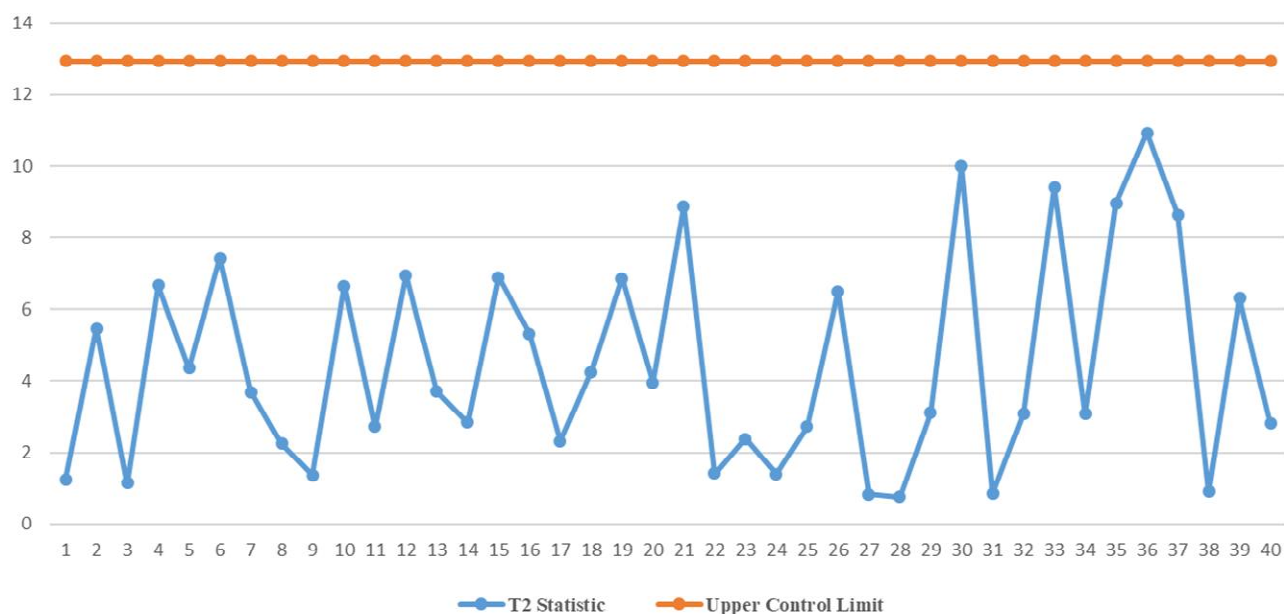
در ادامه برای کنترل کیفیت جذب امواج آماره T^2 بر اساس پارامترهای هر مدل محاسبه می‌شود.

$$T_j^2 = (Z_j - \mu)^T \Sigma^{-1} (Z_j - \mu) \quad (15)$$

برای کنترل تغییرپذیری جذب امواج به‌ازای قطرهای مختلف اکسید گرافن از داده‌های مربوط به ۱۳ پروفایل بعد از تثبیت فرایند در فاز یک استفاده شده است. مقادیر به‌دست آمده برای پایش پروفایل در فاز دو در جدول (۴) ارائه شده است.

پس از تعیین پارامترهای مدل رگرسیونی در فاز دو میزان آماره T^2 محاسبه شده و با توجه به حد بالای کنترل به‌دست آمده تحت کنترل بودن فرایند ارزیابی و پایش می‌شود.

$$\alpha = 1 - (1 - \alpha_{\text{overall}})^{\frac{1}{m}} = 1 - (1 - 0.05)^{\frac{1}{40}} = 0.00128 \quad (16)$$



شکل ۳- نمودار کنترل مبتنی بر تفاوت‌های متوالی.

$$UCL = \chi^2_{4,0.00128} = 17.92 \quad (17)$$

مقادیر به دست آمده آماره T^2 در جدول (۵) نمایش داده شده است. ترسیم نتایج جدول (۵) در نمودار کنترل شکل (۴) نشان دهنده تحت کنترل بودن تمامی نتایج است.

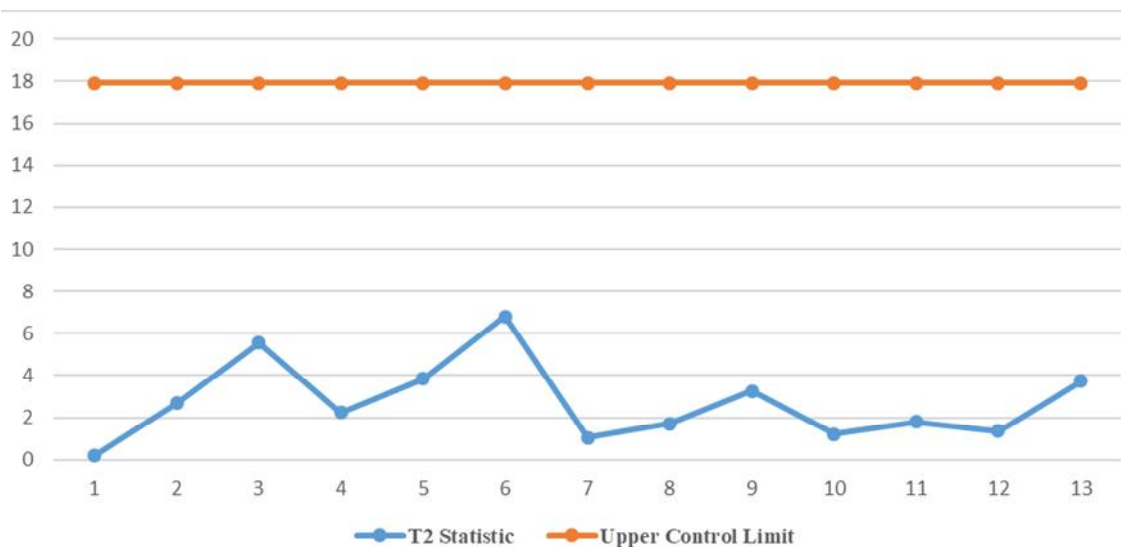
نتایج فاز دو نشان می‌دهد علی‌رغم افزایش آماره در پروفایل شماره (۶) در تمامی مراحل بررسی شرایط داده‌ها ایستا بوده و تغییر پذیری بادل در مدل ظاهر نشده است.

۳-۲- تحلیل حساسیت نمودار کنترل

به منظور تحلیل حساسیت نمودار کنترل ارائه شده به ازای تغییرات در پارامترهای مدل از آماره میانگین طول دنباله خارج از کنترل^۶ استفاده شده است. ضرورت این تحلیل از این رو است که میانگین طول دنباله خارج از کنترل نشان‌دهنده توانایی نمودار در شناسایی تغییرات در فرایند است. به منظور تحلیل حساسیت از نرم‌افزار متلب با تکرار ۶۰۰۰۰ مرتبه برای محاسبه هر میانگین خارج از کنترل استفاده شده است. نتایج به ازای

جدول ۴- نتایج جذب امواج در فاز دو

شماره پروفایل	قطر اکسید گرافن استفاده شده (میلی‌متر)				
	۱/۹	۲/۵	۳	۳/۵	۴
۱	-۱	-۲/۶	-۵/۷	-۹/۵	-۳۱/۷
۲	-۱/۱	-۲/۶	-۵/۴	-۹/۸	-۳۲/۸
۳	-۱/۱	-۲/۸	-۵/۳	-۱۰/۴	-۳۳
۴	-۱	-۳/۲	-۴/۹	-۱۰/۶	-۳۲/۹
۵	-۱/۱	-۲/۹	-۴/۸	-۱۱/۱	-۳۴/۴
۶	-۱/۱	-۳/۴	-۵/۴	-۸/۷	-۲۸/۵
۷	-۱/۲	-۳/۵	-۶	-۱۰/۹	-۳۲/۷
۸	-۱/۲	-۳/۴	-۶/۳	-۱۰	-۳۱
۹	-۱/۲	-۲/۵	-۵/۵	-۱۰/۱	-۳۳/۸
۱۰	-۰/۹	-۲/۸	-۶/۱	-۹/۹	-۳۲
۱۱	-۰/۹	-۳/۴	-۵	-۹/۱	-۲۸/۸
۱۲	-۰/۹	-۲	-۵/۹	-۹/۹	-۳۳/۹
۱۳	-۱/۱	-۳/۶	-۵/۳	-۱۱/۱	-۳۲/۲



شکل ۴- نمودار کنترل مبتنی بر تفاوت‌های متوالی.

معیار نمایش داده شده است. بر اساس اطلاعات ارائه شده ردیف اول در صورتی که تغییر به میزان یک انحراف معیار در پارامتر β_0 رخ دهد مدل ارائه شده به‌طور میانگین توانایی کشف این تغییر را پس از $19/6$ مرتبه نمونه‌گیری دارد. با توجه به سطر دوم اگر این تغییر برابر با دو انحراف معیار باشد؛ مدل توانایی کشف این تغییر را پس از $4/35$ مرتبه نمونه‌گیری دارد؛ در صورت وقوع سه انحراف معیار در پارامتر β_0 این تغییر بلافاصله توسط مدل ارائه شده کشف می‌شود. حساسیت مدل برای تغییر در پارامتر β_1 مناسب‌تر بوده و مدل ارائه شده در شیف‌ت به میزان یک انحراف معیار بلافاصله سیگنال خارج از کنترل بودن را اعلام می‌کند. به‌دلیل توان ۲ و ۳ در ضریب پارامترهای β_2 و β_3 تحلیل حساسیت این دو پارامتر به‌ازای تغییر کمتری محاسبه شده است. مقادیر به‌دست آمده نشان می‌دهد عملکرد نمودار ارائه شده به‌ازای تغییر تک پله‌ای در پارامترهای β_0 و β_1 به‌میزان یک انحراف معیار نسبتاً ضعیف است. این عملکرد در سایر تغییرات نشان داده شده در جدول (۶) و همچنین برای سایر پارامترها مناسب ارزیابی می‌شود.

با توجه به هزینه بسیار بالای تولید محصول نامطبق استفاده از این روش تحلیل حساسیت، به‌دلیل مشخص کردن عملکرد

جدول ۵- نتایج جذب امواج در فاز دو

شماره پروفایل	آماره	حد بالا
۱	۰/۱۹۳۸	۱۷/۹۲
۲	۲/۶۷۹۴	۱۷/۹۲
۳	۵/۵۵۶۱	۱۷/۹۲
۴	۲/۲۲۵۱	۱۷/۹۲
۵	۳/۸۳۷۱	۱۷/۹۲
۶	۶/۷۹۴۱	۱۷/۹۲
۷	۱/۰۴۵۹	۱۷/۹۲
۸	۱/۷۰۳۹	۱۷/۹۲
۹	۳/۲۶۲۷	۱۷/۹۲
۱۰	۱/۲۲۶۵	۱۷/۹۲
۱۱	۱/۷۸۶۳	۱۷/۹۲
۱۲	۱/۳۵۸۷	۱۷/۹۲
۱۳	۳/۷۲۳۸	۱۷/۹۲

تغییرات مختلف در پارامترهای مدل در جدول (۶) نمایش داده شده است.

طبق اطلاعات جدول (۶) عملکرد مدل ارائه شده به‌ازای تغییر در هر یک از پارامترهای مدل بر اساس ضریبی از انحراف

جدول ۶- نتایج تحلیل حساسیت

ردیف	مقدار شیفت در β_0 (σ^*)	مقدار شیفت در β_1 (σ^*)	مقدار شیفت در β_2 (σ^*)	مقدار شیفت در β_3 (σ^*)	ARL _{Out}
۱	۱	۰	۰	۰	۱۹/۶
۲	۲	۰	۰	۰	۴/۳۵
۳	۳	۰	۰	۰	۱
۴	۰	۱	۰	۰	۱۷/۳
۵	۰	۲	۰	۰	۱
۶	۰	۳	۰	۰	۱
۷	۰	۰	۰/۵	۰	۱۳/۲
۸	۰	۰	۱	۰	۱
۹	۰	۰	۱/۵	۰	۱
۱۰	۰	۰	۰	۰/۱	۱۵/۴
۱۱	۰	۰	۰	۰/۲	۲/۰۲
۱۲	۰	۰	۰	۰/۳	۱
۱۳	۱	۱	۰	۰	۳/۶
۱۴	۱	۰	۰/۵	۰	۶/۹۸
۱۵	۱	۰	۰	۰/۱	۱/۳۰
۱۶	۰	۱	۰/۵	۰	۲/۰۵
۱۷	۰	۱	۰	۰/۱	۶/۴۴
۱۸	۰	۰	۰/۵	۰/۱	۲/۲۷
۱۹	۱	۱	۰/۵	۰	۱
۲۰	۰	۱	۰/۵	۰/۱	۱
۲۱	۱	۰	۰/۵	۰/۱	۱/۷
۲۲	۱	۱	۰	۰/۱	۲/۷
۲۳	۱	۱	۰/۵	۰/۱	۱

مدل ارائه شده در زمان بروز تغییرات و از کنترل خارج شدن فرآیند دید مناسبی از کفایت مدل ارائه شده می‌دهد.

۴- نتیجه‌گیری

استفاده از پایش پروفایل برای اطمینان از کیفیت مناسب محصولات و خدمات ابزاری بسیار پیشرفته و اثربخش است. نانومواد پیشرفته همچون اکسید گرافن با توجه به پیچیدگی‌های فراوان در فرآیند تولید و هزینه بالای آن نیازمند ابزاری با دقت

و سرعت بالا جهت کنترل کیفیت مطلوب می‌باشد. زمانبر بودن و هزینه بالای کنترل کیفیت محصولات با پوشش دهی نانومواد به‌عنوان یکی از نقاط ضعف استفاده از این مواد به‌شمار می‌رود (۹). در زمانی که تعداد متغیرهای کیفی به‌هم وابسته افزایش می‌یابد روش‌های سنتی کنترل کیفیت کارایی مناسبی جهت کنترل تغییرپذیری فرایند از خود نشان نمی‌دهند. حال آنکه با استفاده از روش پایش پروفایل به‌منظور کنترل کیفیت محصولات با فناوری پیشرفته تشخیص نقاط خارج از کنترل

تشکر و سپاسگزاری

این تحقیق حمایت خاصی از مؤسسات عمومی، صنعتی و غیرانتفاعی دریافت نکرده است.

تضاد منافع

نویسندگان مقاله اذعان دارند هیچ نوع تضاد منفعی با شخص، شرکت یا سازمانی برای این پژوهش ندارند

سریع تر و هزینه کیفیت به شدت کاهش می‌یابد. این پژوهش با استفاده از رویکرد پروفایل نشان داد که کنترل کیفیت رادارگریزی سازه‌های نظامی برای افزایش کارایی این تجهیزات در زمان دفاع، در فاز یک و دو خوبی قابل انجام است. در این تحقیق مشخص شد از این رویکرد تابعی می‌توان به‌منظور کنترل تغییرپذیری میزان جذب امواج توسط ادوات پوشش داده شده با اکسید گرفتن استفاده کرد.

واژه‌نامه

1. allotropy
2. vibrating sample magnetometer
3. photo catalyst
4. upper control limit
5. coefficient of determination (COD)
6. average run length out of control (ARL_{out})

مراجع

1. Guarnieri M. The early history of radar [Historical]. IEEE Industrial Electronics Magazine 2010;4(3):36-42.
2. Wu B, Tuncer HM, Naeem M, Yang B, Cole MT, Milne WI, et al. Experimental demonstration of a transparent graphene millimetre wave absorber with 28% fractional bandwidth at 140 GHz. Scientific reports 2014;4(1):4130.
3. Wang C, Han X, Xu P, Zhang X, Du Y, Hu S, et al. The electromagnetic property of chemically reduced graphene oxide and its application as microwave absorbing material. Applied Physics Letters 2011; 98(7):072906.
4. Beshkar F, Zinatloo-Ajabshir S, Salavati-Niasari M. Simple morphology-controlled fabrication of nickel chromite nanostructures via a novel route. Chemical Engineering Journal 2015;279:605-614.
5. Pawar SP, Gandi M, Arief I, Krause B, Pötschke P, Bose S. Graphene derivatives doped with nickel ferrite nanoparticles as excellent microwave absorbers in soft nanocomposites. ChemistrySelect 2017;2(21):5984-99.
6. Zinatloo-Ajabshir S, Heidari-Asil SA, Salavati-Niasari M. Simple and eco-friendly synthesis of recoverable zinc cobalt oxide-based ceramic nanostructure as high-performance photocatalyst for enhanced photocatalytic removal of organic contamination under solar light. Separation and Purification Technology 2021;267:118667.
7. Green M, Chen X. Recent progress of nanomaterials for microwave absorption. Journal of Materiomics 2019;5(4):503-41.
8. Zhang J, Li Z, Shao L, Zhu W. Dynamical absorption manipulation in a graphene-based optically transparent and flexible metasurface. Carbon 2021; 176:374-82.
9. Ding P, Li M, Tian X, Li Y, Shao L, Xu K, et al. Graphene metasurface for broadband, wide-angle and polarization-insensitive carpet cloak. Optical Materials 2021;121:111578.
10. Li J, Xu Z, Li T, Zhi D, Chen Y, Lu Q, et al. Multifunctional antimony tin oxide/reduced graphene oxide aerogels with wideband microwave absorption and low infrared emissivity. Composites Part B: Engineering 2022;231:109565.
11. Wu K-H, Huang W-C, Wang J-C, Hung W-C. Infrared stealth and microwave absorption properties of reduced graphene oxide functionalized with Fe₃O₄. Materials Science and Engineering: B 2022;276: 115575.
12. Marchesini S, Turner P, Paton KR, Reed BP, Brennan B, Koziol K, et al. Gas physisorption measurements as a quality control tool for the properties of graphene/graphite powders. Carbon 2020;167:585-95.
13. Goldie SJ, Bush S, Cumming JA, Coleman KS. A statistical approach to raman analysis of graphene-related materials: implications for quality control. ACS Applied Nano Materials 2020;3(11):11229-39.
14. Montgomery DC. Statistical quality control: Wiley New York; 2009.
15. Hotelling H. Multivariate quality control, illustrated by the air testing of sample bombsights. Techniques of statistical analysis 1947:111-84.
16. Mestek O, Pavlík J, Suchánek M. Multivariate control charts: control charts for calibration curves. Fresenius' journal of analytical chemistry 1994; 350(6):344-51.
17. Stover FS, Brill RV. Statistical quality control

- applied to ion chromatography calibrations. *Journal of Chromatography A* 1998;804(1-2):37-43.
18. Kang L, Albin SL. On-line monitoring when the process yields a linear profile. *Journal of Quality Technology* 2000;32(4):418-26.
 19. Williams JD, Woodall WH, Birch JB, Sullivan JH. Distribution of Hotelling's T^2 statistic based on the successive differences estimator. *Journal of Quality Technology* 2006;38(3):217-29.
 20. Nikoo M, Noorossana R. Phase II monitoring of nonlinear profile variance using wavelet. *Quality and Reliability Engineering International* 2013;29(7): 1081-9.
 21. Saghaei A, Maserrat N. Monitoring of the disease: new user profiles Case Study: Lung Disease. *international journal of industrial engineering and production management* 2008;22:54-63.
 22. Atashgar K, Amiri A, Nejad MK. Monitoring Allan variance nonlinear profile using artificial neural network approach (In Persian). *International Journal of Quality Engineering and Technology* 2015;5(2): 162-77.
 23. Deng Y, Hou B, Chen Y, Wang D, editors. Nonparametric nonlinear profile monitoring method for machine condition monitoring. *Journal of Physics: Conference Series*; 2022: IOP Publishing.
 24. Wang T, Wang Y, Zang Q. Outlier detection in non-parametric profile monitoring. *Statistics* 2022:1-18.
 25. Atashgar K. *Advanced Statistical Process Control (Simple Linear Profile Monitoring) (In Persian)*: Malek Ashtar University of Technology; 2020.
 26. Noorossana R, Saghaei A, Amiri A. *Statistical analysis of profile monitoring*: Wiley Online Library; 2011.
 27. Kazemzadeh RB, Noorossana R, Amiri A. Phase I monitoring of polynomial profiles. *Communications in Statistics—Theory and Methods* 2008;37(10):1671-86.
 28. Williams JD, Woodall WH, Birch JB. Statistical monitoring of nonlinear product and process quality profiles. *Quality and Reliability Engineering International* 2007;23(8):925-41.
 29. Amiri A, Jensen WA, Kazemzadeh RB. A case study on monitoring polynomial profiles in the automotive industry. *Quality and Reliability Engineering International* 2010;26(5):509-20.
 30. Zong M, Huang Y, Ding X, Zhang N, Qu C, Wang Y. One-step hydrothermal synthesis and microwave electromagnetic properties of RGO/NiFe₂O₄ composite. *Ceramics International* 2014;40(5):6821-8.