نشریه مهندسی مکانیک نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران



طراحي الگوريتم تعقيب هدف براي حركت گروهي ربات ها

چکیده: در این مقاله به معرفی روش های مختلف در خصوص حرکت چیدمانی ربات ها و احصاء معایب و محاسن این روش ها پرداخت شده است. با ترکیب روش های تابع پتانسیل، ساختار مجازی و تعقیب رهبر، الگوریتمی بدست می آید که ضمن دارا بودن محاسن روش های مزبور، معایب و چالش های این روش ها را نیز تا حد زیادی بر طرف کرده است. الگوریتم حاصل جهت طراحی مسیر مطلوب حرکت ربات ها مورد استفاده قرار می گیرد و یک کنترل کننده مد لغزشی بعنوان ابزاری مفید برای مجبور نمودن ربات ها جهت تبعیت از این مسیرهای مطلوب نقش ایفاء می کند. در نهایت برای ارزیابی کارکرد سامانه طراحی شده، حرکت یک گروه شش تایی از ربات های غیرهولونومیک که یک هدف را بصورت چیدمان مثلثی در بر گرفته اند، در نرم افزار متلب مورد شبیه سازی قرار گرفته است. با تجریه و تحلیل نتایج بدست آمده و مقایسه با کارهای انجام شده سایر محققین، مشخص شد که الگوریتم معرفی شده مزایای مهمی نسبت به کارهای قبلی، از قبیل: کاهش حجم محاسبات، حذف حداقل های محلی توابع پتانسیل، کاهش محدوده تغییرات ورودی های کنترلی دینامیک ربات ها و کاهش تعداد ضرایب وزنی جهت تنظیم توابع پتانسیل را به علی میرزایی کهق^{*} استادیار، گروه هوایی، دانشگاه علوم انتظامی امین، تهران

مقاله: علمی پژوهشی دریافت: ۱۴۰۰/۱۲/۱۷ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۲

واژه های راهنما: حرکت گروهی، تابع پتانسیل، تعقیب رهبر، کنترل مد لغزشی

Ali Mirzaee Kahagh* Assistant professor, Department of Aerial, Amin Police University, Tehran

Designing a target tracking algorithm for group movement of robots

Abstract: In this article, various methods have been introduced regarding the movement of robots and the advantages and disadvantages of these methods. By combining the methods of potential function, virtual structure and leader tracking, an algorithm is obtained that, while having the merits of the mentioned methods, also overcomes the disadvantages and challenges of these methods to a large extent. The resulting algorithm is used to design the desired movement path of the robots, and a sliding mode controller acts as a useful tool to force the robots to follow these desired paths. Finally, to evaluate the performance of the designed system, the movement of a group of six non-holonomic robots that surround a target in a triangular formation has been simulated in MATLAB software. The obtained results is compared with the works done by other researchers. It was found that the introduced algorithm has important advantages over previous works, such as reducing the volume of calculations, removing the local minima of potential functions, reducing the range of input changes, the robot of the number of weight coefficients to adjust the potential functions. It should be noted that the resulting advantages make this method more suitable for practical applications.

Keywords: Group movement, Potential function, Leader-Tracking, Sliding mode control

۱– مقدمه

طراحی چیدمان هندسی یکی از ملزومات متداول در بکارگیری حرکت گروهی ربات ها می باشد و مطالعات و پژوهش های مفصلی در مورد آنها صورت گرفته است. با مرور و بررسی تحقیقات انجام گرفته، کنترل چیدمان هندسی را می توان بطور عمده در چهار گروه تقسیم بندی کرد.

۱- روش تعقیب رهبر^۱: در این روش یکی از عناصر بعنوان رهبر گروه انتخاب می شود و سایر اعضای گروه موقعیت خود را با رهبر گروه تنظیم می نمایند[۱] و[۲]. عمدتاً دستورات و اطلاعات هدایت و ناوبری گروه به رهبر گروه داده می شود و به همین خاطر است که رهبر گروه نقش هدایتگری و رکن اصلی گروه را دارد و در صورت از کار افتادگی رهبر، کل گروه با سردرگمی مواجه خواهند شد[۳].

در کاربردهای عملی روش تعقیب رهبر بدلیل سهولت طراحی و توسعه پذیربودن^۲نسبت به سایر روش ها مناسب تر می باشد[۴]. مرور تحقیقات انجام شده نشان می دهد که با وجود مشکل وابستگی به رهبر، این روش همچنان بطور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد و پایداری و همگرایی چیدمان بصورت تئوری قابل تضمین است[۵].

۲- روش ساختار مجازی^۳: در این روش از عناصر یا نقاط مجازی برای ایجاد یک چیدمان هندسی استفاده می شود. در این روش عناصر گروه با تبعیت از یک ساختار مجازی موقعیت هندسی مشخصی را نسبت به همدیگر اتخاذ و حفظ می نمایند[۶]. در این شیوه کل چیدمان بصورت یک پیکر واحد در نظر گرفته می شود و هر عضو در یک موقعیت هندسی از این موقعیت تمامی عناصر نسبت به مرکز ساختار مجازی تعیین می پیکر قرار گرفته و موقعیت خود را در این پیکر حفظ می کند[۷]. در این روش با حداقل سازی اختار مجازی تعیین می چیدمان واقعی و ساختار مجازی توسط یک نوع کنترل کننده، شود[۸]. در این روش با حداقل سازی اختلاف موقعیت بین می چیدمان واقعی و ساختار مجازی توسط یک نوع کنترل کننده، چیدمان هندسی واقعی به سمت ساختار مجازی میل کرده و چیدمان هندسی واقعی به سمت ساختار مجازی میل کرده و تابلیت تعقیب آن را دارد. هر چند این روش برخلاف روش قبلی در مقابل خرابی و مشکلات مبتلا به رهبر گروه مقاوم است، اما تغییرات چیدمان هندسی متناسب با تغییرات محیطی کار مشکلی است[۹].

۳- روش رفتار پایه^۱: یک روش غیر متمرکز برای کنترل ربات هاست[۱۰]. این روش از رفتار گروهی جانوران الهام گرفته

شده است[11]. عامل کنترلی هر عضو در چیدمان از تجمیع الزامات عملکردی مطلوب مسئله (تعقیب هدف، حفظ چیدمان، حذر از مانع⁶و ...) بدست می آید[1۲]. مشکل اصلی این روش دشواری مدل سازی ریاضی گروه است که امکان اثبات پایداری و همگرایی گروه را به طراح نمی دهد[۱۳]. روش رفتار پایه روشی ساده برای طراحی است و دارای عکس العمل سریع و مناسبی نسبت به تغییرات محیطی دارد اما مشکل پیش بینی رفتار دارد و کنترل پایداری چیدمان در این روش مشکل است[۱۴] و[۱۵].

۴- روش توابع پتانسیل: برای اولین بار خطیب در [۱۶] از میدان پتانسیل برای هدایت ربات ها استفاده نمود. در این روش فرض می شود که ربات بعنوان یک ذره، در محیطی تحت تاثیر یک میدان نیرو قرار دارد. در این محیط هدف نیروی جاذبه و موانع نیروهای دافعه ای به ربات وارد می کنند. جهت حرکت لحظه ای ربات ها در راستای برآیند نیروهای مجازی وارده انجام می شود. در این روش می توان همزمان با کنترل چیدمان هندسی قابلیت عدم برخورد بین عناصر گروه و موانع محیط را به راحتی با تعریف توابع پتانسیل جاذبه و دافعه تضمین نمود. روش تابع پتانسیل با وجود داشتن محدویت بوجود آمدن کمینه های محلی در حین کاربرد، بدلیل سهولت طراحی و مناسب بودن برای کنترل و هدایت سامانه های بر خط مورد توجه محققین زیادی است.[۱۷]

روش های ذکر شده بعنوان روش های پایه و کلاسیک در حوزه حرکت گروهی هستند و بطور مستقیم و خالص کاربست عملی ندارند، لکن محققین مختلف با ترکیب این روش ها با ابزارهای کنترلی مختلف، روش های ترکیبی و مفیدی را ارائه داده اند. بعنوان مثال ترکیب روش تابع پتانسیل با روش لیاپانوف [۱۸]، اضافه کردن روش کنترلی پسگام[۱۹] یا افزایش قابلیت هایی مانند تغییر شکل تابع پتانسیل متناسب با زاویه نسبی بین ربات و مانع است[۲۰]، [۲۱] از جمله روش هایی هستند که در سال های اخیر جهت بهبود روش تابع پتانسیل و رفع معایب آن بکاربرده شده است.

آقای قاضی نیز از جمله افرادی است که در دهه اخیر تحقیقات زیادی در خصوص استفاده از توابع پتانسیل برای کنترل حرکت گروهی ربات ها انجام داده است[۲۲-۲۴]. از اینرو در این مقاله سعی شده است ضمن ترکیب روش های پایه و

⁴ Behavior – based approach

⁵ Obstacle avoidance

¹ Leader-following approach² Scalability

³ The virtual structure approach

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{i}^{E} \\ \bar{y}_{i}^{E} \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & x_{t} \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & y_{t} \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{x}_{i}^{T} \\ \bar{y}_{i}^{T} \\ 1 \end{bmatrix}$$
(7)

$$\bar{p}_i^E = C_L^E \, \bar{p}_i^T \tag{(7)}$$

 \bar{p}_i^T : بردار موقعیت عنصر مجازی در دستگاه مختصات متحرک \bar{p}_i^T : بردار موقعیت عنصر مجازی در دستگاه مختصات ثابت \bar{p}_i^E : بردار موقعیت عنصر مجازی در دستگاه مختصات ثابت C_T^E : ماتریس تبدیل همگن. بعد از بدست آوردن موقعیت ساختار مجازی در دستگاه مختصات ثابت با تعریف توابع پتانسیل بین عناصر واقعی و مجازی، مجبور می کنیم که عناصر حقیقی به سمت عناصر مجازی رانده شوند و به عبارتی عناصر مجازی دار خطای

و به عبارتی عناصر مجاری را تعقیب نمایند. برای این نار خطای فاصله^۲بین دو عنصر مجازی و حقیقی متناظر را بصورت زیر تعریف می کنیم.

$$e_i = \bar{p}_i - p_i \tag{(f)}$$

و مجازی $p_i = \begin{bmatrix} x_i^E \\ y_i^E \end{bmatrix}$ و $p_i = \begin{bmatrix} \bar{x}_i^E \\ \bar{y}_i^E \end{bmatrix}$ و $\bar{p}_i = \begin{bmatrix} \bar{x}_i^E \\ \bar{y}_i^E \end{bmatrix}$ و حقیقی در دستگاه مختصات ثابت می باشند.

اگر برای یک گروه n عضوی با موقعیت های نسبی p_i در دستگاه مختصات ثابت مدل سینماتیکی اعضاء را بصورت زیر تعریف کنیم.

$$\dot{p}_i = u_i \quad , \ i = 1, 2, \dots, n \tag{(\Delta)}$$

*u*_i بردار ورودی کنترل چیدمان خواهد بود که ترکیبی از ورودیهای کنترلی است که در ادامه توضیح داده می شود. اولین ورودی تابعی است که اعضای واقعی گروه را به سمت عناصر مجازی متناظر می راند و از گرادیان تابع پتانسیل تعریف شده روی متغیر خطای *e*_i بصورت زیر بدست می آید.

$$u_{1i} = -\Delta U_{1i} \tag{(?)}$$

 U_{1i} تابع پتانسیل بین عنصر أام با همتای مجازی است که برای همگرایی اعضای گروه به سمت ساختار مجازی استفاده می شود. ساختار این تابع که برای اولین بار در این مقاله بعنوان تابع پتانسیل بصورت زیر معرفی می شود، بدلیل یکنواخت بودن گرادیان تابع در فواصل مختلف (به غیر از مواقعی که فاصله بین دو عضو به سمت صفر میل می کند) به راحتی با تنظیم یک ضریب وزنی بر اساس سرعت ربات، در تمامی شرایط کاری اضافه کردن ابزار کنترل مد لغزشی به گونه ای عمل شود که پاره ای از نواقص کارهای قبلی مرتفع گردد. صورت مسئله طوری طراحی شده که قابل مقایسه با کارهای انجام گرفته قبلی به ویژه با کارهای آقای قاضی باشد، تا بتوان معایب و محاسن کار ارائه شده را مشخص کرد.

۲- کنترل چیدمان

در این کار با ترکیب سه روش ساختار مجازی، تعقیب رهبر و تابع پتانسیل یک الگوریتمی معرفی شده است که مزایای هر سه روش مزبور را یکجا دارد. در این روش با استفاده از حداقل اطلاعات ارتباطی (موقعیت نسبی بین اعضای گروه)، ضمن تشکیل چیدمان مطلوب، عناصر گروه یک هدفی را تعقیب می نمایند.

ابتدا یک دستگاه مختصات متحرک تعریف می شود که مبدا آن بر روی هدف سوار است و در فضای دو بعدی یکی از محورهای این دستگاه مماس بر مسیر حرکت هدف و محور دیگر عمود بر آن در نظر گرفته می شود. سپس موقعیت هر عضو بصورت مجازی در چیدمان مطلوب در دستگاه مختصات متحرک پیدا می شود و با استفاده از ماتریس های دوران و انتقال، موقعیت هندسی تک تک این عناصر مجازی به دستگاه مختصات ثابت منتقل می گردد. در,, نهایت در دستگاه مختصات ثابت یک ساختار مجازی مطلوبی بدست می آید که عناصر واقعی می باید بصورت متناظر خود را به آن ساختار برسانند. بنابراین برای پیدا بصورت متناظر خود را به آن ساختار برسانند. بنابراین برای پیدا مختصات ثابت، کافی است زاویه بین خط مماس بر مسیر حرکت

$$\theta(t) = \operatorname{atan}(\frac{y_t(t) - y_t(t - \Delta t)}{x_t(t) - x_t(t - \Delta t)}) \tag{1}$$

heta(t) : زاویه سمت دستگاه مختصات متحرک نسبت به دستگاه مختصات ثابت در لحظه t. $x_{t}(t)$: موقعیت نسبی هدف نسبت به دستگاه مختصات ثابت. موقعیت هر عنصر مجازی نسبت به دستگاه مختصات ثابت بصورت زیر قابل محاسبه است. $\begin{aligned} \dot{x}_{i} &= v_{i} \cos(\theta_{i}) \\ \dot{y}_{i} &= v_{i} \sin(\theta_{i}) \\ \ddot{x}_{i} &= \frac{1}{m_{i}} [F_{xi} + f_{x_{i}}] \\ \ddot{y}_{i} &= \frac{1}{m_{i}} [F_{yi} + f_{y_{i}}] \\ \dot{\theta}_{i} &= w_{i} \\ \dot{w}_{i} &= \frac{1}{I_{i}} [\tau_{i} + f_{w_{i}}] \end{aligned}$ (17)

موقعیت ربات i در دستگاه مختصات ثابت، $heta_i$ زاویه $p_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}$ سمت و W_i سرعت زاویه ای می باشد. m_i و M_i به ترتیب جرم w_i و ممان اینرسی و F_i (نیرو) و au_i (گشتاور) ورودی های کنترل هستند. f_{x_i} ، f_{x_i} و f_{w_i} توابع اغتشاشی نامشخص وارده بر ربات f_w^+ و f_v^+ ، f_x^+ ها مستند که تحت محدوده ها ی مشخص f_v^+ ، f_x^+ بصورت $|f_{w_i}| < f_w^+$ و $|f_y| < f_y^+$ ، $|f_{x_i}| < f_x^+$ محدود در نظر گرفته می شوند. همچنین فرض بر این است که مقادیر دقیق و I_i و I_i در دسترس نبوده و محدوده های بالا و پائین آنها یعنی I_i و $\overline{I} < I_i < \overline{I}_i < 0$ مشخص هستند. $0 < M < m_i < \overline{M}_i$ کنترل مد لغزشی یکی از روش های کنترل مقاوم می باشد. این کنترل کننده در برابر اغتشاشات و عدم قطعیت های ناشی از تغییر پارامتر ها مقاوم می باشد. استفاده از این روش در کنترل سیستم های غیر خطی متداول است. در کنترل مد لغزشی متغیرهای حالت سیستم به سمت یک سطح خاص در فضای حالت که سطح لغزش نامیده می شود، رانده می شود و سپس توسط یک سیستم کنترلی متغیرهای حالت در همسایگی این سطح لغزش نگه داشته مي شوند. طراحي اين كنترل كننده در دو مرحله انجام مي شود. قسمت اول: طراحي سطح لغزش بگونه ای که حرکت متغیرهای حالت روی این سطح، ویژگی های مورد نظر رفتار سیستم را برآورده کند. قسمت دوم: انتخاب یک سیاست کنترلی است که متغیرهای حالت سیستم را به سمت سطح لغزش براند [۲۶, ۲۷].

در این مقاله برای طراحی قسمت اول، یعنی طراحی سطح لغزش برای دینامیک ربات معرفی شده، بصورت زیر عمل می کنیم. ابتدا مقادیر مطلوب متغیرهای حالت دینامیک ربات ها (معادله ۱۲) با استفاده از توابع پتانسیل (معادله ۱۱) بصورت زیر بدست می آید.

$$\dot{p}_{di} \triangleq u_i \tag{17}$$

$$\theta_{di} \triangleq \arctan\left(\frac{u_{iy}}{u_{ix}}\right)$$
(14)

ورودی مناسب را به دینامیک ربات اعمال می کند. بنابراین تابع مذکور قابلیت تطبیق با ویژگی-های عملکردی ربات ها را داشته و مناسب کاربرد در پروژه-های واقعی در میدان عمل می باشد. در حالی که در اکثر کارهای قبلی به ویژه کارهای آقای قاضی، توابعی استفاده می شود که مقادیر آنها بصورت خطی یا نمایی با افزایش فاصله بین ربات ها افزایش می یابد[۲۴].

$$U_{1i} = \frac{w_{1i}}{a_1} \ln(\cosh(a_1 \|\bar{p}_i - p_i\|_{\sigma}))$$
(Y)

ضریب وزنی قابل تنظیم است. نکته: $\| z \|_{\sigma} = R \ge 0$ یک بردار)، یک نگاشت $\| z \|_{\sigma} = R^m$ می باشد که بصورت زیر تعریف می شود[۲۵].

$$\|z\|_{\sigma} = \frac{1}{\varepsilon} \left(\sqrt{1 + \varepsilon \|z\|^2} - 1 \right) \quad , \quad \varepsilon > 0 \tag{(A)}$$

دومین ورودی کنترل چیدمان، گرادیان تابع پتانسیل دافعه اطراف هر عضو می باشد که جهت ممانعت از برخورد احتمالی بین ربات ها بصورت زیر تعریف می شود.

$$u_{2i} = \begin{cases} \Delta U_{2i} & ||p_i - p_j|| \le d_{ij} \\ 0 & ||p_i - p_j|| > d_{ij} \end{cases}$$
(9)

در رابطه بالا U_{2i} تابعی است از متغیر $\|p_i - p_j\|$ (فاصله نسبی بین عناصر گروه) می باشد و d_{ij} فاصله مورد نیاز بین دو عضو i, j جهت رسیدن به موقعیت مطلوب در چیدمان هندسی است. در ادامه یک تابع پتانسیل به شرح ذیل برای ایجاد نیروی دافعه بین عناصر گروه معرفی می شود.

$$U_{2i} = W_{2i} e^{(d_{ij} - ||p_i - p_j||)}$$
(1.)

بنابراین ورودی کلی کنترل چیدمان بدون در نظر گرفتن مزاحمت های محیطی با استفاده از مجموع توابع پتانسیل بصورت زیر بدست خواهد آمد.

$$u_i = u_{1i} + u_{2i} \tag{11}$$

۳- طراحی کنترل کننده

برای اینکه همزمان با نمایش قابلیت های الگوریتم معرفی شده، مقایسه ای هم با تحقیقات انجام شده قبلی داشته باشیم، دینامیک هر عضو از گروه را بصورت زیر که اقتباس از مرجع [۲۴] می باشد، در نظر می گیریم.

$$= s_{x_{i}} \left\{ \left(\frac{c_{x_{i}}}{m_{i}} \left[F_{xi} + f_{x_{i}} \right] - c_{x_{i}} \ddot{x}_{di}_{i} + (\dot{x}_{i} - \dot{x}_{di}) \right) \right\}$$

$$= s_{x_{i}} \left\{ \left(\frac{c_{x_{i}}}{m_{i}} \left[-K_{xi} sign(s_{x_{i}}) + f_{x_{i}} \right] - c_{x_{i}} \ddot{x}_{di}_{i} + (\dot{x}_{i} - \dot{x}_{di}) \right) \right\}$$

$$= - \left(\frac{c_{x_{i}}}{\overline{M}_{i}} K_{xi} - \frac{c_{x_{i}}}{\underline{M}_{i}} |f_{x}^{+}| - c_{x_{i}} |\ddot{x}_{di}| - |\dot{x}_{i}| - |\dot{x}_{i}| - |\dot{x}_{di}| \right) |s_{x_{i}}| \leq -\eta_{xi} |s_{x_{i}}|$$

بنابراین با انتخاب بهره بازخورد به صورت زیر تابع لیاپانوف منفی $s_{x_i} = s_{x_i}$ نیمه معین خواهد شد و از طرفی بدلیل اینکه صرفاً در $s_{x_i} = 0$ تابع مزبور صفر می شود، می توان گفت قانون کنترلی همواره پایدار خواهد بود.

$$\begin{split} K_{xi} \geq & \frac{\overline{M}_i}{c_{x_i}} \left(\frac{c_{x_i}}{\overline{M}_i} |f_x^+| + c_{x_i} |\ddot{x}_{di}| \\ & + |\dot{x}_i| + |\dot{x}_{di}| \\ & + \eta_{xi} \right) \end{split} \tag{Yf}$$

لازم به ذکر است \dot{x}_{ai} و \dot{x}_{ai} از مشتقات زمانی اول و دوم گرادیان توابع پتانسیل بدست می آیند. بهره کنترلی برای سطح لغزش دوم نیز مشابه سطح لغزش قبلی بصورت زیر خواهد شد.

$$K_{yi} \geq \frac{\overline{M}_{i}}{c_{y_{i}}} \left(\frac{c_{y_{i}}}{\overline{M}_{i}} \left| f_{y}^{+} \right| + c_{y_{i}} \left| \ddot{y}_{di} \right| + \left| \dot{y}_{i} \right| + \left| \dot{y}_{di} \right| + \left| \dot{y}_{di} \right| + \left| \dot{y}_{di} \right| + \eta_{yi} \right)$$

$$(\Upsilon \Delta)$$

برای پایدار سازی دینامیک سطح لغزش سوم نیز با معرفی تابع لیاپانوف، می توان قانون کنترل بصورت زیر بدست آورد.

$$\begin{split} V(s_{\theta_i}) &= \frac{1}{2} s_{\theta_i}^2 \\ \dot{V}(s_{\theta_i}) &= s_{\theta_i} \dot{s}_{\theta_i} \\ &= s_{\theta_i} (c_{\theta_i} (\ddot{\theta}_i - \ddot{\theta}_{di}) + \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{di}) \\ &= s_{\theta_i} (c_{\theta_i} (\frac{1}{I_i} [\tau_i + f_{w_i}] - \ddot{\theta}_{di}) + \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{di}) \\ &= s_{\theta_i} \left(-\frac{c_{\theta_i}}{I_i} K_{\theta_i} sign(s_{\theta_i}) + \frac{c_{\theta_i}}{I_i} f_{w_i} - c_{\theta_i} \ddot{\theta}_{di} + \dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{di} \right) \\ &\leq - \left(\frac{c_{\theta_i}}{I_i} K_{\theta_i} - \frac{c_{\theta_i}}{I_i} |f_w^+| - c_{\theta_i} |\ddot{\theta}_{di}| - |\dot{\theta}_i| - |\dot{\theta}_i| \right) \\ &|\dot{\theta}_{di}| \right) |s_{\theta_i}| \leq -\eta_{\theta_i} |s_{\theta_i}| \end{split}$$

 \dot{p}_{di} و \dot{p}_{di} به ترتیب بردار سرعت لحظه ای و زاویه سمت مطلوب ربات ها می باشند. سپس جهت تبعیت حرکت ربات ها از این مسیرهای مطلوب و مجازی بدست آمده از طریق توابع پتانسیل، سطوح لغزش و قوانین کنترلی بر اساس قواعد روش کنترل مد لغزشی تعریف می شوند. سطوح لغزش سه گانه که مربوط به موقعیت مکانی و زاویه سمت ربات ها می باشند، در این مقاله به صورت زیر معرفی می گردد.

$$s_{x_i} = c_{x_i}(\dot{x}_i - \dot{x}_{di}) + (x_i - x_{di})$$
 (10)

$$s_{y_i} = c_y(\dot{y}_i - \dot{y}_{di}) + (y_i - y_{di})$$
(19)

$$s_{\theta_i} = c_{\theta_i} (\dot{\theta}_i - \dot{\theta}_{di}) + (\theta_i - \theta_{di}) \tag{1Y}$$

و $\theta_i = p_i = \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \end{bmatrix}$ ، مثبت، ثبت، $p_i = c_{y_i} \circ c_{x_i}$ و $r_{y_i} \circ c_{x_i}$ ترتیب بردار موقعیت مکانی و زاویه سمت ربات های حقیقی می باشند. از تئوری کنترل مد لغزشی شرایط رسیدن به سطح لغزش را بصورت زیر داریم.

$$s_{x_i} \dot{s}_{x_i} \le -\eta_{xi} |s_{x_i}| \tag{1A}$$

$$s_{y_i} \dot{s}_{y_i} \le -\eta_{y_i} |s_{y_i}| \tag{19}$$

$$s_{\theta_i} \dot{s}_{\theta_i} \le -\eta_{\theta_i} |s_{\theta_i}| \tag{(7.)}$$

 $\eta_{\theta i}$ اگر این شرایط به ازای مقادیر ثابت و مثبت η_{xi} ، η_{xi} و $\eta_{\theta i}$ و η_{yi} ، η_{xi} یرقرار باشند با گذشتن زمان محدودی، S_{λ_i} ، S_{λ_i} ، S_{λ_i} به سمت صفر میل خواهند نمود. از اینرو برای نیل به برآورده شدن شرایط تا (۱۸) تا (۲۰) ورودی های کنترلی بصورت زیر تعیین می گردد.

$$F_{xi} = -K_{xi} \, sign(s_{x_i}) \tag{(1)}$$

$$F_{yi} = -K_{yi} \, sign(s_{y_i}) \tag{(11)}$$

$$\tau_i = -K_{\theta i} \, sign(s_{\theta_i}) \tag{(17)}$$

در روابط بالا K_{xi} ، K_{xi} و $K_{\theta i}$ بهره های متغیر با زمان هستند که در ادامه اقدام به محاسبه آنها می شود. برای پایدار سازی دینامیک سطح لغزش، تابع لیاپانوف به صورت زیر تعیین می گردد.

$$V(s_{x_{i}}) = \frac{1}{2} s_{x_{i}}^{2}$$

$$\dot{V}(s_{x_{i}}) = s_{x_{i}} \dot{s}_{x_{i}} = s_{x_{i}} \left(c_{x_{i}} (\ddot{x}_{i} - \ddot{x}_{di}) + (\dot{x}_{i} - \dot{x}_{di}) \right)$$

بنابراین با انتخاب بهره بازخورد به صورت زیر تابع لیاپانوف منفی نیمه معین خواهد شد و از طرفی بدلیل اینکه صرفاً در $S_{ heta_i}=0$ تابع مزبور صفر می شود، می توان گفت قانون کنترلی همواره پایدار خواهد بود.

$$K_{\theta i} \geq \frac{I_{i}}{c_{\theta_{i}}} \left(\frac{c_{\theta_{i}}}{\overline{I_{i}}} |f_{w}^{+}| + c_{\theta_{i}} |\ddot{\theta}_{di}| + |\dot{\theta}_{i}| + |\dot{\theta}_{di}| + |\dot{\theta}_{di}| + |\dot{\theta}_{di}| + \eta_{\theta_{i}} \right)$$

$$(Y9)$$

و $\dot{ heta}_{di}$ از مشتقات زمانی اول و دوم زاویه گرادیان توابع $\dot{ heta}_{di}$ پتانسیل (۱۴) بدست می آیند.

۴- تجزیه و تحلیل نتایج شبیه سازی

در قسمت شبیه سازی دینامیک هدف بصورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\begin{split} \dot{x}_t &= v_t \cos(\theta_t) \\ \dot{y}_t &= v_t \sin(\theta_t) \\ \dot{\theta}_t &= w_t \end{split} \tag{17}$$

موقعیت هدف در دستگاه مختصات ثابت $p_t = [x_t, y_t]$ موقعیت هدف در دستگاه مختصات ثابت است. v_t به ترتیب سرعت خطی و زاویه سمت هدف می باشند. ورودی های کنترلی نیز بصورت زیر می باشند.

$$v_t = 1.5$$

$$w_t = o.05\sin(0.4t)$$

اغتشاشات ورودی و محدوده آنها در دینامیک ربات های اصلی (۱۲) به شرح زیر می باشند.

$$f_{x_i} = 1.2 \sin(1.2t)$$

$$f_{y_i} = 1.2 \sin(1.2t)$$

$$f_{w_i} = 1.2 \cos(0.2t)$$

$$f_{x_i}^+ = f_{y_i}^+ = f_{w_i}^+ = 1.2$$

در این مقاله حرکت چیدمان مثلثی شکل یک گروه شش تایی از ربات های معرفی شده در رابطه (۱۲) که هدف مورد نظر را تعقیب می کنند، در نظر گرفته شده است. فاصله مطلوب بین ربات نسبت به همدیگر بر اساس موقعیت مکانی ۱، ۲ و $\sqrt{7}$ می باشد.

پارامترهای شبیه سازی در جدول ۱ آمده است. شرایط اولیه تمامی ربات ها از موقعیت اتفاقی در بازه [30 0] × [30 0] با زوایای دلخواه انتخاب می شوند. جهت جلوگیری از بروز مشکلات

شبیه سازی به جای استفاده از تابع علامت در روابط ورودی های کنترل (۲۱) و (۲۲) و (۲۳) از تابع (۲s)(tanh استفاده شده است.

شکل ۱۱لف مسیرهای حرکت شش عدد ربات را که هدف فرضی را در برگرفته و تعقیب می کنند را نشان می دهد. در این شکل مسیرهای مجازی به رنگ سبز و مسیرهای واقعی به رنگ آبی نشان داده شده است و مسیر هدف به رنگ قرمز می باشد. همانطور که قابل مشاهده است ربات ها توانستهاند به خوبی در یک مسیر مارپیچ ضمن حفظ یک چیدمان هندسی مثلثی اطراف هدف، آن را به خوبی تعقیب نمایند.

جدول ۱ پارامترهای شبیه سازی

مقادير	پارامترها
١/٩	ا: ضریب وزنی تابع پتانسیل بین عناصر حقیقی و مجازی
٢	. ضریب وزنی نیروی حذر از برخورد بین ربات ها W _{2i}
١/٢	: محدوده بالایی جرم ربات ها \overline{M}
١	: محدوده پایینی جرم ربات ها <u>M</u>
١/٢	I : محدوده بالایی اینرسی ربات ها
١	<u>I</u> : محدوده پایینی اینرسی ربات ها
۵۰	a ₁ : ضریب نرخ تغییرات تابع پتانسیل حول نقطه تعادل
١.	γ : ضریب نرخ تغییرات تابع tanh(γs) حول نقطه صفر
۰/۴	x پارامتر شیب سطح لغزش کانال : c_{x_i}
۰/۴	y پارامتر شيب سطح لغزش کانال: \mathcal{C}_{y_i}
•/•۵	$ heta$: پارامتر شیب سطح لغزش کانال: $\mathcal{C}_{ heta_i}$
١	D _{i(i+1)} : فاصله نسبی بین دو ربات مجاور

شکل ۱۴لف سرعت های مطلوب بدست آمده از طریق نیروهای پتانسیل بین عضوی را نشان می دهد. ویژگی مهمی که دامنه تغییرات سرعت نشان می دهد این است که علی رغم اینکه نیروهای پتانسیل تابعی از فاصله بین ربات ها می باشند، در این کار بدلیل استفاده از تابع پتانسیل جدید معرفی شده، دامنه تغییرات سرعت در محدوده قابلیت عملکردی ربات ها می باشد. در صورتی که در کار های قبلی ([۲۸–۲۴]) بدلیل متغیر بودن مقدار تابع پتانسیل در فواصل مختلف، دامنه این تغییرات به قدری زیاد است که در عمل قابل اعمال روی ربات های واقعی نمی باشد.

شکل ۱ ب سابقه زمانی تغییرات فاصله بین ربات ها را نشان می دهد. همانگونه که مشهود است ربات ها در کمتر از ۱۰ ثانیه توانسته اند به فاصله مطلوب از یکدیگر برسند و علی رغم وجود اغتشاش ورودی، ربات ها فاصله مطلوب نسب به هم را در طی مسیر حفظ کرده اند.

شکل ۲ نمودارهای ورودی های کنترل دینامیک ربات ها را نشان می دهد. با توجه به اینکه دینامیک سطح لغزش ها اصلاح شده و بهره کنترلی بر اساس رفتار آنلاین توابع پتانسیل بدست آمده است، ملاحظه می شود که تلاش های کنترلی به نسبت منبع [۲۸] بسیار کاهش پیدا کرده است(شکل ۳) و از طرفی هیچ کدام از ورودی های کنترلی اشباع نشده است. در حالی که در کار مذکور ورودیهای *11* و *21* به ترتیب در بهره های کنترلی ۱۰۰ و ۲۰۰ اشباع شده اند که این موضوع، یکی از معایب کاربرد عملی در کنترل ربات ها می باشد.









شکل ۲ ورودی های کنترلی مربوط به پژوهش حاضر

یکی از معایب دیگر استفاده از تابع پتانسیل، اعمال نیروی دافعه و جاذبه بیش از حد به ربات ها در فواصل دور از همدیگر می باشد. این موضوع کاربرد این روش را در میدان عمل محدود می کند و در واقع یکی از دلایل عدم کاربرد گسترده این روش در هدایت ربات های واقعی می باشد. در هیچ کدام





در منبع [۲۸] به جای سطوح لغزش روابط (۱۵) و (۱۶)، از سطح لغزش زیر استفاده شده است. در واقع به جای اینکه سطح لغزش را برمبنای حداقل سازی خطای بردار مکانی تشکیل دهد، از بردار خطای سرعت بصورت زیر استفاده کرده است.

$$S_{v} = v_{i} - v_{di} \tag{YA}$$

بنابراین چون در صفحه مختصات هر بردار سرعتی منحصر به فرد نمی باشد، در شرایط اولیه خاصی، خصوصاً در مواقعی که عناصر گروه فاصله نسبتاً زیادی باهم دارند، مطابق شکل ۵ عناصر دارای زوایا و سرعت مشابه هستند، اما از نظر موقعیت مکانی کاملاً در مسیری نامطلوب حرکت میکنند. از اینرو با انتخاب مناسب سطوح لغزش در پژوهش حاضر از احتمال وقوع چنین شرایطی جلوگیری شده است.



از منابع مورد بررسی غیر از منبع [۲۱] عامل سرعت لحظه ای در بررسی حرکت گروهی ربات ها مد نظر قرار نگرفته است. همانطور که در شکل ۴ب ملاحظه می شود، در این منبع نیز سرعت ربات ها حتی به ۱۶ برابر سرعت تعقیب هدف می رسد. اما مطابق شکل ۴الف در مقاله حاضر حدکثر سرعت به ۱٫۳ برابر سرعت تعقیب هدف می رسد.



الف) ورودی کنترل کانال v (سرعت)



ب) ورودی کنترل کانال θ (زاویه سمت) شکل ۳ ورودی های کنترلی مربوط به منبع [۲۸].



در نهایت برای اعتبار سنجی و مقایسه الگویتم حاضر با کارهای قبلی محققین، خطای تشکیل چیدمان هندسی^۱ بصورت زیر تعریف می شود.

$$Er = \frac{\sum_{i=1}^{(n-1)} (\left| D_{i(i+1)} - d_{i(i+1)} \right|) + (\left| D_{1n} - d_{1n} \right|)}{n} \quad (\Upsilon 9)$$

که در رابطه ی بالا Er خطای تشکیل چیدمان و n تعداد ربات ها و $D_{i(i+1)} = 0$ فاصله نسبی بین دو ربات مجاور یعنی $D_{i(i+1)} = 0$ ها و $||p_i - p_{i+1}||$. فاصله مطلوب بین ربات آام و ای. $||p_i - p_{i+1}||$.

 D_{1n} : فاصله نسبی بین ربات یکم با ربات nام می باشد. مقایسه نمودارهای خطای تشکیل چیدمان هندسی در شکل ۶ نشان داده شده است. نمودار نقطه چین قرمز مربوط به منبع [۲۸] و نمودار یکپارچهی آبی مربوط به خطای پژوهش حاضر می باشد. همانطور که ملاحظه می شود بطور متوسط خطا تا حدود $\frac{1}{r}$ خطای کار قبلی کاهش پیدا کرده است. لازم به توضیح است ثابت ماندن خطای کار قبلی بدلیل اشباع شدن ورودیهای کنترلی است. در حالی که در پژوهش حاضر بدلیل معرفی تابع پتانسیل محدود آین مشکل برطرف شده است.



شکل ۶ مقایسه نمودار خطای تشکیل چیدمان با منبع [۲۸]

۵– نتیجه گیری

در این مقاله روشی جدید در خصوص کنترل حرکت گروهی ربات ها و تعقیب هدف معرفی شد. این روش از ترکیب روش های تابع پتانسیل، ساختار مجازی و روش تعقیب رهبر، با اعمال تابع پتانسیل جدید به وجود آمده است. برای اینکه ویژگی های این روش نسبت به کارهای قبلی ([۱۸-۲۴]) متمایز شود،

مقایسه ای با کار های انجام شده ی قبلی صورت گرفت و مزیت هایی به شرح زیر حاصل شد. ۱- به خاطر منفرد کردن نیروهای هدایتی و حذف زیگما از توابع یتانسیل، هم حجم محاسبات بطور چشم گیری کاهش پیدا کرد و هم مشکل مینیمم محلی که مهمترین چالش کاربرد روش تابع پتانسیل بود، بر طرف گردید. ۲ با معرفی تابع پتانسیل جدید، مشکل تغییرات فاحش مقادیر توابع يتانسيل (بعنوان تابعي از تغييرات فاصله بين ربات ها) و ورودی های کنترلی دینامیک ربات ها بر طرف شد. از اینرو تلاش کنترلی برای تبعیت از مسیرهای مطلوب به مراتب کاهش پیدا کرد. این ویژگی یکی از مزایای هم جهت کاربردی شدن روش تابع پتانسیل در موارد عملی است. ۳- تعداد ضرایب وزنی به کار رفته در الگوریتم نهایی از چهار مورد به دو مورد کاهش یافته، از اینرو تلاش برای تنظیمات ضرایب وزنی کاهش یافته است. ۴- بدلیل استفاده از سطوح لغزش مناسب (استفاده از بردار مکان به جای بردار سرعت) مشکل عدم همگرایی گروه در شرایط اولیه نامناسب از بین رفته است.

۵- در مقایسه با کارهای قبلی، محدوده تغییرات سرعت لحظهای ربات ها در تعقیب هدف به مراتب کاهش پیدا کرد (تا ۱٫۳ برابر).

8- مراجع

- Dang, A., and Horn, J., Formation control of leaderfollowing uavs to track a moving target in a dynamic environment, *Journal of Automation and Control Engineering*, Vol. 3(1), (2015).
- [2] Achmadi, S., Marjono, and Miswanto, Analysis multi-agent with precense of the leader, *in AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, (2017).
- [3] Consolini, L., and et al., Leader–follower formation control of nonholonomic mobile robots with input constraints, *Automatica*, Vol. 44(5), pp. 1343-1349, (2008).
- [4] Peng, Z., and et al., Adaptive dynamic surface control for formations of autonomous surface vehicles with uncertain dynamics, *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, Vol. 21(2), pp. 513-520, (2012).
- [5] Qian, D., Tong, S., and Li, C., Leader-Following Formation Control of Multiple Robots with Uncertainties through Sliding Mode and Nonlinear

¹ Formation keeping error

² Bounded potential function

- [17] Dang, A.-D., and et al., Distributed formation control for autonomous robots in dynamic environments. arXiv preprint arXiv:1705.02017, (2017).
- [18] Keymasi Khalaji, A., and Tourajizadeh, H., Nonlinear Lyapounov based control of an underwater vehicle in presence of uncertainties and obstacles, Ocean Engineering, Vol. 198, pp. 106998, (2020).
- [19] Keymasi Khalaji, A., and saadat, I., Tracking control of quadrotors in the presence of obstacles based on potential field method, Amirkabir Journal of Mechanical Engineering, Vol. 53 (Issue 2 (Special Issue)), pp. 1095-1110, (2021).
- [20] Shibahara, S., Wakasa, T., and Sawada, K., Network weight and time-varying potential function for obstacle avoidance of swarm robots in column formation, SICE Journal of Control, Measurement, and System Integration, Vol. 15(1), pp. 24-35, (2022).
- [21] Harder, S.A., and Lauderbaugh, L.K., Formation specification for control of active agents using artificial potential fields, Journal of Intelligent and Robotic Systems, Vol. 95(2), pp. 279-290, (2019).
- [22] Gazi, V., and et al., Aggregation, foraging, and formation control of swarms with non-holonomic agents using potential functions and sliding mode techniques, Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences, Vol. 15(2), pp. 149-168, (2007).
- [23] Yao, J., Ordonez, R., and Gazi, V., Swarm tracking using artificial potentials and sliding mode control, (2007).
- [24] Gazi, V., and et al., A target tracking approach for nonholonomic agents based on artificial potentials and sliding mode control, Asme, (2012).
- [25] Olfati-Saber, R., Flocking for multi-agent dynamic systems: Algorithms and theory, IEEE Transactions on automatic control, Vol. 51(3), pp. 401-420, (2006).
- [26] Utkin, V., and et al., Conventional and high order sliding mode control, Journal of the Franklin Institute, Vol. 357(15), pp. 10244-10261, (2020).
- [27 Hu, J., and et al., A survey on sliding mode control for networked control systems, International Journal of Systems Science, Vol. 52(6), pp. 1129-1147, (2021).
- [29] Gazi, V., and Passino, K.M., Swarm stability and optimization, Springer Science and Business Media, (2011).

نشريه مهندسي مكانيك

Disturbance Observer, Etri Journal, Vol.38(5), pp. 1008-1018, (2016).

- [6] Ren, W., and Beard, R.W., Decentralized scheme for spacecraft formation flying via the virtual structure approach, Journal of Guidance, Control, and Dynamics, Vol. 27(1), pp. 73-82, (2004).
- [7] Lewis, M.A., and Tan, K.-H., High precision formation control of mobile robots using virtual structures, Autonomous robots, Vol. 4(4), pp. 387-403, (1997).
- [8] Pantelimon, G., et al., Survey of Multi-agent Communication Strategies for Information Exchange and Mission Control of Drone Deployments, Journal of Intelligent & Robotic Systems, Vol. 95(3-4), pp. 779-788, (2019).
- [9] Liu, Y., and Bucknall, R., A survey of formation control and motion planning of multiple unmanned vehicles, Robotica, Vol. 36(7), pp. 1019-1047, (2018).
- [10] Issa, B., and A.T., Rashid, A survey of Multi-Mobile Robots Formation Control, International Journal of Computer Applications, Vol. 181(48), pp. 12-16, (2019).
- [11] Ai, X.L., and et al., Optimal formation control with limited communication for multi-unmanned aerial vehicle in an obstacle-laden environment, Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part G: Journal of Aerospace Engineering, Vol. 231(6), pp. 979-997, (2017).
- [12] Do, K.D., and Pan, J., Nonlinear formation control of unicycle-type mobile robots, Robotics and Autonomous Systems, Vol. 55(3), pp. 191-204, (2007).
- [13] Lee, G., and Chwa, D., Decentralized behaviorbased formation control of multiple robots considering obstacle avoidance, Intelligent Service Robotics, Vol. 1(11), pp. 127-138, (2018).
- [14] Alasty A., Etemadi, E.S., and Roshan-Ghalb F., Behavioral Control of Autonomous Swarms, in 16th. Annual (International) Conference on Mechanical Engineering-ISME 2008, Shahid Bahonar University of Kerman: Iran, (2008).
- [15] Balch, T., and Arkin, R.C., Behavior-based formation control for multirobot teams, IEEE transactions on robotics and automation, Vol. 14(6), pp. 926-939, (1998).
- [16] Khatib, O., Real-time obstacle avoidance for manipulators and mobile robots, in Autonomous robot vehicles, Springer, pp. 396-404, (1986).



یک روش نوآورانه اندازه گیری دنباله ایرفویل نوسانی با استفاده از جریان سنج های سیم داغ

چکیده: امروزه اندازه گیری پارامترهای جریان دنباله ایرفویل نوسانی به سبب کاربردهای گسترده آن در صنعت و طبیعت از اهمیت بالایی برخوردار است. لذا هدف از انجام این پژوهش ارائه یک روش نوآورانه برای اندازه گیری تجربی جریان دنباله ایرفویل نوسانی NACA0012 است. بدین منظور از سه سنسور جریان سنج سیم داغ یک بعدی که یکی از آنها ثابت و دو سنسور دیگر متحرک هستند استفاده شد. با استفاده برنامه نویسی نرم افزار متلب و ارتباط بین داده های این سه سنسور همبستگی مکانی و زمانی سرعت جریان در تمامی نقاط دنباله بدست آمد. تایج این پژوهش نشان داد که می توان با تجهیزات سخت افزاری کمتر نسبت به سایر پژوهش ها پارامترهای مختلف جریان دنباله را اندازه گیری کرد. در این روش با حذف خطاهای ناشی از تعداد زیاد سنسورها و با افزایش تعداد نقاط داده برداری در دنباله با دقت بالاتری پارامترهای جریان اندازه گیری شده است. نتایج حاصل نشان داد که ترکیب مومنتوم جریان آزاد با مومنتوم حرکت نوسانی ایرفویل، یک جریان سینوسی با همان فرکانس نوسان ایرفویل را در مومنتوم جریان آزاد با مومنتوم حرکت نوسانی ایرفویل، یک جریان سینوسی با همان فرکانس نوسان ایرفویل را در می موستوم جریان آزاد با مومنتوم حرکت توسانی ایرفویل، می هریان سینوسی با همان فرکانس نوسان ایرفویل را در ماله ایجاد می کند. ناحیه ناشی از حرکت گردابه ها و ناحیه ناشی از نفوذ مومنتوم حریک گردابه ها به سایر قسمت های دنباله ایجاد می کند. ناحی انوسانی را تشکیل می دهند. **احسان کوهی** دانشجوی دکتری

عبدالامیر بک **خوشنویس*** استاد، گروه مهندسی مکانیک، دانشگاه حکیم سبزواری، سبزوار

مقاله علمی پژوهشی دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶ یذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴

واژه های راهنما: تونل باد، جریان سنج سیم داغ، دنباله، ایرفویل نوسانی، بررسی تجربی

Ehsan Kouhi PhD Student

Abdolamir Bak Khoshnevis* Professor, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Hakim Sabzevari University, Sabzevar

An innovative method of measuring the wake of pitching airfoil using hot-wire anemometers

Abstract: Today, measuring the flow parameters of the oscillating airfoil wake is of great importance due to its wide applications in industry and nature. Therefore, the aim of this research is to provide an innovative method for the experimental measurement of the NACA0012 oscillating airfoil. For this purpose, three one-dimensional hot-wire sensors were used, one of which is fixed, and the others are mobile. By using MATLAB code and the connection between the data of these three sensors, the spatial and time correlation of the flow velocity at all points of the wake was obtained. The results showed that measuring different parameters of the wake with less hardware equipment than other researches is possible. In this method, the flow parameters have been measured with higher accuracy by eliminating the errors caused by the large number of sensors and by increasing the number of data collection points in the wake. The results showed that the combination of the free stream flow momentum with the oscillating momentum of the airfoil creates a sinusoidal flow with the same frequency of the airfoil oscillation in the wake. Moving vortices area and the area of diffusing vortices momentum form the two parts of the oscillating airfoil wake.

Keywords: Wind tunnel, Hot-wire anemometer, Wake, Pitching airfoil, Experimental investigation

۱– مقدمه

همواره بررسی جریان دنباله اجسام مختلف اعم از اجسام خط جریانی^۱و اجسام جریان بند^۲به سبب کاربرد آن ها در طبیعت و محاسبات مهندسی از اهمیت بالایی برخوردار بوده است. عبور جریان سیال از روی اجسام باعث به وجود آمدن نیروهای آئرودینامیکی یا هیدرودینامیکی می شود. این نیروها در عملکرد اجسام غوطه ور تاثیرگذار هستند، بنابراین بررسی اینگونه جریان ها بسیار مورد توجه می باشد. یکی از راههای بررسی نیروهای وارد شده بر اجسام، بررسی جریان در دنباله اجسام است[۱]. با بررسی دنباله اجسام علاوه بر اندازه گیری نیروهای وارد شده بر جسم، می توان به خاصیت جریان در پایین دست جسم نیز پی برد.

می توان گفت که بررسی جریان در دنباله ایرفویل ها، مخصوصا ایرفویل های نوسانی یکی از با اهمیت ترین و پرکاربردترین مسائل در صنعت و طبیعت است. برای مثال می توان به کاربرد ایرفویل های نوسانی در بررسی نیروهای وارد بر پره های روتور بالگرد [۲] بال پرندگان [۳] و باله های ماهی ها [۴] اشاره کرد. ایرفویل ها دارای اشکال هندسی متفاوت و همچنین محدوده های کاری متفاوتی هستند. یعنی یک ایرفویل می تواند در رینولدزهای مختلفی کار کند اما تنها در یک رینولدز خاص دارای بهترین عملکرد است. بنابراین بر حسب رینولدز کاری مورد نظر ایرفویل های مخصوصی طراحی می شوند. تا کنون از تعداد بسیار زیادی ایرفویل تجاری مختلف در کاربردهای متنوع استفاده شده است. برای مثال ایرفویل های توربین های بادی کوچک کارکرد متفاوتی نسبت به ایرفویل توربین های بزرگ دارند.

همانگونه که گفته شد تا کنون تعداد بیشماری ایرفویل با کاربردهای متنوع تولید شده است که مشخصه های آئرودینامیکی بسیاری از آنها در دسترس نیست. به منظور بررسی مشخصه های جریان عبوری از روی ایرفویل ها می توان از روش های عددی و یا تجربی استفاده نمود. لازم به ذکر است که در ایرفویل های نوسانی جریان ناپایا است بنابراین برای اندازه گیری نیروهای وارد بر ایرفویل های نوسانی باید از روش های اندازه گیری جریان ناپایا استفاده نمود.

روش های آزمایشگاهی مختلفی برای بررسی جریان عبوری از روی ایرفویل های نوسانی وجود دارد که پرکاربردترین آنها به

صادقی و همکاران [۱۰] دنباله ناپایای یک ایرفویل نوسانی را در یک تونل باد فرو صوت با استفاده از روش جریان سنج سیم داغ بررسی کردند. آن ها تاثیر دامنه نوسان و زاویه حمله متوسط را روی پروفیل های دنباله مورد مطالعه قرار دادند. آن ها نشان دادند که در ایرفویل نوسانی هنگامی که زاویه حمله ماکزیمم كمتر از زاویه حمله واماندگی⁹استاتیكی باشد تاثیرات حركت نوسانی کوچک خواهد بود زیرا در این حالت جریان به ایرفویل چسبیده است و هنگامی که زاویه حمله ماکزیمم بیشتر از زاویه حمله واماندگی استاتیکی باشد اثرات ناپایایی جریان پدیدار می شود، زیرا گرداب بزرگتری تشکیل می شود. سلطانی و محمودی [۱۱] پروفیل سرعت دنباله یک ایرفویل نوسانی توربین باد را به روش تجربی بررسی کردند. آن ها با استفاده از یک مجموعه لوله ها، فشار استاتیکی و سکون جریان درون دنباله را اندازه گیری كردند. واضح است كه با تفاضل فشار استاتيكي از فشار سكون، فشار دینامیکی و در نهایت سرعت جریان ناحیه دنباله بدست خواهد آمد. ایراد این روش پاسخ فرکانسی پایین و ثابت بودن مکان لوله های فشارسنج می باشد و به دلیل محدودیت تعداد لوله های فشار سنج دامنه دنباله اندازه گیری شده کوچک بوده است و اگر لوله ها به نحوی قرار گیرند که کل دامنه دنباله را پوشش دهند آنگاه به سبب فاصله گرفتن لوله ها از همدیگر از دقت اندازه گیری سرعت کاسته می شود. تبریزیان و همکاران [۱۲] یک مطالعه تجربی بر روی تشخیص انتقال لایه مرزی روی ایرفویل نوسانی با استفاده از حسگرهای فیلم داغ انجام دادند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که در زاویه های حمله بالا در نزدیکی لبه حمله یک حباب جریان ناشی از جدایش تشکیل و منجر به انتقال لایه مرزی می شود. همچنین آن ها نشان دادند که افزایش فرکانس کاهش یافته^۷منجر به تاخیر در شروع گذار به ناحیه متلاطم می شود. معموری و همکاران [۱۳] به طور تجربی پارامترهای مؤثر بر روی ایرفویل نوسانی توربین بادی دریایی را بررسی کردند. در مطالعه آنها ضرایب آئرودینامیکی یک ایرفویل توربین بادی نوسانی ارزیابی شد. آنها اثر فرکانس کاهش یافته، زاویه حمله متوسط، دامنه نوسان و عدد رینولدز را بر روی ضرایب

منظور مطالعه جریان های ناپایا ، جریان سنج سیم داغ^۳[۵]، لیزر داپلر^۴[۶]، [۷] و عکس برداری ذرات^۵[۸]، [۹] می باشند. در ادامه به بررسی تعدادی از مطالعات گذشته در زمینه تحلیل جریان عبوری از روی ایرفویل های مختلف پرداخته می شود.

⁵ Particle image velocimetry (PIV)

⁶ Stall

⁷ Reduced frequency

 ¹ Streamline bodies
 ² Bluff bodies

³ Hot-wire anemometer

⁴ Laser doppler

روی ایرفویل نوسانی به شدت ناپایا است و در هر بار اندازه گیری از یک سنسور استفاده شده است نمی توان ارتباط بین زمان شروع داده برداری و زاویه حمله ایرفویل را بدست آورد. در این صورت به منظور ارتباط این دو پارامتر نیاز به یک تخمین می باشد که تاثیر بسزایی روی کیفیت داده های جمع آوری شده دارد. تیان و همکاران [۱۶] در مطالعه خود با روش عکس برداری ذرات روی عملکرد پیشرانش یک ایرفویل نوسانی تاثیر نقطه نوسان ایرفویل را بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تغییر نقطه نوسان ایرفویل تاثیر به سزایی روی عملکرد پیشرانه و سنج لیزر داپلر جریان لایه مرزی روی سطح یک ایرفویل توربین بادی محور افقی را بررسی کردند. آن ها نشان دادند که ضخامت لایه مرزی روی سطح ایرفویل توربین

همانگونه که مشاهده شد سه روش جریان سنج سیم داغ، لیزر داپلر و عکس برداری ذرات به منظور بررسی جریان ناپایای عبوری از روی ایرفویل های نوسانی به کار می رود. هر کدام از این روش ها دارای مزایا و معایب مربوط به خود است. برای مثال پاسخ فرکانسی جریان سنج سیم داغ به مراتب بالاتر از روش های دیگر است بنابراین جریان سنج سیم داغ برای اندازه گیری جریان های به شدت توربولانسی بسیار کارآمد است؛ اما از طرفی روش جریان سنج سیم داغ یک روش تهاجمی^۵است یعنی نیازمند این است که پراب سنسور در مسیر جریان سیال قرار گیرد و وجود همین سنسور روی جریان تاثیرگذار است در صورتیکه روش های لیزر داپلر و عکس برداری ذرات هیچگونه تداخلی در جریان عبوری از روی جسم ایجاد نمی کنند.

در مطالعات جریان سنج سیم داغ اکثرا یا از یک سنسور و یا از مجموعه سنسورهای ثابت به منظور بررسی جریان استفاده شده است. ایراد استفاده از یک سنسور در اندازه گیری جریان های عبوری از روی ایرفویل نوسانی این است که نمی توان زمان شروع داده برداری در نقاط مختلف را به زاویه حمله آنی ایرفویل مرتبط کرد. برای مثال ممکن است در یک نقطه در زمان شروع داده برداری، ایرفویل در زاویه حمله صفر باشد و در نقطه دیگری، ایرفویل در زاویه حمله صفر باشد و در نقطه دیگری، ایرفویل در زاویه حمله صفر اشد و چون معیاری ایرفویل در زاویه حمله ماه از یک سنسور وجود ندارد این روش نمی تواند خروجی مناسبی را ارائه دهد. در اکثر مطالعات به منظور هم فاز کردن داده های خروجی از یک آئرودینامیکی مطالعه کردند و از نیروسنج به منظور اندازه گیری نیروهای وارد بر ایرفویل بهره بردند. همانطور که می دانیم در به کارگیری نیروسنج به منظور اندازه گیری نیروهای وارد بر یک جسم باید به پاسخ فرکانسی نیروسنج نسبت به فرکانس تغییرات نیروی وارد شده بر جسم توجه شود، زیرا همواره باید اصل نایکوئیست^۲رعایت شود. در مورد اندازه گیری نیروهای وارد بر ايرفويل نوساني به سبب اينكه فركانس تغييرات نيرو زياد بوده باید از نیروسنج هایی با پاسخ فرکانسی بالا استفاده نمود. برومند و مانی [۱۴] به صورت تجربی و عددی پروفیل دنباله یک ایرفویل فوق بحرانی را در اعداد ماخ ۴/۲ و ۱۶ مورد مطالعه قرار دادند. آن ها در بخش تجربي مطالعه از روش مجموعه جريان سنج هاي سیم داغ که شامل ۱۴ عدد جریان سنج نصب شده روی یک یایه ثابت بوده، استفاده کردند (شکل ۱). از جمله نقاط ضعف مطالعه برومند و مانی عدم امکان نمونه برداری در فاصله بین دو سنسور بدلیل ثابت بودن سنسورها در یک مکان بود، حال آنکه در ناحیه دنباله ایرفویل نوسانی با تغییر مکان کوچک، تغییرات بسیار بزرگی در پروفیل جریان ایجاد می شود و نیز هر سنسور دارای فرکانس قطع، خطای اندازه گیری و ولتاژ دو سر پل منحصربه آن سنسور است. بنابراین هنگامی که از داده های هر سنسور در مکان نصب شده آن، برای اندازه گیری سرعت جریان استفاده شود، یک خطای اندازه گیری ناشی از تفاوت در دقت سنسورها نیز به خطاهای معمول اضافه می شود.



شکل ۱ سیستم جمع آوری داده ها در مطالعه برومند و مانی[۱۴]

یانوویچ و همکاران [۱۵] به صورت تجربی با استفاده از جریان سنج سیم داغ خواص توربولانسی دنباله پره های ایرفویل NACA64-618 را که با کیفیت های متفاوتی تولید شده بودند مورد مطالعه قرار دادند. آن ها در پژوهش خود یکبار از سنسور جریان سنج سیم داغ یک بعدی و بار دیگر از سنسور دوبعدی به منظور اندازه گیری سرعت جریان استفاده کردند. نقطه ضعف پژوهش یانوویچ و همکاران این بود که چون جریان عبوری از

⁴ Trailing edge

⁵ Invasive

¹ Load cell

² Nyquist

³ Leading edge

سنسور، از تخمین استفاده می شود که معمولا دارای خطای بالایی است. از جمله ایرادات استفاده از مجموعه سنسورهای ثابت این است که اولا نمی توان در تمامی نقاط دامنه نمونه برداری را انجام داد زیرا در فاصله بین دو سنسور هیچ وسیله اندازه گیری وجود ندارد و دوما اینکه هر سنسور دارای دقت و خطای اندازه گیری منحصر به خود است، بنابراین هنگامی که از مجموعه سنسورها به منظور اندازه گیری جریان دنباله استفاده می شود یک خطای ناشی از متفاوت بودن دقت اندازه گیری سنسورها به خطاهای اندازه گیری اضافه خواهد شد.

در این مطالعه تلاش شدهاست که یک روش نوآورانه برای اندازه گیری تجربی جریان دنباله ایرفویل نوسانی NACA0012 ارائه گردد. به منظور برطرف کردن کاستی روش های گذشته در این روش با استفاده از سه سنسور جریان سنج سیم داغ که یکی از آنها ثابت و دو سنسور دیگر متحرک هستند دنباله ایرفویل نوسانی اندازه گیری شده است. با توجه به ارتباط مکانی و زمانی داده برداری بین سنسورها میتوان علاوه بر اندازه گیری تمامی نقاط دنباله، دادههای بدست آمده از سنسور اصلی را برای تمامی نقاط دنباله، هم فاز کرد. این بدان معناست که با استفاده از این روش میتوان با تجهیزات سختافزاری کمتر با دقت بسیار بالاتری پارامترهای مختلف جریانهای ناپایا را اندازه گیری کرد. در بخش های بعدی به توضیح این روش و نتایج حاصل از آن پرداخته می شود.

۲- روش کار

۲-۱- جریان سنج سیم داغ

یکی از دستگاههای اندازه گیری دقیق مشخصات جریان آشفته سیالات، دستگاه جریان سنج سیم داغ است که از آن برای اندازه گیری دقیق کمی و کیفی جریان سیالات استفاده می شود. دستگاه جریان سنج سیم داغ یکی از تجهیزات اصلی مورد نیاز برای انجام مطالعات تجربی جریان سیالات است که با استفاده از آن می توان به مطالعه پدیده های مختلف جریان سیال نظیر لایه های مرزی آرام و آ شفته، دنباله پشت اجسام، سیال نظیر لایه های مرزی آرام و آ شفته، دنباله پشت اجسام، جریان سنج سیم داغ در مقایسه با روش های دیگر عبارتند از: دریان منبخ مین داغ در مقایسه با روش های دیگر عبارتند از: دیگر.

۲- اندازه گیری سرعت و دما به طور همزمان.

 ۳- کالیبراسون، جمع آوری داده ها و تجزیه و تحلیل آن ها ساده است. ۴- دقت جریان سنج سیم داغ بالا است و در شرایط مناسب حدود ۰/۲ ٪– ۰/۱ ٪ است. ۵- پاسخ فرکانسی بالا و در حدود ۸۰ kHz است. ۶- نسبت سیگنال به نویز کم است. ٧- انتخاب پراب و آنالیز آن نسبتا ساده است. ۸- سیگنال خروجی یک سیگنال آنالوگ پیو سته است در نتیجه هر دو آنالیز بازه فرکانسیی و بازه زمانی قابل انجام است. ۹- موجود بودن پراب های اندازه گیری با یک یا تعداد سنسورهای بیشتر به طور تجاری. از جمله معايب استفاده از روش جريان سنج سيم داغ مي توان به موارد زیر اشاره کرد: ۱- آلودگی های موجود در جریان روی سنسور اثر گذاشته در نتیجه انتقال حرارت تغییر می کند و مشخصه های کاليبراسيون را تغيير مي دهد. ۲- سنسور جریان سنج بسیار ظریف است و به سادگی در صورت بی تجربگی کاربر از بین می رود. ۳- استفاده از جریان سنج سیم داغ یک روش تهاجمی به

حساب می آید یعنی وجود پراب سیم داغ باعث افزایش اغتشاش های جریان می شود که با طراحی مناسب پراب می توان خطاهای ناشی از آن را به حداقل رساند. ۴- در مواقعی مانند اندازه گیری سیال در مجاورت فن ها،

ملخ ها و یا توربوماشـــین ها به دلیل محدودیت مکانی نمی توان از روش جریان سنج سیم داغ استفاده نمود.

پراب جریان سنج سیم داغ مورد استفاده در این پژوهش از نوع یک بعدی (Single Normal) که روکشدار و از مدل WP11 ساخته ی شرکت فراسنج صبا است. جنس سنسور از نوع تنگستن با قطر ۵ میکرومتر و طول قسمت فعال سنسور حدود ۱/۲۵ میلی متر است. این سنسورها برای اندازه گیری جریان سیالی که شدت اغتشاشهای آن بالا است طراحی شده است (شکل ۲).

نحوه ی عملکرد جریان سنج سیم داغ به این گونه است که جریان الکتریکی از طریق پایه های سنسور به سیم منتقل می شود. با توجه به اینکه سیم از جنس تنگستن ساخته شده و دارای مقاومت بالایی است، سیم دچار افزایش دما خواهد شد و به دمای حدود ۳۰۰ درجه سانتی گراد می ر سد. مقاومت سیم

کوهی و خوشنویس



شکل ۲ سنسور جریان سنج سیم داغ

داغ در پل وتستون ^۱با سه مقاومت دیگر در تعادل قرار می گیرید. هنگامی که جریان هوا از روی سیم داغ عبور می کند به سبب انتقال حرارت جابه جایی باعث سرد شدن سیم می شود. تغییر نرخ انتقال حرارت از سیم داغ به جریان سیال، سبب تغییر مقاومت الکتریکی سیم داغ wR و همچنین تغییر ولتاژ خروجی دستگاه جریان سینج سیم داغ می شود. به کمک معادله کالیبراسیون تغییرات ولتاژ اندازه گیری شده به تغییرات سرعت مرتبط شده و از این طریق سرعت جریان سیال اندازه گیری می شوند. مدار الکترونیکی بکار رفته در این دستگاه از نوع دما ثابت است که شماتیک آن را در شکل ۳ نشان داده شده است.



۲-۲- تجهیزات آزمایشگاهی و روش اندازه گیری داده ها

برای انجام این آزمایش از تونل باد آزمایشگاه آئرودینامیک دانشگاه حکیم سبزواری، جهت انجام آزمایشات استفاده شده است. تونل باد مورد استفاده از نوع مدار باز با مقطع آزمایش ۴۰×۴۰ سانتی متر و به طول ۱۶۸ سانتی متر است (شکل ۴).



شکل ۴ اجزای تونل باد مدار باز استفاده شده در این مطالعه



شکل ۵ ایرفویل بکار رفته در این آزمایش

همانطور که در شکل ۶ مشاهده می شود به دلیل متقارن بودن ایرفویل، مرکز دوران و نقطه برخورد وترهای ایرفویل در زاویه های حمله مختلف یکی است.



شکل ۶ مشخصات نوسان ایرفویل مورد مطالعه

نوسان پیچشی ایرفویل طبق معادله سینوسی (۱) انجام می - مود. در این رابطه α زاویه حمله آنی، α زاویه حمله متوسط، شود. در این رابطه α زاویه حمله و f فرکانس نوسان ایرفویل است (شکل α_0).

$$\alpha = \alpha + \alpha_0 \sin(2\pi ft) \tag{1}$$

شکل ۷ نمایی از حضور ایرفویل مورد مطالعه در محفظه ی آزمایش را نشان می دهد. همانگونه که مشاهده می شود وجود ایرفویل در مسیر جریان آزاد باعث به وجود آمدن دنباله ای می شود که توسط سنسور های جریان سنج سیم داغ قابل اندازه گیری است.

مکانیزم جابه جا کننده^۳سنسورها با استفاده از موتورهای پله ای وظیفه ی جا به جا کردن سنسورهای متحرک به نقاط مختلف دنباله را برعهده دارند. لوله پیتوت با اندازه گیری فشار سکون و فشار استاتیک، سرعت جریان آزاد را اندازه گیری می کند. دما توسط دماسنج نصب شده درون محفظه ی آزمایش

³ Traverse mechanism

شدت اغتشاش جریان آزاد در محفظه ی آزمایش این تونل باد در حدود ۰/۱٪ و حداکثر سرعت جریان آزاد در محفظه ی آزمایش حداکثر ۳۰ متر بر ثانیه است. نسبت سطح مقطع عمود بر جریان مدل (در صفحه ی y-z) به سطح مقطع محفظه ی آزمایش را نسبت انسداد امی گویند. منظور از سطح مقطع عمود بر جریان سطح مقطعی از مدل است که ایجاد مانع در برابر عبور جریان هوا می کند. در آزمایش های تونل باد ایده آل ترین نسبت انسداد کمتر از ۵٪ است اما در غالب موارد تا نسبت انسداد ۱۰٪ نیازی به استفاده از ضرایب اصلاحی وجود ندارد [۱۷]. در این آزمایش در زاویه حمله صفر، نسبت انسداد حدود ۴٪ است. با افزایش زاویه حمله سطح مقطع عمود بر جریان مدل بیشتر می شود به طوری که در زاویه ی حمله بیشینه، نسبت انسداد به حدود ۶٪ افزایش پیدا می کند. بنابراین چون نسبت انسداد مدل درون محفظه ی آزمایش کمتر از ۱۰٪ است نیاز به درنظر گرفتن ضرایب اصلاحی نیست. ایرفویل به کار رفته در این آزمایش ایرفویل متقارن NACA0012 بوده که با استفاده از روش پرینت سه بعدی و از جنس یلی لاکتیک اسید آساخته شده است. طول وتر ایرفویل ۱۳۰ میلی متر و عرض ایرفویل ۳۸۰ میلی متر است. انواع مختلفی از نوسان ایرفویل مانند نوسانی پیچشی، نوسان انتقالی و یا ترکیب این دو نوسان وجود دارد. ایرفویل نوسانی کاربردهای متفاوتی نظیر استفاده در پره های روتور بالگردها، بال زدن پرندگان و حرکت باله های ماهی ها دارد. با توجه به اینکه مشخصه های جریان در ایرفویل های نوسانی متفاوت از ایرفویل های استاتیکی است بررسی ویژگی های جریان عبوری از روی ایرفویل های نوسانی از اهمیت ویژه ای برخوردار است. ازجمله مزایای استفاده از ایرفویل های نوسانی می توان به افزایش زاویه حمله استال و به تاخیر افتادن استال دینامیکی اشاره کرد. در این مطالعه منظور از ایرفویل نوسانی، ایرفویلی است که حول نقطه یک چهارم طول وتر از لبه حمله دوران پیچشی دارد (شکل ۵ و شکل ۶). برای ایجاد این دروان پیچشی در مرکز دوران سوراخی به قطر ۱۰ میلی متر و به طول ۳۸۰ میلی متر ایجاد شده است و میله ای از درون آن عبور می کند. این میله توسط اهرم بندی به دیسک چرخان و از آنجا به سروموتور متصل است. با تنظیم کردن سروموتور روی یک فرکانس چرخش مشخص، دیسک چرخان و درنتیجه میله عبوری از داخل ایرفویل با همان فركانس تنظيم شده شروع به دوران مي كنند و باعث حركت نوسانی پیچشی ایرفویل می شوند.

¹Blockage ratio

² Polylactic acid

اندازه گیری و به منظور تصحیح تغییرات دما در هنگام آزمایش، ضرایب تصحیح دمایی در نرم افزار Rake flow اعمال می شود.





شکل ۷ محفظه ی آزمایش در حضور مدل و نحوه ی اندازه گیری دنباله جریان

در کامپیوتر نمایش داده و ذخیره می شود. همچنین تنظیمات مربوط به اعمال ضرایب تصحیح دمایی، فرکانس داده برداری، زمان داده برداری، تنظیم فیلتر پایین گذر، انجام کالیبراسیون و مشخص کردن نقاط داده برداری توسط کامپیوتر با استفاده از نرم افزار Rake flow انجام شده است. تصاویر و جزئیات بیشتر تجهیزات به کار رفته در این پژوهش در مطالعه کوهی و خوشنویس [۱۸] ارایه شده است. شکل ۸ نمودار ارتباط تجهیزات مورد استفاده در این آزمایش را نشان می دهد. همانطور که مشاهده می شود حرکت دورانی ایرفویل توسط مجموعه کنترلر، سروموتور و دیسک چرخان ایجاد می شود. زاویه سنج وظیفه اندازه گیری زاویه را در هر لحظه از نوسان را بر عهده دارد. سایر تجهیزات اندازه گیری نظیر فشارسنج، دماسنج و جریان سنج سیم داغ، داده های اندازه گیری شده را به مبدل آنالوگ به دیجیتال و از آنجا به کامپیوتر منتقل می کنند. نتایج حاصل از تجهیزات اندازه گیری در نهایت



شکل ۸ مکانیزم ها و تجهیزات بکار رفته در آزمایش

به سنسور اصلی با سنسور متحرک راهنمای دوم (سنسور ۳) در هر نقطه است.

اگر مکانیزم جابه جا کننده سنسور حرکت کند و در مکان دیگری داده برداری انجام شود ممکن است زاویه حمله آنی ایرفویل در لحظه شروع زمان داده برداری در نقطه جدید، متفاوت با زاویه حمله آنی در شروع زمان داده برداری نقطه اول باشد. در این حالت اختلاف فاز ایجاد شده بین سیگنال های سنسور ثابت در مکان اول و دوم Φ خواهد بود که نشان می دهد زمان شروع داده برداری در نقطه دوم چقدر جلو تر از زمان شروع داده برداری نقطه اول است. بنابراین می توان به راحتی داده های اضافی از سیگنال های نقطه دوم را به اندازه Φ حذف نمود و باعث هم فاز شدن زمان شروع داده برداری تمامی نقاط در دامنه شد. به این ترتیب همبستگی زمانی تمامی نقاط داده برداری درون دامنه بدست می آید.

با اندازه گیری Φ_2 می توان همبستگی مکانی بین نقاط مختلف داخل دامنه را بدست آورد. نحوه ی بدست آوردن همبستگی مکانی به این گونه است که فاصله ی بین دو سنسور متحرک ۴ میلی متر است و چون داده برداری هر ۱ میلی متر انجام شده است می توان نتیجه گرفت که بعد از ۴ نقطه داده برداری، مکان سنسور اصلی به مکان قبلی سنسور راهنمای متحرک می رسد. بنابراین باید اختلاف فاز بین داده های سنسور اصلی که با هم ۴ میلی متر فاصله مکانی دارند نیز Φ_2 باشد (شکل ۱۰). با داشتن میلی متر فاصله مکانی تمامی نقاط برای سنسور اصلی می توان پروفیل سرعت لحظه ای جریان دنباله ایرفویل نوسانی را بدست آورد. برخلاف مطالعات گذشته که از یک سنسور متحرک و یا چند سنسور ثابت برای اندازه گیری جریان دنباله استفاده شده بود در این پژوهش سرعت جریان درون دنباله توسط سه سنسور جریان سنج سیم داغ اندازه گیری شده است. در این مطالعه از سنسور شماره یک که ثابت است (سنسور راهنمای اول) و دو سنسور متحرک که یکی از آن ها سنسور اصلی (سنسور شماره ۲) و دیگری سنسور راهنمای دوم (سنسور شماره ۳) می باشد استفاده شده است. مزیت های این روش آرایش سنسورها یکی استفاده از تجهیزات سخت افزاری بسیار کمتر نسبت به سایر مطالعات [۵]، [۱۴] و دیگری دقت بسیار بالاتر در اندازه گیری جریان در تمامی نقاط دنباله است. منظور از افزایش دقت اندازه گیری در این حالت اولا حذف خطای اندازه گیری ناشی از تفاوت دقت سنسورها نسبت به همدیگر و دوما امکان اندازه گیری سرعت جریان در تمامی نقاط دنباله است زیرا سنسورهای متحرک می توانند توسط مکانیزم جابه جا کننده، در تمامی نقاط دنباله حرکت کنند. همچنین با توجه به ارتباط داده های این سنسورها نسبت به همدیگر می توان همبستگی مکانی و همبستگی زمانی ٔداده های سنسور اصلی را برای تمامی نقاط دنباله بدست آورد. بنابراین می توان پروفیل سرعت لحظه ای جریان دنباله را برای ایرفویل نوسانی بدست آورد. نحوه ی ارتباط داده های بین سنسورها در شکل ۹ نشان داده شده است. در هر نقطه، شروع زمان داده برداری هر سه سنسور یکی است. بنابراین در هر نقطه اختلاف فاز داده های اندازه گیری شده تنها ناشی از تفاوت مکانی سنسورها است. Φ_1 اختلاف فاز بین سنسور راهنمای ثابت (سنسور ۱) با سنسور اصلی (سنسور ۲) و Φ_2 اختلاف فاز مربوط



شکل ۹ نحوه ی ارتباط داده های بین سنسورها

در این مطالعه به منظور محاسبه اختلاف فازها و بدست آوردن همبستگی های مکانی و زمانی بین نقاط مختلف دنباله از کدنویسی نرم افزار متلب استفاده شد و تمامی نتایج نیز توسط نرم افزار مذکور ترسیم شد. فرکانس داده برداری سنسورها، زمان داده برداری و فرکانس قطع سنسورها به ترتیب ۱۰۰۰۰ هرتز، ۵۲ ثانیه و ۱۶۰۰۰ هرتز بود. منابع عدم قطعیت در جدول ۱ ذکر شده است. در این آزمایش مجموع عدم قطعیت اندازه گیری سرعت جریان دنباله حدود ۲٪ است.

جدول ۱ منابع عدم قطعیت در آزمایش

مقدار عدم قطعيت	نوع عدم قطعيت
• / • • A	اندازه گیری سرعت توسط لوله پیتوت
•/••٣	مکانیزم جابه جا کننده
•/••• \	کیفیت برد آنالوگ به دیجیتال برای ۱۲
	بیت و ۱۰ ولت
•/••٣	تغییرات دمای محیطی
•/••۵	عدم قطعیت ناشی از برازش منحنی
	سرعت بر حسب ولتاژ در کالیبراسیون
٠/٠ ١٩٨	مجموع عدم قطعيت ها

۲-۳- اعتبار سنجی

نتایج آزمایش این مطالعه با نتایج پژوهش صادقی و همکاران [۱۹] مقایسه شد. ایرفویل استفاده شده در پژوهش صادقی و همکاران NACA0012 بود، طول وتر و عرض ایرفویل به ترتیب ۱۴۵ و ۴۵۰ میلی متر بود. زاویه حمله متوسط ۲/۵ درجه، دامنه نوسان ۸ درجه و فرکانس نوسان ۳ هرتز بود که این مشخصات حرکت برای مطالعه حاضر نیز تنظیم شد. به منظور تشابه دینامیکی، باید عدد رینولدز جریان، بین مطالعه حاضر و مطالعه صادقی و همکاران [۱۹] یکسان باشد. با توجه به اینکه طول وتر ایرفویل در دو مطالعه یکسان نیست بنابراین سرعت جریان آزاد در مطالعه حاضر برای عدد رینولدز مورد نظر محاسبه و به عنوان سرعت ورودی به محفظه ی آزمایش تنظیم شد.

در شکل ۱۱ پروفیل سرعت متوسط برای دو مطالعه مقایسه شده است. نتایج بدست آمده از پژوهش حاضر با نتایج بدست آمده در مطالعه منبع [۱۹] کمتر از ۵٪ اختلاف دارد. بنابراین می توان نتیجه گرفت که تجهیزات آزمایشگاهی و روش اندازه گیری داده ها دقت قابل قبولی دارند.



۲-۴- معادلات حاکم

در این بخش معادلات و پارامتر های مهم حاکم بر مسئله بیان شده است.

عدد رینولدز این پژوهش ۲۷۰۰۰ بود و بر اساس معادله (۲)، سرعت جریان آزاد ۳/۱۳ متر بر ثانیه بدست می آید. در رابطه ی (۲)، C طول وتر ایرفویل، U_{∞} سرعت جریان آزاد و Vلزجت سینماتیکی هوا است.

$$\operatorname{Re} = \frac{U_{\infty}C}{V}$$
(7)

فرکانس کاهشی، پارامتر مهم دیگری در بررسی جریان عبوری از روی ایرفویل های نوسانی است که طبق رابطه (۳) بدست می آید. در این رابطه f فرکانس نوسان ایرفویل و فرکانس کاهشی است. فرکانس کاهشی مشخص کننده میزان ناپایایی جریان عبوری از روی ایرفویل های نوسانی است. برای مثال هنگامی که فرکانس کاهشی صفر باشد یعنی جریان کاملا پایا، هنگامی که فرکانس کاهشی صفر باشد یعنی جریان کاملا و هنگامی که 20.00 < k < 0.005 مریان کاملا ناپایا خواهد بود[۲۰]. و هنگامی که 20.005 < k جریان کاملا ناپایا خواهد بود[۲۰]. فرکانس کاهشی این پژوهشی ۲/۰ در نظر گرفته شد، بنابراین در آزمایش حاضر جریان کاملا ناپایا و فرکانس نوسان ایرفویل در این حالت ۱/۵۳۷ هرتز بود.

$$k = \frac{\pi fC}{U_{\infty}} \tag{(7)}$$

شدت اغتشاش ^۱میزان آشفتگی جریان را نشان می دهد. به سبب اینکه جریان کاملا ناپایا است اندازه گیری شدت اغتشاش لحظه ای از اهمیت بیشتری نسبت به اندازه گیری شدت اغتشاش متوسط برخوردار است. به منظور محاسبه شدت اغتشاش از روابط (۴) تا (۶) استفاده شده است. در این روابط \overline{U} سرعت متوسط، U سرعت لحظه ای دنباله و ¹سرعت اغتشاشی است.

$$\%TI = \frac{u_{r.m.s}}{U_{\infty}} \times 100 = \frac{\sqrt{u'^2}}{U_{\infty}} \times 100$$
 (f)

$$u' = U - \overline{U} \tag{(a)}$$

$$\overline{U}(x,t) = \lim_{T \to \infty} \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} U(x,t) dt$$
(8)

در محاسبه شدت اغتشاش اگر \overline{U} و u' برای یک دوره تناوب کامل محاسبه و میانگین گیری شود شدت اغتشاش متوسط بدست می آید و اگر \overline{U} با استفاده از متوسط جمعی^۲برای تعدادی سیکل کامل محاسبه و سپس u' لحظه ای در هر نقطه و هر زمان بدست آید می توان شدت اغتشاش لحظه ای را ترسیم نمود. در ادامه به ارائه نتایج این پژوهش پرداخته می شود.

نتایج ارائه شده در این بخش برای جریان با رینولدز ۲۷۰۰۰، فرکانس کاهشی 1/2 و 2/x برابر با 10 ارائه شد. تعداد نقاط داده برداری شده در راستای عمودی ۲۸۰ نقطه به فاصله یک میلی متری از همدیگر بود که معادل با 1/4 – تا 1/7 Y/C ابه میلی متری از همدیگر بود که معادل با 1/4 – تا 1/7 برابر با صفر، دقیقا سنسور اصلی در راستای لبه فرار ایرفویل در زاویه حمله صفر است.

شكل ۱۲ پروفیل سرعت U / U_{inf} را در دنباله برای یک دوره تناوب نوسان ایرفویل نشان می دهد. مشاهده می شود که دو ناحیه کاملا متفاوت در دنباله جریان وجود دارد، یکی ناحیه ای است که گردابه های به وجود آمده پشت ایرفویل نوسانی به سمت پایین دست جریان حرکت می کنند و دیگری ناحیه ای است که اثر حرکت گردابه ها به لایه های دیگر نفوذ یاحیه ای است که اثر حرکت گردابه ها به لایه های دیگر نفوذ یوسانی به واسطه ی لند یک حرکت سینوسی نشان می دهد. به ور دو در در بال با ی دیگری نود دارد، یک می کنند و دیگری نوسانی به سمت پایین دست جریان حرکت می کنند و دیگری در در یا در ای است که اثر حرکت گردابه ها به لایه های دیگر نفوذ یومنتوم پیدا می کند و خود را به مانند یک حرکت سینوسی نشان می در لایه های دیگر کاسته می شود تا در نهایت به جریان آزاد برسیم اما در این مطالعه به واسطه ی ابعاد محفظه ی آزمایش و ایرفویل در تمامی نقاط اثر نفوذ مومنتوم مشاهده شد.

تغییرات سرعت لحظه ای در تمامی نقاط به صورت سینوسی با همان فرکانس حرکت ایرفویل بدست می آید. به عبارت دیگر مجموع مومنتوم جریان آزاد و مومنتوم حرکت ایرفویل یک جریان سینوسی با همان فرکانس نوسان را در دنباله ایجاد می کند. لازم به ذکر است که اثر نفوذ مومنتوم در لایه های بالاتر و پایین تر از دنباله قوی (دنباله حرکت گردابه ها) برای اولین بار در این پژوهش گزارش شده است.



¹ Turbulence intensity

۳- نتایج و بحث



شکل ۱۴ پروفیل سرعت بی بعد در t/T برابر با صفر (شروع نوسان)



شکل ۱۳ کانتور سرعت $U_{\rm inf} - U / U_{\rm inf}$ را نشان می دهد به بیان دیگر این شکل نمای بالای شکل ۱۲ است. همانگونه که مشاهده می شود دنباله قوی در ناحیه ۲/۰– تا ۰/۲ نسبت Y / C قرار دارد. اثر نفوذ مومنتوم این ناحیه در کل دامنه گسترش پیدا کرده است به طوری که هر لایه سیال مومنتوم را به لایه بعدی منتقل می کند و در این حین به سبب لزجت سیال مقداری از انرژی نیز تلف می شود، این اتلاف انرژی بین لایه های سیال باعث کاهش دامنه تغییرات سرعت می شود.



شکل ۱۳ کانتور سرعت $1 - U/U_{
m inf}$ در دنباله ایرفویل نوسانی

شکل ۱۴ و شکل ۱۵ پروفیل سرعت بی بعد را در دو لحظه ی متفاوت در کل دامنه دنباله نشان می دهد. یکی از برتری های استفاده از این روش اندازه گیری این است که می توان در هر لحظه پروفیل سرعت لحظه ای را در کل دامنه بدست آورد.



شکل ۱۶ شدت اغتشاش لحظه ای در یک دوره تناوب نوسان

شکل ۱۶ شدت اغتشاش لحظه ای را در یک دوره تناوب حرکت ایرفویل نشان می دهد. مشاهده می شود که بیشترین شدت اغتشاش در ناحیه دنباله قوی اتفاق افتاده و بیشینه شدت اغتشاش در حدود ۲۵ درصد می باشد. با دور شدن از ناحیه دنباله قوی، رفته رفته شدت اغتشاش کاهش می یابد تا جایی که در کمترین حالت شدت اغتشاش به حدود ۳ درصد می رسد، اما در هر حال شدت اغتشاش اندازه گیری شده در دنباله همواره بیشتر از شدت اغتشاش جریان آزاد است.



شکل ۱۷ نمای بالای شکل ۱۶ را نشان می دهد. مشاهده می شود که در یک تناوب نوسان ایرفویل، بیشترین شدت اغتشاش در ناحیه ۰/۲ – تا ۲/۰ V / C اتفاق می افتد. این ناحیه همان قسمتی از دنباله است که گردابه های ایجاد شده ناشی از حرکت نوسانی ایرفویل به پایین دست جریان منتقل می شود.

شکل ۱۸ شدت اغتشاش متوسط اندازه گیری شده در یک دوره نوسان را با ریشه میانگین مربع شدت اغتشاش اندازه گیری شده در کل زمان نمونه برداری مقایسه می کند. مشاهده می شود که بین این دو نمودار تفاوت چندانی وجود ندارد زیرا اگر بین تعداد زیادی نوسان ایرفویل، ریشه میانگین مربع شدت اغتشاش محاسبه شود با شدت اغتشاش متوسط در یک سیکل کامل، تقریبا برابر است.



علت تفاوت جزئی بین این دو نمودار ناشی از کامل نبودن تمامی سیکل های اندازه گیری شده و همچنین تفاوت در شدت اغتشاش سیکل ها نسبت به همدیگر می باشد. به طور کلی می توان از هر کدام از نمودارهای بدست آمده به منظور دست یابی به شدت اغتشاش متوسط جریان استفاده کرد. اما مقایسه نمودارهای شکل ۱۸ با نتایج شکل ۱۶ نشان می دهد که شدت اغتشاش لحظه ای جریان تفاوت قابل توجهی با شدت اغتشاش متوسط دارد زیرا در بعضی از لحظات عبور گردابه، شدت اغتشاش به یکباره افزایش می یابد. بنابراین علاوه بر شدت اغتشاش متوسط باید شدت اغتشاش لحظه ای که باعث به وجود آمدن بارهای تناوبی به جسم های پایین دست جریان می شود در هنگام انتخاب جنس جسم های پایین دست مد نظر قرار در هنگام انتخاب جنس جسم های پایین دست مد نظر قرار

۴- نتیجهگیری

اندازه گیری تجربی جریان دنباله ایرفویل نوسانی NACA0012 با یک روش جدید داده برداری هدف این پژوهش بود. نتایج این پژوهش نشان داد که جریان دنباله یک ایرفویل نوسانی که ناشی از ترکیب مومنتوم جریان آزاد با مومنتوم حرکت نوسانی ایرفویل است، یک جریان سینوسی با همان فرکانس نوسان ایرفویل را در دنباله ایجاد می کند. نشان داده شد که دنباله ایرفویل نوسانی شامل دو بخش که یکی دنباله قوی ناشی از حرکت گردابه ها به پایین دست جریان و دیگری ناحیه ناشی از نفوذ مومنتوم دنباله قوی به سایر قسمت های دنباله است. عرض دنباله قوی در ناحیه ۲/۲ - تا ۲/۲ - ۲/۲ تشکیل می شود و در مابقی قسمت های دنباله اثرات نفوذ مومنتوم ناحیه دنباله قوی مشاهده شده است. مشاهده شد که شدت اغتشاش متوسط اندازه گیری شده در یک دوره نوسان با ریشه میانگین مربع شدت اغتشاش اندازه گیری شده در کل زمان نمونه برداری تفاوت چندانی ندارند بنابراین می توان از هر کدام این روش ها به منظور محاسبه شدت اغتشاش متوسط جریان استفاده نمود؛ اما در اندازه گیری لحظه ای شدت اغتشاش مشاهده شد که شدت اغتشاش لحظه ای در ناحیه دنباله قوی بسیار بیشتر از مقدار متوسط و سایر نواحی دنباله است. همچنین با استفاده از این روش سرعت جریان دنباله در هر لحظه از نوسان اندازه گیری شد. با داشتن سرعت لحظه ای و شدت اغتشاش لحظه ای جریان می توان با استفاده از روش wake survey method نیروی وارد بر ایرفویل را محاسبه نمود. اهمیت بارز استفاده از این روش نوین در اندازه گیری جریان دنباله این است که با تجهیزات سخت افزاری کمتر نسبت به سایر

- [1] Lu, B., Bragg, M., Experimental investigation of airfoil drag measurement with simulated leadingedge ice using the wake survey method, *18th Applied Aerodynamics Conference*, (2000).
- [2] Richter, K., and et al., Experimental investigation of unsteady transition on a pitching rotor blade airfoil, *Journal of the American Helicopter Society*, Vol. 59, No. 1, pp. 1-12, (2014).
- [3] Thielicke, W., The flapping flight of birds: Analysis and application, *University of Groningen*, (2014).
- [4] Floryan, D., Van Buren, T., and Smits, A.J., Efficient cruising for swimming and flying animals is dictated by fluid drag. *Proceedings of the National Academy* of Sciences, Vol. 115, No. 32, pp. 8116-8118, (2018).
- [5] Boroumand, B.B., Mani M., Wake measurements of oscillating supercritical airfoil in compressible flow, *Transactions of the Canadian Society for Mechanical Engineering*, Vol. 43, No. 1, pp. 112-121, (2019).
- [6] Li, Q.a., and et al., Laser Doppler Velocimetry (LDV) measurements of airfoil surface flow on a Horizontal Axis Wind Turbine in boundary layer. *Energy*, Vol. 183, pp. 341-357, (2019).
- [7] Gooding, W.J., and Fabian, J.C., Key, Laser Doppler Velocimetry Characterization of Unsteady Vaned Diffuser Flow in a Centrifugal Compressor, *Journal* of Turbomachinery, Vol. 142, No. 4, (2020).
- [8] Gharali, K., Gu, M., and Johnson, D.A., A PIV Study of a low Reynolds number pitch oscillating SD7037 Airfoil in dynamic stall with CFD comparison, in 16th International Symposium on Applications of Laser Techniques to Fluid Mechanics, (2012).
- [9] Gerontakos, P., and Lee, T., PIV study of flow around unsteady airfoil with dynamic trailing-edge flap deflection, *Experiments in fluids*, Vol. 45, No. 6, pp. 955. (2008).
- [10] Sadeghi, H., Mani, M., and Ardakani, M., Effect of amplitude and mean angle of attack on wake of an oscillating airfoil. *in Proceedings of World Academy* of Science, Engineering and Technology. (2008).
- [11] Soltani, M., and Mahmoudi, M., Measurements of velocity field in the wake of an oscillating wind turbine blade, *The Aeronautical Journal*, Vol. 114, No. 1158, pp. 493-504, (2010).
- [12] Tabrizian, A., and et al., An experimental study on boundary layer transition detection over a pitching supercritical airfoil using hot-film sensors, *International Journal of Heat and Fluid Flow*, Vol. 86, pp. 108743, (2020).

پژوهش ها می توان با دقت بسیار بالاتری پارامترهای جریان را اندازه گیری نمود. زیرا تعداد سنسورها به کار رفته در این پژوهش بسیار کمتر از مطالعات مشابه بود و با حذف خطاهای ناشی از تعدد سنسورها و داده برداری از تعداد نقاط بیشتری در دنباله، با دقت بالاتری پارامترهای جریان اندازه گیری شد. از جمله نواقصی که استفاده از این روش دارد می توان به افزایش زمان داده برداری و لزوم استفاده از کد متلب اشاره کرد که در مقابل افزایش دقت و کاهش تجهیزات مورد نیاز، قابل صرف نظر کردن است.

۵- فهرست علائم و اختصارات

علايم انگليسي С طول وتر ايرفويل (m) (s^{-1}) فرکانس نوسان ایرفویل (s^{-1}) f فركانس كاهشى k عدد رينولدز Re درصد شدت اغتشاش %TI زمان (s) t زمان تناوب نوسان (s) Т سرعت جریان دنباله (ms⁻¹) U $(ms^{-1}) x$ سرعت اغتشاشی در راستای محور (ms^{-1}) u' ریشه میانگین مربع سرعت (ms⁻¹) $u_{r.m.s}$ سرعت متوسط زمانی (ms⁻¹) U (ms^{-1}) سرعت جریان آزاد در ورودی (U_{∞} جهت مختصات در راستای جریان (m) X جهت مختصات عمود بر جریان (m) Y علايم يوناني لزجت سينماتيكي (m²s⁻¹) v زاویه حمله لحظه ای (degree) α (legree) زاویه حمله متوسط $\bar{\alpha}$ دامنه زاويه حمله (degree) α_0 زيرنويس ها ريشه ميانگين مربع r.m.s مقادیر جریان آزاد در ورودی ∞ اختصارات LDV سرعت سنج ليزر داپلر ليه حمله LE سرعت سنج عکس برداری ذرات PIV

9- مراجع

TE

ΤI

لبه فرار

شدت اغتشاش

- [17] Lian, Y., Blockage effects on the aerodynamics of a pitching wing. *AIAA journal*, Vol. 48, No. 12, pp. 2731-2738, (2010).
- [18] Kouhi, E., and Abdolamir, B.K., Experimental investigation of the flow structure around a pitching airfoil by mean and instantaneous data, *Iranian Journal of Mechanical Engineering Transactions of the ISME*, (2022).
- [19] Sadeghi, H., and Mani. M., An experimental wake analysis of a pitching airfoil. *in 7th World Conference on Experimental Heat Transfer, Fluid Mechanics and Thermodynamics*, Krakow, (2009).
- [20] Choudhry, A., and et al., An insight into the dynamic stall lift characteristics, *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 58, pp. 188-208, (2014).

- [13] Mamouri, A.R., Khoshnevis, A.B., and Lakzian, E., Experimental study of the effective parameters on the offshore wind turbine's airfoil in pitching case, *Ocean Engineering*, Vol. 198, pp. 106955, (2020).
- [14] Boroumand, B.B., and Mani, M., Experimental and Numerical Study of the Unsteady Wake of a Supercritical Airfoil in a Compressible Flow, *Journal* of Aerospace Technology and Management, Vol. 11, (2018).
- [15] Yanovych, V., and et al., Hot-Wire Investigation of Turbulence Topology behind Blades at Different Shape Qualities, *Processes*, Vol. 10, No. 3, pp. 522, (2022).
- [16] Tian, W., and et al., An experimental study of the effects of pitch-pivot-point location on the propulsion performance of a pitching airfoil, *Journal of fluids and structures*, Vol. 60, pp. 130-142, (2016).



ژاله اژدرزاده*

دانشگاه آزاد اسلامی،

ISME

ساخت سطوح با دوام فوق آبگریز روی بسترهای چوبی با نانو ذرات SiO2 و TiO2

چکیده: در این تحقیق یک روش جدید و سازگار با محیط زیست و مقرون به صرفه از طریق ترکیب دو نوع از نانو ذرات SiO2 و TiO2 و فلوئوروسیلان های متقابل به همراه اصلاح شیمیایی سطح روی بسترهای چوب و بامبو انجام و مقایسه شده است. فوق آبگریز بودن سطح از نظر سطح شناسی، ثبات مکانیکی، پایداری بلند مدت و قابلیت خود تمیز شوندگی با اندازه گیری زاویه تماس آب و لغزش بررسی شده است.

فوق آبگریزی سطح با تست سایش مکانیکی در برابر سنباده ۱۵۰۰ مش و قرار گرفتن نمونه در محیط جو بیش از ۱۸۰روز، با زاویه تماس[°] ۲±۱۵۵ و زاویه لغزش[°] ۲±۶ تایید شد، که نشان دهنده پایداری خوب طولانی مدت است. همچنین سطح خاصیت خود تمیز شوندگی کاملی ارایه کرد. به دلیل انعطاف پذیری و سادگی، روشی آسان و ارزان برای دستیابی به خواص نیلوفر آبی است و برای تهیه سطوح فوق آبگریز در کاربردهای عملی در مقیاس بزرگ ارزش بالایی را از خود نشان می دهد.

> مقاله مروری دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۰۸ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۲۶

واژه های راهنما: پوشش های فوق آبگریز، نانو ذرات SiO2، نانو ذرات TiO2، زاویه تماس آب، زاویه لغزشی، فلوروالکیلسیلان

Fabrication of durable super hydrophobic surfaces on wood substrates with SiO2 and TiO2 nanoparticles

Abstract: In this paper, a comparison was made between super hydrophobic surfaces resulted from SiO2 and TiO2 nanoparticles on chemical modification wood and bamboo Substrate. The super hydrophobicity of surface was evaluated based on its morphological properties, mechanical stability, long term stability, and self-cleaning ability by measuring WCA and SA angles.

The super hydrophobicity of the surface was obtained by applying sandpaper mesh size 1500 and exposing the surface to the atmosphere for more than 180 days with a contact angle of $155\pm2^{\circ}$ and a sliding angle of $6\pm2^{\circ}$, and surface showed a self –cleaning property. Taking into consideration the flexibility and simplicity of the method, it is a feasible and low-cost method to acquirable the lotus effect and demonstrated potential for practical applications.

Keywords: Superhydrophobic coatings, SiO2 nanoparticles, TiO2 nanoparticles, Water contact angle, Sliding angle, Fluoroalkyl silane

Zhaleh Azhdarzadeh* Instructor, Department of Mechanical Engineering, Oskou Branch, Islamic Azad University, Oskou

۱– مقدمه

در چند سال گذشته سطوح فوق آبگریز توجه زیادی را به خود جلب کرده اند. به دلیل تنوع آنها درکاربردهای عملی، مانند خود تمیز شوندگی [۱،۲]، جداسازی روغن/ آب [۳،۴]، مقاومت در برابر خوردگی [۵،۶]، ضد باکتری [۲۰۸]، ضد یخ [۹–۱۱]، ضد مه [۱۲،۱۳] . سطح فوق آبگریز به عنوان سطحی تعریف می شود که دارای زاویه تماس آب (WCA) بالاتر از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کمتر از ۱۰ درجه باشد. بارتلوت و نینهویس متوجه شدند که زبری سطح وخاصیت شیمی سطح دو عامل عمدهای بودند که بر ترشوندگی سطح تأثیر میگذارند [۱۴].

مواد مبتنی بر سلولز و فلز به راحتی آب و رطوبت را جذب می کنند. بنابراین، عمر مفید آنها به طور چشمگیری کاهش می یابد که این امر منجر به اتلاف جدی منابع می شود. در جامعه مدرن چوب نقش حیاتی ایفا می کند، چوب بامبو بعنوان یک ماده تزئینی مزایای زیادی دارد، زیرا یک منبع بادوام و تجدیدپذیر سریع با خاصیت مکانیکی شبیه الوار میباشد. بامبو بعنوان یک محصول بادوام و کم هزینه و ماده متناوب اکولوژیکی، در ساخت تزئینات ساختمانی در سطح جهان گسترش و رشد زیادی داشته است. مزایای متعدد آن (وزن سبک، استحکام بالا، ماشینکاری آسان) می باشد. و در کاربردهای روزانه متنوع مانند دکوراسیون داخلی و خارجی، پل چوبی، سنگفرش و غیرہ به طور گسترده مورد استفاده قرار می گیرد. با این حال، به دلیل خاصیت هیدروفیل سلولز و همی سلولز، چوب به تغییرات رطوبت حساس است. به دلیل ساختار متخلخل خاص آن گروه های زیاد هیدروکسیل در سطح چوب مستعد جذب آب و بخار هستند که در شرایط محیط بیرون موجب ترک و پوسیدگی و فرسایش می شود و تاثیرات شدیدی بر استحکام و عمر محصولات می گذارد. از این رو برای بهبود مقاومت راه حل منطقی و ایده آل کاهش دادن جذب رطوبت در سطح چوب میباشد. هر دو ویژگی جذب مایع سطحی و دفع کنندگی در زیرلایه، عامل کلیدی در تعیین و تشخیص محافظت الوار چوب خواهد بود.

با الهام گرفتن از سطوح طبیعی دافع آب مانند برگهای انواع گیاهان، ساختن انواع سطوح آبگریز با تقلید از طبیعت با سطحی زبر و یک پوشش میکرو – نانو ساختار که با مواد انرژی سطح پایین ترکیب می شود انجام می گیرد [۱۵–۱۷] . با وجود اینکه سطوح فوق آبگریز متفاوت روی لایه های چوب بامبو با تکنیک های مختلف ساخته شده اند، اما تهیه سریع، راحت و ارزان سطوح فوق آبگریز هنوز امری چالش برانگیز است. علاوه بر این،کاربردهای عملی سطوح آبگریز مصنوعی معمولاً به دلیل

مقاومت و دوام مکانیکی پایین، مقاومت ضعیف شیمیایی و حرارت کم ثبات آنها مانع نتیجه می شوند [۱۸–۲۱]. حل مشکلات فوق، تمرکز اصلی محققان در زمینه ساخت سطوح فوق آبگریز می باشد.

این روزها، مواد فلزی نیز به طور گسترده در هوافضا، انرژی، تجهیزات مکانیکی و سایر زمینه ها استفاده شده است. با این حال، مقاومت مواد فلزی در برابر خوردگی به طور کلی ضعیف است و به راحتی تحت تأثیر محیط مرطوب قرار می گیرد و باعث کاهش قابل توجه عملکرد می شود و عمر مفید آن را کاهش می دهد. در نتیجه، برای حفاظت موثر از فلزات، مواد بر پایه سلولز و سایر مواد، نیاز فوری احساس می شود تا مقاومت آنها در برابر خوردگی، دوام و آب گریزی افزایش یابد و در نتیجه عمر مفید حوزه های کاربردی آنها گسترش یابد.

تاکنون روش های مختلفی برای ساخت سطوح فوق آبگریز توسعه یافته است، از جمله روش پلاسما، مونتاژ لایه به لایه، فرآیندهای سل-ژل، رسوب گذاری بخار شیمیایی (CVD)، روش هیدروترمال. با این حال، این روش ها به دلیل کدورت پوشش در برابرنور با چالش های جدی برای صنعتی شدن روبرو هستند، اگرچه بسیاری از روش ها اجازه ساخت سطوح فوق آبگریز را می دهند، اما اکثر روش ها نیاز به تجهیزات ویژه، روش های چند مرحله ای و آلودگی محیطی دارند (حلال یا اصلاح کننده سمی). مثلا، روش هیدروترمال و پلاسما فقط برای سطوح خاص اعمال می شود. ساختن سطوح فوق آبگریز زمانی راحت است که روش های پیچیده پردازش بتواند به رویکردهای یک مرحله ای ساده، تبدیل شوند.

برای آماده سازی سطوح فوق آبگریز ترکیبات نانوذرات/پلیمر به طور گسترده ای استفاده شده است. نانو ذراتی مانند SiO2، TiO2، CaCO3 و ZnO اغلب برای ساخت سطوح زبر استفاده می شوند تا پوشش های فوق آبگریز بسازند[۲۷-۲۲]. پلی دی متیل سیلوکسان یک ماده الاستومری معمولی با انرژی سطحی پایین است[۲۸]. در مقایسه با آن، فلوروسیلان های متقاطع، انرژی سطحی کمتری دارند زیرا تعداد زیادی CF3-وجود دارد که جایگزین CH3- شده اند. فلوروسیلان های متقابل عملکرد برتری از نظر مقاومت مایع خورنده و مقاومت در برابر روغن ایجاد می کنند [۲۹].

نانو ذرات TiO2 به طور گسترده ای در بسیاری از زمینه ها مانند سرامیک،لاستیک ها، پوشش ها، کاتالیزورها و داروهای زیستی استفاده می شوند، زیرا دارای عملکرد عالی، هزینه کم، دسترسی آسان، پایداری بالا و از خاصیت غیر سمی بودن

برخوردارند. علاوه بر این همچنین، TiO2 دارای خاصیت فوتوکاتالیستی است.

در این تحقیق، یک روش آسان برای ساخت پوشش های فوق آبگریز بسیار پایدار از طریق ترکیب نانوذرات TiO2، و اتصال عرضی فلوروسیلان ها گزارش شده است. استفاده همزمان از نانو TiO2 و نانو SiO2 آبگریز، نه تنها با هم افزایی باعث ساخت سازه های زبر چند مقیاسی بر روی سطوح فوق آبگریز می شود، بلکه تا حد زیادی پایداری پوشش های فوق آبگریز را بهبود می دهد. پوشش های فوق آبگریز با زاویه تماس آب 166.6 (WCA) درجه و زاویه تماس لغزش ازویه تماس آب 3.4 (CAH) درجه و زاویه تماس لغزش توانایی خود تمیز شوندگی خوب و پایداری حرارتی عالی را نشان دادند.

۲- مواد و روش ها ۲-۱-آماده سازی محلول اصلاح کننده دو جزئی

جزء A از SiO2، SiO2، اتانول و بازدارنده تشکیل شده است. که با مقادیر وزنی زیر بدست آمدند. نانوذرات SiO2 (۵/ گرم) و PMHS (۱ گرم) در ۳۹ گرم اتانول با روش اولتراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه همزده شدند. سپس بازدارنده (۱/۰ میلی لیتر) به محلول همزده اتانول فوق اضافه شد تا جزء A را تشکیل دهد. جزء B از SiO2، اتانول و کاتالیزور تشکیل شده است با مقادیر زیر، نانوذرات SiO2 (۵/۰گرم) در ۴۰ گرم اتانول با روش اولتراسونیک به مدت ۲۰ دقیقه همزده شدند. سپس کاتالیزور کاسترد (۱/۰ میلی لیتر) به محلول اتانول فوق اضافه شد تا جزء B را تشکیل دهد. در نهایت اجزای A و B برای تشکیل محلول اصلاح کننده دو جزئی مخلوط شدند.

سطوح فوق آبگریز لازم را می توان به سادگی با روش اسپری کردن یا فرو بردن در محلول اصلاح کننده دو جزئی روی مواد متخلخل، غیر متخلخل و همگن تهیه کرد. با فرو بردن یا پاشش محلول اصلاح کننده دو جزئی (مخلوط A وB)، سطوح فوق آبگریز را می توان به راحتی بدون نیاز به هیچ گونه فرآیند پیش تصفیه بر روی بسترهای مختلف ایجاد کرد. این روش دارای ویژگی های ویژه زیر است. (۱) PMHS و نانوذرات SiO2 قابل حمل و نقل و ارزان هستند.(۲) هیچ محدودیتی در نوع یا شکل زیرلایه ها وجود ندارد. مواد مبتنی بر سلولز، شیشه و فلزات همگی بدون تخریب ظاهر ذاتی آنها قابل استفاده هستند (۳) سطوح فوق آبگریز ساخته شده در این مطالعه پایداری ابعادی،

خود تمیز شوندگی، و خواص جداسازی آب/روغن را نشان دادند. دراین حالت ابتدا بستر از جنس (چوب، بامبو) در محلول اصلاح کننده دو جزئی به مدت ۵ دقیقه غوطه ور شد، و سپس به مدت ۱ دقیقه در هوا خشک شد. این رویه برای ۳ بارتکرار شد. در نهایت، بستر اصلاح شده در دمای ۸۰ درجه سانتی گراد به مدت ۱ ساعت خشک شد.

۲-۲-آماده سازی لایه های TiO2 روی سطح الوار بامبو

فلورتیانت آمونیوم (۷/۲g) و اسید بریک (۱۸۵۵) در ۱۰۰m آب دیونیزه شده تحت همزدن مغناطیسی شدید حل شدند. بعد از همزدن شدید به مدت ۱۵ دقیقه در درجه حرارت اتاق، مخلوط به هم زده شده تیره به حالت روشن تبدیل شد. سپس محلول ۱۰/۰٪ اسید هیدروکلریک به حالت قطرهای افزوده شد تا زمانیکه ۲۱۰٪ اسید هیدروکلریک به حالت قطرهای افزوده شد تا زمانیکه خط تفلونی اتوکلاو انتقال می یابد. قطعات بامبو متعاقباً در محلول واکنش جاگذاری می شود و در کوره با ۹۰ درجه سانتی گراد به مدت ۵ ساعت نگه داشته می شود، نهایتاً نمونه ها از حلال برداشته و با آب دیونیزه شسته شده و در ۸ درجه بمدت بیش ۱۲۹۰ باعت در اجاق وکیوم خشک می شوند. ابعاد قطعات بامبو از ۲۴ ساعت در اجاق وکیوم خشک می شوند. ابعاد قطعات بامبو مدیم ۲۰۵۶ به مدت ۳ ساعت در دمای ۱۳۰ درجه داخل کوره عملیات جرارتی می شود، سپس نمونه ها با آب مقطر شستشو داده شده و با دمیدن هوای گرم خشک می شوند.

مراحل تولید شامل دو مرحله میباشد: (۱) رسوب حلال شیمیایی لایه های TiO2 و (۲) عملیات حرارتی در حضور ۱۷-FAS. فلورو الکیل سیلان(FAS) ها اغلب به عنوان موادی که انرژی سطحی پایینی دارند شناخته می شوند. قسمت انتهایی گروه مولکول FAS، گروه فلورو آلکیل آب گریز است و لایه های یکنواخت FAS بر روی سطوح جامد که محور مولکولی آنها عمود بر سطح می باشد خود آرایی شده اند. معمولاً لایه های FAS به منظور کم کردن انرژی سطحی سطوح جامد زبر، دارای انرژی بالا به کار گرفته می شوند.

بطور متوسط میانگینی از ۵ اندازه گیری در موقعیتهای متفاوت در هر نمونه گرفته شده و برای محاسبه مقادیر نهایی بکار برده شده است.

ثبات مکانیکی سطح فوق آبگریز با آزمایش خراش مورد ارزیابی قرار گرفت. کاغذ شنی Sic (۱۵۰۰ مش) بعنوان یک سطح ساینده در نظرگرفته شد و سطوح فوق آبگریز روی آن مورد تست قرار گرفتند.



شکل ۱ مقایسه مورفولوژی سطح اولیه و اصلاح شده چوب و بامبو با نانو ذراتSiO2 روی زاویه تماس آب (WCA) [۳۰]

۲-۳- تعیین مشخصات

مقادیر WCA، زاویه تماس و لغزش با استفاده رفراکتومتر کمپانی Kruss آلمان مدل DSA100 محاسبه شد (زاویه تماس، از طریق اندازه گیری زاویه ای که یک قطره از مایع با سطح جامد ایجاد می کند، بدست می آید و کمیتی برای بیان ترشوندگی سطح جامد به وسیله مایع است). هر قطره آب ۵ میکرولیتر است که با سرنگ مخصوص روی سطح نمونه گذاشته می شود و توسط دوربین عکس برداری شده و سپس با نرم افزار دستگاه پردازش می شود. زوایای تماس قطره در دمای محیط ۲۵ درجه سانتی گراد به طور میانگین شش بار اندازه گیری شد.

۳- نتایج و بحث ها ۳-۱- ترکیبات شیمیایی، سطح شناسیها و قابلیت خیس شدن

با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ مدلQuanta 200 SEM با میکروسکوپ الکترونی روبشی^۱ مدلSiO2 قبل تصاویر مورفولوژی ریزساختاری بسترها با نانو ذرات SiO2 قبل و پس از اصلاح سطح مشاهده شد. مورفولوژی سطوح فوق آبگریز چوب، وسایر مواد مبتنی بر سلولز در شکل ۱ نشان داده شده است. سطح اولیه اصلی چوب و بامبو صاف و حاوی چند آوند بود. پس از اصلاح توسط محلول اصلاح کننده دو جزئی، تقریباً همه پس از اصلاح توسط محلول اصلاح کننده دو جزئی، تقریباً همه نطوح بسترها دارای ساختار ناهمواری شدند که با توزیع تصادفی نزرات با اندازه ها و اشکال مختلف مشخص می شود. علاوه بر این، پس از پوشش، تمام سطوح بستر بهبود یافته، دارای زاویه تماس آب بیشتر از °۱۵۰ (قطرات کروی آب روی سطوح زیرلایه

بهبود یافته ایستاده بودند) و زاویه لغزش کمتر از⁰۱۰ شدند. این مقادیر نشان داد که آبگریزی با موفقیت به دست آمده است. بر ۳۰ تحلیل های ذکر شده در بالا، می توان تایید کرد که محلول اصلاح كننده دو جزئي مي تواند ساختارهايي با سلسله مراتب مشابهی ایجاد کندکه بر روی انواع مختلف بسترها صرف نظر ازمورفولوژی یا اندازه آنها دارای زاویه تماس آب بالا باشد. همچنین، سطوح بستر اصلاح شده دارای خاصیت فوق آب گریزی در برابر آب و مایعات معمول، از جمله شیر، قهوه، آب میوه، سس سویا و آبجو بودند. شکل ۲ رابطه بین مایعات و مایع دافع پوشش ها روی بستر های مختلف را نشان می دهد (بسترها شامل چوب، بامبو بودند). زوایای تماس پوشش ها بر روی بسترهای مختلف بزرگتر از [°] ۱۵۰برای شیر، قهوه، آب میوه، سس سویا و آبجو بود. تمام قطرات مایع شکل کروی داشتند و به خوبی توسط سطح بستر بهبود یافته با محلول اصلاح کننده دو جزئی حمایت شدند. دافعه نسبت به مایعات رایج، حاکی از پتانسیل ضد رسوب عالى اين مواد فوق آبگريز است.

برای حالت پوشش با نانو ذرات Tio2 روی الوار بامبو تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی بامبو اصلی و بامبو با روکش Tio2 و سطوح فوق آبگریز ایجاد شده در شکل ۳ نشان داده شده اند. همانطور که مشاهده میکنید درشکل ۳۵ ریزساختارهای بامبو اصلی شامل حفرهها است که میتوان دید، که بعد از رسوبTio2 اصلی شامل حفرهها است که میتوان دید، که بعد از رسوبTio2 بسطح ناهمواری بوجود آمده است. بعد از اینکه بامبو در سیستم به مدت ۵ ساعت غوطهور شد، ذراتی با غلظت بالا در سطح بامبو تشکیل شد (شکل ۲۵). تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی، دیوارههای سلولی و حفرههای سطح بامبو را که با انبوهی از ذرات



شکل ۲ خاصیت آبگریزی سطوح اصلاح شده با نانو ذراتSiO2 و زاویه تماس آنها در معرض مایعات مختلف (شیر، قهوه، آبمیوه، سس سویا، آبجو) [۳۰]

نانو Tio2 بطور نامنظم پوشیده شده را آشکار کرد. در این حالت ناهمواری سطح به طور قابل ملاحظهای افزایش یافته است. تصویر ۳۵ یک تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی سطح چوب بامبو فوق آبگریز را نشان می دهد.

این شکل آشکارا آب دوست بودن چوب بامبو را نشان می دهد (زاویه تماس⁰ ۱۷). قطرات آب فوراً روی بامبو پوشیده با لایه هایTio2 پخش می شوند و زاویه تماس آب تقریباً • درجه است. برعکس، چوب بامبو بهبود یافته با FAS-۱۷ با زاویه تقریبی تماس آب⁰ ۱۳۵ ، خاصیت آبگریزی مشخصی نشان داد. از این رو بعد از رسوب لایه های Tio2 بوسیله تجمع یک لایه FAS-1۷ سطح الوار بامبو یک خاصیت فوق آبگریزی عالی را نشان داد. در طی این مراحل، سطح بامبو از آبدوستی به فوق آبگریزی انتقال یافت و زاویه تماس آب به حداکثر^o ۱۶۳ و زاویه لغزش به⁰ ۳ رسید. نتایج نشان داد که ناهمواری زیاد سطح یک عامل مهم در بدست آوردن سطح فوق آبگریز میباشد. بر اساس نتایج بدست آمده از شکل ۴ روشن است که سطح فوق آبگریز از میکروساختار خاص آن و ترکیبات شیمیایی نشات گرفته است. ارزیابی مورفولوژی یا ساختارسطح الوار بامبو بعد از رسوب محلول شیمیایی و عملیات حرارتی در شکل ۵۵ نشان داده شده است. ساختارهای زبر نانو Tio2 ابتدا در زیر لایه بامبو با فرایند محلول شیمیایی ذخیره می شوند. بعد از عملیات حرارتی در حضور ۱۷-FAS سطح به ساختارهای دوتایی نانو و میکرو مقیاس تغییر مى يابند. بنابراين وجود سطح ناهموار ضرورى است، اما شرط کافی برای رسیدن به فوق آبگریزی این سطح نیست. مشخص شده است که قابلیتتری و خیسی سطح به وسیله دو عامل مهم

ترکیب شیمیایی و ناهمواری سطح هدایت شده است. اندازه گیری ها ثابت می کند که FAS به طور موفقیت آمیزی روی رسوب لایه های Tio2 با عملیات حرارتی جمع شده است. مکانیسم تشکیل لایه ۲۱۰–FAS روی لایه زبر Tio2 ناهموار می تواند به طور کلی توصیف شود همانگونه که در شکل ۵۵ می بینید. مولکولهای ۲۱–FAS با گروه های OH- لایه های Tio2 رسوب شده برای تشکیل یک لایه خود تجمعی در سطح



شکل ۳ تصاویر میکروسکوپ الکترونی روبشی a- سطح بامبو اصلی b- سطح بامبو با روکش c TiO2- بزرگنمایی پنل d, b- سطح فوق آبگریز بامبو [۳۱]

نشریه مهندسی مکانیک



شکل ۴ تصاویر قطره های آب در سطوح متفاوت a - سطح بامبو اصلی b - سطح بامبو پوشیده شده با لایه های c TiO2 - سطح بامبو اصلاح شده بوسیله یک لایه۲۱ -d FAS - سطح بامبو TiO2 فوق آبگریز [۳۱]

به کمک گرما عکس العمل نشان می دهند. لایه FAS-۱۲ تشکیل شده می تواند به طور موثری انرژی آزاد سطح ذخیره شده را کاهش دهد. بطور خلاصه می توان نتیجه گیری کرد که فوق آبگریز بودن سطوح از پیش آماده شده از زبری سطح آنها با ساختارهای میکرو-نانو به همراه ترکیبات فلورینات با انرژی سطحی پایین ناشی می شود.

برای ارزیابی پایداری مکانیکی سطوح فوق آبگریز، آزمایش سایش کاغذ سنباده بر روی سطح فوق آبگریز انجام شد. همانطور که در شکل۶ نشان داده شده است، سطح فوق آبگریز با بارگذاری وزنه های ۱۰ گرمی روی نمونه، با کاغذ سنباده (مش ۱۵۰۰) ساییده می شوند. مقادیر زاویه تماس آب و زاویه لغزش سطوح در هر ۲۰۰ mm طول ساییدگی اندازه گیری شد.

شکل۶ توانایی دفع آب مواد مختلف فوق آبگریز را پس از MTM اسایش نشان می دهد. نتایج به شرح زیر است: ماده چوب فوق آبگریز پس از سایش شدید، فوق آبگریزیش با زاویه تماس آب بیش از ۱۵۰ درجه و زاویه لغزش کمتر از ۱۰ درجه باقی ماند، که نشان دهنده استحکام مکانیکی عالی در برابر کاغذ سنباده است. پایداری مکانیکی خوب سطح چوب فوق آب گریز سنباده است. پایداری مکانیکی خوب سطح چوب فوق آب گریز مقاومت در برابر سایش و گروه هیدروکسیل روی سطح چوب نسبت داد، که یک پیوند کووالانسی با H-S- در زنجیره های نسبت داد، که یک پیوند کووالانسی با HS- در زنجیره های MHS ایجاد می کند. شبیه بسترهای چوبی، پوشش فوق آبگریز روی سطح بامبو نیز ثبات مکانیکی خوبی داشت.

ببریر روی تسطع بهبو نیز نبا سانیمی خوبی ناست. برای حالت دوم نیز دوام مکانیکی سطوح فوق آبگریز با آزمون خراش روی سطوح الوار بامبو انجام شد. در این حالت سطح فوق آبگریز با کاغذ سنباده (مش ۱۵۰۰) ساییده می شود. نتایج در شکل ۷ نشان داده شده اند. در شکل دیده می شود که سطح شکل ۷ نشان داده شده اند. در شکل دیده می شود که سطح منطح کرده است در حالیکه زاویه لغزش از[°] ۳ تا[°] ۳۶ بعد از ۸۰۰mm



شکل a a ارزیابی ناهمواری سطح الوار بامبو با لایههای TiO2 پوشیده شده و سپس به مدت ۳ ساعت در دمای[°] ۱۳۰ در حضور FAS-۱۷ گرم شده b شده - b



شکل ۶ تصویری از تست خراش با مقادیر زاویه تماس و زاویه لغزش سطوح فوق آبگریز اصلاح شده با نانو ذرات SiO2 با استفاده از کاغذ سنباده (۳۰] مش [۳۰]

۳-۳- ثبات و پایداری بلندمدت

پایداری فوق آبگریزی سطح چوب و بامبو بدست آمده بعد از قرار گرفتن درمحیط های داخلی در فاصلههای زمانی متفاوت مورد تحقیق و بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می دهد که مقادیر زاویه تماس سطح پس از ۱۸۰ روز قرار گرفتن در محیط، فقط مقدار کمی از[°] ۱۶۳ به [°]۱۵۵ کاهش یافت و زاویه لغزش کمتر از ۱۰ درجه شد، که نشان دهنده پایداری درازمدت سطح بدست آمده است. از این رو مواد فوق آبگریز را در محیط های بیرون در طولانی مدت می توان مورد استفاده قرار داد.

۳-۴- قابلیت خودتمیز کنندگی

با الهام گرفتن از برگ درخت نیلوفر آبی (لوتوس) بستر فوق آبگریز توانایی خود تمیزکنندگی ارائه می دهد که ناشی از حالت دفع کنندگی بالاو نیروی چسبندگی پایین آب است. نمونهای از پدیده ی خودتمیزکنندگی در طبیعت بر روی برگ نیلوفر آبی مشاهده شده است. قطره یآبی که بر روی برگ نیلوفر آبی می ماند، شکل کروی تقریباً کاملی را حفظ می کند و به آسانی به دور از ذرات گردوغبار روی سطح گردش کرده و آنها را می زداید. چنین سطوحی بایستی نیازهای وسیع کاربردهای عملی را برطرف کرده و هم چنین قابلیت اجرای معتبر در محیطهای ناملایم و خشن را داشته باشند. برای اثبات توانایی ناملایم و دشن را داشته باشند. برای اثبات توانایی الاینده مورد استفاده قرار گرفتند. یک قطره آب توسط سوزن آلاینده مورد استفاده قرار گرفتند. یک قطره آب توسط سوزن

حرکت قطره آب روی بستر فوق آبگریز ذرات کربن را حذف می کند. در ضمن بعلت نیروی چسبندگی پایین، قطره بوسیله سطح فوق آبگریز نمی تواند جذب شود. بعد از حذف و از بین بردن آلودگی، سطح قابلیت خودتمیز کنندگی شبیه برگهای لوتوس را آشکار میکند. شکل ۹ اثر خود تمیز شوندگی سطح چوب را با و بدون پوشش فوق آبگریز نشان می دهد. همانگونه که درشکل ۹ نشان داده می شود ذرات کربن به آسانی بوسیله غلتیدن و چرخش قطرات آب از بین میروند در نتیجه سطح به طور کامل



کل ۲ تصویری از نسب حراس و زاویه نماس و زاویه لعرس سطوح الوار بامبو فوق آبگریز با لایههای TiO2 بصورت تابعی از طول سائیدگی، آزمایش خراش با استفاده از کاغذ سنباده ۱۵۰۰ مش انجام شده است. [۳۱]

نشريه مهندسي مكانيك



شکل ۸ مراحل ارزیابی عملکرد خود پاک کنندگی الوار a- نمونه با پودر کربن b, c - نمونه در حین تست d- سطح نمونه بعد از تست [۳۳]

پاک می شود. اما ذرات آلوده روی سطح اصلاح نشده به این روش خیلی سخت پاک می شوند. بنابراین نتیجه گیری می شود که سطح فوق آبگریز می تواند زیر لایه های چوب و بامبو را در کاربردهای عملی از الودگی حفظ کند.



شکل ۹ توانایی خودتمیز کنندگی الوار بامبو فوق آبگریز، بخشهای a-f نشان میدهد که حرکت قطره به طور موثر میتواند آلودگی سطحی ذرات کربن را از بین ببرد. [۳۱]

۴- نتیجهگیری

به طور خلاصه، سطح فوق آبگریز بادوام و مقاومی از طریق ترکیب دو نوع نانوذره بر پایه فلوروسیلان ها ساخته شد. استفاده از نانوذرات غیرآلی SiO2 همراه با PMHS برای ساخت سطوح فوق آبگریز بر روی انواع بسترها از جمله چوب، بامبو، پنبه با

نتایج مناسب تایید شد و تمام سطوح فوق آبگریز بدست آمده با این روش دارای زاویه تماس آب بزرگتر از[°]۱۵۰و زاویه لغزش کمتر از [°]۱۰ بودند.

فوق آبگریزی سطوح چوبی بامبو اصلاح شده با لایه های TiO2 و مونتاژ با ترکیبات دارای سطح پایین انرژی حاصل از ساختار دودویی ناهموار متشکل از مقیاس میکرو و نانو می باشد، سطح فوق آبگریز به دست آمده نه فقط پایداری مکانیکی و شیمیایی خوبی دارد بلکه دوام طولانی مدت، اثر ضد خوردگی، و خود تمیز شوندگی دارد و زاویه تماس تقریباً ۱۶۳ درجه و زاویه لغزش تقریباً ۳ درجه دارد. می توان در تحقیقات آتی تاثیر نانوذرات را محیط های خورنده با باران اسیدی و ساخت مواد فوق آبگریز چند منظوره با استفاده از مواد بیونیک را مطالعه کرد. امید است مواد چوبی در کاربردهای صنعتی با روشی آسان و کم هزینه و استراتژی موثر ارایه کند.

۵- مراجع

[1] Zhi, J., Zhang, L-Z., Durable super hydrophobic surface with highly anti reflective and self-cleaning properties for the glass covers of solar cells, *Appl Surf Sci.*, Vol. 454, pp. 239–248, (2018).

[2] Yu, N., Xiao, X., Ye, Z., and et al., Facile preparation of durable super hydrophobic coating with self-cleaning property, *Surf Coat Technol.*, Vol. 347, pp. 199–208, (2018).

[3] Zhang, Z-H., Wang, H-J., Liang, Y-H., and et al., One-step fabrication of robust super hydrophobic and super oleophilic surfaces with self-cleaning and oil/water separation function, *Sci Rep.*, Vol. 8, pp. 3869, (2018).

[4] Zulfiqar, U., Hussain, S.Z., Subhani, T., and et al., Mechanically robust super hydrophobic coating from sawdust particles and carbon soot for oil/water separation, *Colloids Surf, A.*, Vol. 539, pp. 391–398, (2018).

[5] Zhu, Y., Sun, F., Qian, H., and et al., A biomimetic spherical cactus superhydrophobic coating with durable and multiple anti-corrosion effects, *Chem. Eng. J.*, Vol. 338, pp. 670–679, (2018).

[6] Ye, Y., Liu, Z., Liu, W., and et al., Superhydrophobic oligoaniline-containing electroactive silica coating as pre-process coating for corrosion protection of carbon steel, *Chem. Eng.* J., Vol. 348, pp. 940–951, (2018).

[18] Zhang, D., Li, L., Wu, Y., and et al., One-step method for fabrication bio inspired hierarchical super hydrophobic surface with robust stability, *Appl. Surf. Sci.*, Vol. 473, pp. 493–499, (2019).

[19] Zhou, Y., Ma, Y., Sun, Y., and et al., Robust super hydrophobic surface based on multiple hybrid coatings for application in corrosion protection, *ACS Appl. Mater nterfaces.*,Vol. 11, pp. 6512–6526, (2019).

[20] Lou, C., Zhang, R., Lu, X., and et al., Facile fabrication of epoxy/ polybenzoxazine based super hydrophobic coating with enhanced corrosion resistance and high thermal stability, *Colloids Surf.*, *A.*, Vol. 562, pp. 8–15, (2019).

[21] Zhang, J., Chen, R., Liu, J., and et al., Construction of ZnO@Co3O4-loaded nickel foam with abrasion resistance and chemical stability for oil/water separation, *Surf Coat Technol.*, Vol. 357, pp. 244–251, (2019).

[22] Zhao, X., Li, Y., Li, B., and et al., Environmentally benign and durable super hydrophobic coatings based on SiO2 nanoparticles and silanes, *J Colloid Interface Sci.*, Vol. 542, pp. 8–14, (2019).

[23] Latthe, SS., Sutar, RS., Shinde, TB., and et al., Super hydrophobic leaf mesh decorated with SiO2 nanoparticle-polystyrene nanocomposite for oil-water separation, *ACS Appl. Nano Mater.*, Vol. 2, pp. 799–805, (2019).

[24] Yang, M., Liu, W., Jiang, C., and et al., Robust fabrication of superhydrophobic and photocatalytic self-cleaning cotton textile based on TiO2 and fluoroalkylsilane, *J. Mater Sci.*, Vol. 54, pp. 2079–2092, (2019).

[25] Wang, Y., Huang, Z., Gurney, RS., and et al., Super hydrophobic and photocatalytic PDMS/TiO2 coatings with environmental stability and multi functionality, *Colloids Surf.*, A., Vol. 561, pp. 101–108, (2019).

[26] Yuan, Z., Bin, J., Wang, X., and et al., Preparation of a polydimethylsiloxane (PDMS)/CaCO3 based superhydrophobic coating, *Surf. Coat Technol.*, Vol. 254, pp. 97–103, (2014).

[27] Wang, M., Zhang, M., Pang, L., and et al., Fabrication of highly durable polysiloxane-zinc oxide (ZnO) coated polyethylene terephthalate (PET) fabric with improved ultraviolet resistance, hydrophobicity, and thermal resistance, *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 537, pp. 91–100, (2019).

[28] Zhao, X., Li, Y., Li, B., and et al. Environmentally benign and durable superhydrophobic coatings based on SiO2 nanoparticles and silanes, *J. Colloid Interface Sci.*, Vol. 542, pp. 8–14, (2019). [7] Zhou, S., Wang, F., Balachandran, S., and et al., Facile fabrication of hybrid PA6-decorated TiO2 fabrics with excellent photocatalytic, anti-bacterial, UV light-shielding, and super hydrophobic properties. *RSC Adv.*, Vol. 7, pp. 52375–52381, (2017).

[8] Shaban, M., Mohamed, F., Abdallah, S., Production and characterization of super hydrophobic and antibacterial coated fabrics utilizing ZnO nanocatalyst, *Sci. Rep.*, Vol. 8, pp. 3925, (2018).

[9] Zuo, Z., Liao, R., Song, X., and et al., Improving the anti-icing/frosting property of a nano structured super hydrophobic surface by the optimum selection of a surface modifier, No. 36, (2018).

[10] Cheng, Y., Lu, S., Xu, W., and et al., Controllable fabrication of super hydrophobic alloys surface on copper substrate for self-cleaning, anti-icing, anti-corrosion and antiwear performance, *Surf Coat Technol.*, Vol. 333, pp. 61–70, (2018).

[11] Jafari, R., Momen, G., Eslami, E., Fabrication of icephobic aluminium surfaces by atmospheric plasma jet polymerisation, *Surf. Eng.*, DOI:10.1080/02670844, (2018).

[12] Zhou, X., Lee, Y-Y., Chong, KSL., and et al., Super hydrophobic and slippery liquid-infused porous surfaces formed by the self-assembly of a hybrid ABC triblock copolymer and their antifouling performance, *J. Mater Chem. B.*, Vol. 6, pp. 440–448, (2018).

[13] Wang, Y., He, G., Shao, Y., and et al., Enhanced performance of super hydrophobic polypropylene membrane with modified antifouling surface for high salinity water treatment, *Sep Purif Technol.*, DOI:10.1016/j., seppur.2018.02.011, (2018).

[14] Zhu, T., Cai, C., Duan, C., and et al., Robust polypropylene fabrics super-repelling various liquids: a simple, rapid and scalable fabrication method by solvent swelling, *ACS Appl Mater Interfaces.*, Vol. 7, pp. 13996–14003, (2015).

[15] Gao, L., Xiao, S., Gan, W., Zhan, X., Li, J., Durable super amphiphobic wood surfaces from Cu2O film modified with fluorinated alkylsilane, *RSC Adv.* 55 98203–98208, (2015).

[16] Gao, L., Lu, Y., Zhan, X., Li, J., Sun, Q., Arobust, anti-acid, and high temperature humidity resistant superhydrophobic surface of wood based on a modified TiO2 film by fluoroalkylsilane, *Surf. Coat. Technol.*, pp. 26233–39, (2015).

[17] Tu, K., Wang, X., Kong, L., Chang, H., Liu Fabrication of robust, damage -tolerant super hydrophobic coatings on naturally micro-grooved wood surfaces, *RSC Adv.*, (2015). [31] Li, J., et al., Durable, self-cleaning and superhydrophobic bambootimber surfaces basedonTiO2 films combined with fluoroalkylsilane, CeramicsInternational, http://dx.doi.org/10.1016/j.ceramint.2016.03.047i, (2016).

[32] Hu, J., Fang, Z., Huang, Y., and Lu, J., Fabrication of superhydrophobic surfaces based on fluorosilane and TiO₂/SiO₂ nanocomposites, Surface Engineering, DOI: 10.1080/02670844.2020.1730059, (2020).

[29] Latthe, S.S., Sutar, R.S., Shinde, T.B., and et al. Superhydrophobic leaf mesh decorated with SiO2 nanoparticle-polystyrene nanocomposite for oil–water separation, *ACS Appl. Nano Mater.*, Vol. 2, pp. 799–805, (2019).

[30] Lin, W., Cao, M., Olonisakin, K., Li, R., Zhang, Xi., Yang, W., Superhydrophobic materials with good oil/water separation and self-cleaning prepared through a environment-friendly and two-component method, *Cellulose*, Vol. 28, pp. 10425-10439, (2021).



سلمان ابراهیمی نژاد رفسنجانی*

هومن وطن دوست دانشجوی کارشناسی ارشد

علیرضا رشیدمنافی دانشجوی دکتری، آزمایشگاه تحقیقاتی سیستمهای دینامیکی خودرو، دانشکده مهندسی خودرو، دانشگاه علم و صنعت ایران، تهران

مقاله مروری دریافت: ۱۴۰۱/۰۲/۰۴ یذیرش: ۱۴۰۱/۰۴/۱۲

مروری بر انواع فرامواد و کاربرد آن در کاهش نویز و ارتعاشات ناخواسته

چکیده: امروزه به منظور کاهش نویز و ارتعاشات از فرامواد به عنوان مانع، میرا کننده و یا جاذب ارتعاش و صوت در حوزه های مختلفی چون هوافضا، خودرو و کنترل آلاینده های صوتی استفاده می شود. این مواد، موادی مصنوعی ساخته شده از سلول های واحد با ابعادی کوچکتر از طول موج امواج صوتی مورد نظر هستند که در ابعاد بزرگتر به صورت متناوب تکرار شده اند و می توانند دامنه ی امواج صوتی را در بازه فرکانسی مورد نظر به صورت مؤثر کاهش دهند. در این مقاله مروری، به بررسی تحقیقات انجام شده در زمینه فرامواد مختلف به خصوص فرامواد آکوستیکی و الاستیکی پرداخته شده و کاربردها و نتایج آن ها در کاهش نویز و ارتعاشات ناخواسته محیط مورد مطالعه قرار گرفته است. در اکثر تحقیقات محاسبات عددی با استفاده از قضیه بلاک-فلوکوت برای محاسبه فاز بلاک سلول واحد فرامواد است. در اکثر تحقیقات محاسبات عددی با استفاده از قضیه بلاک-فلوکوت برای محاسبه فاز بلاک سلول واحد فرامواد و تا فرکانسی که در این قضیه گپ انرژی پیش بینی شده از فاز بلاک محاسبه شده از فرکانس صفر شروع می شود و تا فرکانسی که دارای مقدار انتقال کمتر از یک میباشد ادامه پیدا می کند. نتایج این تحقیقات نشان می دهد با استفاده از فرامواد می توان ارتعاشات و نویز فرکانس-پایین یک سیستم را در حد مطلوبی کاهش داد. همچنین افزایش دمپینگ جاذب ها بطور مستقیم باعث افزایش عرض باند توقف و کاهش دامنه ی ارتعاش در فرکانس پائین به وسیله افزایش فاصله باندی انرژی می شود. افزایش درجات آزادی رزوناتورهای محلی نیز از روش های دیگر افزایش گپ انرژی افزایش فاصله باندی انرژی می شود. افزایش درجات آزادی رزوناتورهای محلی نیز از روش های دیگر افزایش گپ انرژی

A

Salman Ebrahimi-Nejad Rafsanjani * Assistant Professor

> Hooman Vatandoost M.Sc. Student

Alireza Rashidmanafi

PhD Student, Vehicle Dynamical Systems Research Lab, Faculty of Automotive Engineering, Iran University of Science and Technology, Tehran

A review of the types of metamaterials and their application in reducing unwanted noise and vibrations

واژه های راهنما: فرامواد، الاستیک، آکوستیک، ارتعاش کننده محلی، نویز، فرکانس

Abstract: Today, in order to reduce noise and vibrations, meta-materials are used as a barrier, attenuator or absorber of vibration and sound in various fields such as aerospace, automotive and pollutant control. Meta-materials are synthetic materials made from single cells with dimensions smaller than the desired wavelength of sound waves, repeated alternately in a larger scale, which can effectively reduce the amplitude of sound waves in the desired frequency range. In this review article, research conducted in the field of various metamaterials, especially acoustic and elastic metamaterials, and their applications and results in reducing noise and unwanted vibrations of the environment have been studied. In most researches, numerical calculations have been performed using the Bloch-Floquet theorem to calculate the Bloch cell phase of a single metamaterial cell. The results of this research show that by using acoustic and elastic meta-materials, the vibrations and low frequency noise of a system can be reduced to a desirable level. It becomes a means of increasing the energy band gap. Increasing the degree of release of local resonators is another way to increase energy gap and further reduce vibration.

Keywords: Metamaterials, Elastic, Acoustic, Local Resonator, Noise, Frequency

۱– مقدمه

در حال حاضر اصطلاح فرامواد بهطور گسترده در مواد مهندسی، معمولاً کامپوزیتها، به کار برده میشود که از یک ساختار داخلی برای ایجاد خواص مؤثر در مواد مصنوعی تشکیل شده است و اساساً این خواص متفاوت از خواص مواد موجود در اجزای آن است. این اصطلاح از زمینه مواد الکترومغناطیس نشأت گرفته، که در آن فرامواد برای کنترل پخش نور و امواج رادیویی و بهطور خاص برای نشان دادن مواد تشکیل شده از ساختارهای هدایت شده استفاده شده است که با تولید واکنش های کنترل الکتریکی و مغناطیسی دوقطبی در زمینه های کاربردی باعث شناخته شده طبیعی وجود ندارد. واژه فرامواد به طور دقیق تعریف نشده است ولی یک تعریف خوب برای کاربرد آن عبارت است از: یک ماده با خواص مؤثر بر اساس نیاز بدون محدودیتهایی که در مواد طبیعی وجود دارد.

۲- فرامواد و انواع مختلف آن

فرامواد طبقه بندی جدیدی از کامپوزیتهای نیمهفعال هستند که در سال ۲۰۰۱ میلادی توسط آژانس پروژههای تحقیقاتی پیشرفته دفاع امریکا^۱برای نشان دادن خواص استثنائی مواد که در طبیعت یافت نمیشوند و یا اینکه در مواد تشکیلدهندهی آنها مشاهده نشده به منظور توسعه فناوریهای جدید پیشنهاد شدند [۱]، [۲].

خواص استثنائی فرامواد با استفاده از ساختار مهندسی آنها بصورت مصنوعی ساخته شدهاند و ناهماهنگی ابعادی بسیار کمی دارند. این مفهوم باعث شده است که محققان بتوانند از بند محدودیت عملکرد مواد متعارف موجود در طبیعت بیرون آیند و به ویژگی های غیرمتعارفی از مواد دست پیدا کنند [۳]، [۴]. در ابتدا از فرامواد برای تحقیق در زمینه امواج الکترومغناطیسی [۵]، [۶] استفاده میشده و سپس محققان شروع به بررسی استفاده از فرامواد در امواج صوتی کردند [۷]. وقتی امواج الکترومغناطیس وارد ماده شد، میدانهای الکتریکی و مغناطیسی آن با الکترونهای ماده و دیگر اتمها و ملکولها دچار واکنش شده و این اتفاق باعث میشود که سرعت امواج و طول موج آنها زمانی که رزونانس بصری محلی آتفاق میافتد دچار تغییر شود.

¹DARPA: Defense Advanced Research Projects Agency

۲–۱– فرامواد آکوستیک

آکوستیک شاخهای از علم است که انتشار امواج صوتی و ارتعاش را بررسی میکند. شنیدن امواج صوتی در همه جا یک تجربهی روزانه به شمار میآید. این امواج مبنای ارتباطات کلامی انسان است. امواج با فرکانس بیشتر از محدوده شنوائی انسان در پزشکی برای دستگاههای تصویربرداری اولتراسونیک و در صنعت استفاده می شود. با این حال، کنترل امواج صوتی همیشه آسان نیست. تراز شدت صوت امواج با انتشار در هوا بهدلیل مقاومت هوا و رطوبت کاهش می یابد که معمولاً به راحتی در موانع ضخیم نفوذ مىكند. دستگاههاى الكترونيكى قادر به تقويت سيگنالهاى صوتی و تغییر آنها هستند، البته پس از تبدیل امواج به سیگنالهای الکترونیکی قابل تقویت و تغییر هستند. نتیجه استفاده از ابزار جدید برای کنترل این امواج در شکل مواد مصنوعي، بسيار مطلوب است. حال با توجه به تعريف أكوستيك، مي توان گفت فرامواد آكوستيك اولين فرامواد مصنوعي (كرههاي یوشش داده شده با پلاستیک) هستند متشکل از ساختارهایی با طول موج کوتاہ که با تشدید محلی به امواج صوتی ورودی یاسخ میدهند. مجموعهای از این اتمهای بزرگ درون فرامواد خاص بودن را نشان میدهد، اما این خاصیت میتواند برای ویژگیهای صوتی مفید میباشد.

امروزه طراحی کردن فراموادی برای پنهان کردن یک شیء نیز امکانپذیر میباشد. همچنین، از فرامواد صوتی با ضریب شکست منفی برای تغییر جهت امواج صوت پخش شده از بلندگو استفاده می شود که این کارها باعث ایجاد روش های جدیدی برای تمرکز و شکل دادن به موضوعات مربوط به صوت می شود.

در طول ۱۵ سال گذشته، موضوعات مربوط به فرامواد صوتی به چندین شاخه مختلف تقسیم شدند و نشان دادند که امواج صوتی میتوانند به روشهایی که قبلاً حتی تصور نمیشد دستکاری و کنترل شوند.

۲–۲– فرامواد الاستيک

فرامواد الاستیک به منظور طراحیهای خاص ریزساختار مورد توجه بیشتری قرار گرفتهاند. از این مواد برای بدست آوردن ویژگی دینامیکی موثر مواد که در طبیعت یافت نمی شود استفاده می شود. مبنای کاری فرامواد الاستیک این است که از ریزساختارهای ساختهی دست بشر (تشدیدگرهای محلی) در

² Local optical resonance

مقیاسهای کوچکتر از طول موج مورد بررسی استفاده می شود. بنابراین، فاصله-باندی^۱ کوستیکی (محدوده فرکانسی که امواج آکوستیکی در ساختار متناوب نمی توانند منتشر شوند) در آن زیاد بوده و امواج صوتی با فرکانس کم نمیتوانند در آن منتشر شوند. در بعضی از کامپوزیتها فاصله-باندی انرژی امواج کم فرکانس توسط چگالی جرمی موثر منفی در سیستمهای جرم-فنر به صورت مجزا توضیح داده شده است.

یکی از کاربردهای مهم مهندسی فرامواد الاستیک جذب ارتعاش در فرکانسهای کم می باشد. علاوه بر قانون بازتابش براگ در بلورهای واکنشی، مکانیزم رزونانس موضعی می تواند با طراحی مناسب ریزساختار و انرژی ارتعاشی فرکانس-پایین با مقدار بسیار کمی از ریزساختارهای دورهای به سرعت تضعیف شود. بنابراین، ساختارهای عظیم برای محافظت از موضوع ساختاری در ارتعاش فرکانس-پایین نیاز نمی باشد.

ساختارهای مهندسی از قبیل میلهها، تیرها و ورقها با طراحیهای مطلوب رزونانس موضعی ریزساختار برای دفع ارتعاشات بکار گرفته می شوند.

۲-۳- فرامواد الكترومغناطيس

مفهوم فرامواد در ابتدا برای امواج الکترومغناطیسی معرفی شده است که اکنون بهعنوان فرامواد الکترومغناطیسی طبقهبندی شده است. فرامواد الکترومغناطیسی ساختارهای دستسازی دارند که در مقیاس طول موج کوتاه بهمنظور دستیابی به قابلیتهای غیرطبیعی مورد استفاده قرار می گیرند، این فرامواد دارای خواص الکترومغناطیسیای هستند که در مواد طبیعی یافت نمی شود.

ویژگیهای الکترومغناطیسی مواد الکترونیک عمدتاً بهوسیلهی پارامترهای فیزیکی انعطاف پذیری، نفوذ پذیری و هدایت پذیری تعیین می شوند. تمام مواد الکترومغناطیس می توانند مطابق شکل ۱ طبقه بندی شوند. در این شکل، برای مقادیر مثبت و منفی پارامترهای انعطاف پذیری (ع) و نفوذ پذیری (μ) چهار حالت مختلف به اینصورت که مقادیر مثبت این دو پارامتر^۲ دسته اول، نفوذ پذیری مثبت و انعطاف پذیری منفی^۳ دسته دوم، مقادیر مثبت انعطاف پذیری و منفی نفوذ پذیری¹ دسته سوم و نفوذ پذیری و انعطاف پذیری منفی⁶در دسته چهارم در نظر گرفته شده است. به طور خاص، مواد با انعطاف پذیری و

نفوذپذیری منفی، موادهای چپ دست^۶و یا با شاخص منفی نامیده میشوند.



شکل ۱ طبقه بندی مواد بر اساس نفوذپذیری و انعطاف پذیری

۳- ویژگی های فرامواد

نفوذپذیری مغناطیسی یک از ویژگیهای هر محیط است که رابطهی بین چگالی شار مغناطیسی (B) و شدت میدان مغناطیسی (H) را تعیین میکند و واحد آن هانری بر متر میباشد. گذردهی یکی از مهمترین ویژگیهای دی الکتریکها و بیانگر توانایی دی الکتریک در ذخیرهسازی انرژی الکتریکی است. گذردهی هر محیط برابر است با حاصلضرب گذردهی خلأ در گذردهی نسبی. گذردهی را میتوان میزان قطبیت پذیری یک ماده دانست. اگر مادهای گذردهی بالاتری نسبت به یک ماده دیگر داشته باشد، در میدان الکتریکی یکسان، میتواند بار الکتریکی بیشتری در خود ذخیره کند.

کریستالهای فونونی دارای سازههای دیالکتریک و فلزی هستند که قادر به دستیابی به سرعت فاز منفی میباشند. این مواد برای نشان دادن بسیاری از سیالات متخلخل متناوب، الاستیک و ترکیبی از این دو استفاده می شوند.

اصطلاح کریستال فونونی ابتدا در اوایل دهه ۱۹۹۰ میلادی بهعنوان کریستالهای آنالوگ فوتونی مورد بررسی قرار گرفت. این موضوع امروزه به یک موضوع داغ در زمینه فیزیک ماده چگال تبدیل شده است. کریستالهای فونونی اکنون میتوانند بر اساس ساختارهای توپولوژی فضایی به یک، دو و سه بعدی طبقه بندی شوند. هنگامی که امواج الاستیک از طریق کریستال های فونونی پخش میشوند، رابطه پراکندگی ویژه تولید میشود.

¹ Band-gap

² DPS:Double-Positive

³ ENG: ε -negative

⁴ MNG: Mu-Negative

⁵ DNG:Double-Negative

⁶ Left-Handed

محدوده فرکانسی بدون منحنیهای پراکندگی را گپ انرژی گویند که ارتعاشات و صوت در این ناحیه نمی توانند منتشر شوند.

۳-۱- خواص گپ انرژی فرامواد الاستیک با جاذب ار تعاش دینامیکی بر پایه دمپر مکانیکی^۱

فنگ و همکاران [۸] در سال ۲۰۱۸ در دانشگاه ژیجیانگ چین فراموادی طراحی کردند که با افزودن یک سیستم فنر به سیستم جرم و فنر یک تیر فرامواد باعث افزایش گپ انرژی در بازه فرکانسی محدوده کاری مورد نظر شده است. در نتیجه میتوان گفت با افزایش یک فنر به سیستم جرم و فنر یک تیر فرامواد موفق به دفع بیشتر ارتعاشات نسبت به تیر فرامواد معمولی که قبلاً طراحی کرده شده است. سیستم جرم و فنر اضافه شده به فرامواد موجود، حرکت خطی بوجود آمده در تیر را به حرکت دورانی تبدیل میکند، در نتیجه دو گپ انرژی در فرکانسهای پایین و بالا ایجاد میشود. بدین صورت که با افزایش اینرسی و تعریف یک درجه آزادی جدید در سیستم گپ انرژی جدید ایجاد میشود. در این مقاله ارتعاشات وارد بر فرامواد الاستیک مجهز به یک سیستم جرم و فنر اضافی مورد بررسی قرار گرفته و دربارهی پتانسیل استفاده از این سیستم در عریض کردن گپ انرژی بطور

۲-۳- تئوری تیرهای سـاخته شـده از فرامواد به منظور جذب ارتعاش باند گسترده

در یک تحقیق در سال ۲۰۱۰ توسط سان و همکاران [۹] در دانشگاه میزوری امریکا روشی برای مدل کردن، آنالیز و طراحی تیر ساخته شده از فرامواد برای جذب ارتعاش باند گسترده معرفی شده است. تیر پیشنهادی شامل ساختار یکپارچه همسانگرد با تعداد زیادی زیرسیستم فنر-جرم-دمپر کوچک که در طول تیر پخش شده و بهعنوان جاذب ارتعاش عمل میکنند میباشد.



برای یک سلول واحد از این تیر معادلاتی با استفاده از اصل همیلتون بدست میآید. وجود گپ انرژی لزوم استفاده از مدلی بر پایهی خواص متوسط مواد در طول یک سلول و مدلی بر پایهی مدلسازی المان محدود و همچنین تئوری بلاک-فلوکوت⁷برای ساختارهای دوره ای را نشان می دهد. این مدلهای ایدهآل نمیتوانند برای تیرهای محدود و یا امواج الاستیکی که طول موج کوتاهی دارند استفاده شود. برای تیرهای محدود متشکل از فرامواد روش المان محدود خطی برای مدلسازی و آنالیز مورد استفاده قرار می گیرد.

در این تیرها استفاده از جاذبهای دورانی توصیه شده است. شبیه سازی عددی نشان میدهد که مبنای اصلی نوع کارکرد مکانیزم تیر فرامواد پیشنهاد شده همان مفهوم رایج جاذبهای مکانیکی ارتعاشات است. امواج الاستیک وارد شده به تیر برای تحریک کردن جاذبهای فنر-جرم-دمپر بکار میروند تا در فرکانسهایی بالاتر از فرکانس های محلی تیر ارتعاش کند و نیروی برشی و گشتاور خمشی مورد نیاز برای مستحکم نگه داشتن تیر و توقف انتشار موج در تیر را تولید کند.

برای امواج فرکانس بالا، شرایط مرزی ساختار تأثیر زیادی روی عملکرد جاذبها ندارد درصورتیکه برای جذب ارتعاشات در امواج فرکانس پائین شرایط مرزی و مودهای تشدید ساختار باید در نظر گرفته شوند. با توجه به محاسبات لازم برای طراحی استفاده از جاذبهای فنر-جرم-دمپر مجزا که بصورت محدود در طول تیر نصب شده است مناسب است.



شکل ۳ مدل دو درجه آزادی (a) جرم در جرم (b) جرم در فنر [۹]

۳-۳- استفاده از تیر فرامواد الاستیک کایرال به منظور دفع ارتعاشات باند گسترده

در سال ۲۰۱۴، ژو و همکاران [۱۰] در دانشگاه آلکانزاس امریکا با طراحی تیری با استفاده از فرامواد الاستیک که دارای

¹IDVA: Inerter-Based Dynamic Vibration Absorbers



۳-۴- گپ انرژی ارتعاشات برای میلههای فرامواد الاستیک با استفاده از امواج

در یک تحقیق انجام شده توسط نوبرگا و همکاران [۱۱] در دانشگاه کمپیناس برزیل در سال ۲۰۱۶ باندهای توقف میله های فرامواد الاستیک با تشدیدگرهای محلی که بهطور متناوب در طول تیر توزیع شدهاند برر سی شده است. دو روش جدید برای برر سی سیستمهای فرامواد در این مقاله استفاده شده است.

روش اول که به "روش المان طیفی موج" معروف است شامل روش المان طیفی و تئوری بلاک-فلوکوت میباشد. روش دوم یک روش جدید است که به "روش المان محدود موج" نامگذاری شده است، این روش برای محاسبه رفتار دینامیکی در ساختار سیستمها و سیستمهای متناوب صوتی تو سعه داده شده است. استفاده از این روش مشابه روش المان طیفی است که با روش المان محدود جایگزین شده است.

در این مقاله از روش المان محدود موج برای محاسبهی باندهای توقف در میلههای فرامواد الاستیک که بهصورت فضایی و متناوب توزیع شدهاند و شامل تشدیدگرهای چند درجه آزادی می باشند استفاده شده است.

باندهای توقف ایجاد شده توسط پراکندگی براگ و تشدیدگرهای محلی با روش المان محدود موج محاسبه و با روش المان طیفی موج اعتبارسنجی شده و نتایج بهدست آمده به شکل تابع پاسخ فرکانسی نمایش داده شدهاند. از یک میلهی ساخته

³ WFEM : Wave Finite Element Method



شکل ۴ حالت پایدار موج یک تیر فرامواد با نیروهای برشی متفاوت [۹]

تشدیدگرهای محلی میباشد توانستند بدون اینکه ظرفیت بار برشی تیر را کم کنند، ارتعاشات وارد بر تیر در باند گسترده را دفع کنند. در ابتدا یک مدل تئوری از تیر به منظور بررسی رفتار گپ انرژی با تشدیدگرهای چندگانه پیشنهاد شده است. باندهای گذرگاهی جدیدی برای واکنش دینامیکی بین تشدیدگرها شکل میگیرد که به عنوان مانعی برای دفع کامل ارتعاشات وارد بر تیر عمل میکنند. در آنالیز فاکتور تلفات ارتعاش تشدیدگر، تیر فرامواد الاستیک با تشدیدگرهایی که بصورت بخش بخش در طول تیر توزیع شدهاند برای فراهم کردن دفع ارتعاشات باند بصورت کایرال شبکه بندی شده است بدست آمده و برای اعتبارسنجی، مدلی تجربی مورد بررسی و تست قرار گرفته است.



شبکه شش وجهی کایرال [۱۰]

¹ FRF: Frequency Response Function
 ² WSEM : Wave Spectral Element Method

شده از پلاستیک در دستگاه پرینتر سه بعدی بهعنوان میلهی فرامواد الاستیک استفاده می شود که تشدید گرهای محلی روی آن تأثیر نگذاشتهاند.



شکل ۷ (a) شبیه سازی هدایتگر موج (b) ابعاد تشدیدگر محلی و شکل ظاهری آن [۱۱]

نتایج بدست آمده از تست آزمایشگاهی با نتایج حاصل از روش پراکندگی براگ مقایسه شده است. هر دو روش عددی مکان و عرض باند توقف را با خطای بسیار کمی نسبت به تست آزمایشگاهی درست محاسبه کردهاند.

۳-۵- گپ انرژی کامل ارتعاشات در فرکانس پائین در صفحات فرامواد الاستیک

در مطالعهای در سال ۲۰۱۹ توسط لی و همکاران [۱۲] در دانشگاه شیئو در چین سعی بر آن شده که با استفاده از فرامواد الاستیک ضخیم از جنس فولاد و ایجاد یک گپ انرژی کامل بتوان نویز و ارتعاشات را کاهش داد. از صفحات فرامواد الاستیک با توجه به شرایط خاص فیزیکی مرتبط با گپ انرژی میتوان برای کاهش نویز و ارتعاشات استفاده کرد. ساختار استفاده شده در این مقاله شامل تشدیدگرهای مرحلهای، دو طرفه و متناوب است که بر روی یک صفحهی کریستالی فونونیک با تشدیدگرهای دو بعدی قرار دارد. در شکل ۸ صفحه فرامواد پیشنهادی مشاهده میشود.



شکل ۸ صفحه فرامواد پیشنهادی و سلول واحد آن [۱۲]

صفحه کریستالی فونونی شامل مجموعهای از قطعات پلاستیکی است که درون ورق فولادی ضخیم قرار گرفته است.

روابط پراکندگی، طیفهای انتقال قدرت و میدانهای جابجایی مدلهای خاص با استفاده از روش المان محدود محاسبه میشود. نتایج بهدست آمده برای مدل پیشنهادی نشان میدهد باز شدن اولین گپ انرژی ارتعاشات در مقایسه با یک صفحه فرامواد الاستیک فولاد با ضخامت معمولی با یک فاکتور ۹٫۵ کاهش می یابد.

این اتفاق سبب می شود که موجهای الاستیک کم فرکانس کاهش یابد. مکانیزمهای تولید گپ انرژی معمولاً به صورت عددی بررسی می شود. نتایج نشان می دهد که مکانیزم تشکیل گپ انرژی در یک فرکانس پایین جدید می تواند به اتصال بین یک حالت تشدید گر محلی از تشدید گرهای مرحلهای کامپوزیت و یک مود شیب موج ورق فولاد ضخیم ارتباط داد. محل گپ انرژی ارتعاشات توسط مودهای رزونانس تشدید گرهای مرحلهای کامپوزیتی تعیین می شود.

۳-۶- گپ انرژی ارتعاشات در صفحات باریک فرامواد الاستیک با تشدیدگرهای محلی

در یک تحقیق توسط هی و هوانگ [۱۳] در دانشگاه تایوان در سال ۲۰۱۸ یک صفحهی فرامواد شامل سوراخهای متناوبی که روی آن تشدیدگرهایی تعبیه شده است مورد بررسی قرار گرفته است. با مطالعات عددی که در این مدل انجام شده است ثابت شده که برای محدودهی فرکانسی پائین یک گپ انرژی کامل بهوجود میآید. برای بررسی رفتار گپ انرژی در کل صفحه، ابتدا یک مدل ساده شده پیشنهاد شده است که بتوان رفتار دقیق اولین گپ انرژی را در آن مورد بررسی قرار داد و ویژگیهای اصلی آن را برای محدودههای فرکانسی پائین بهدست آورد. سپس یک واحد واقعی و قابل بررسی از صفحه برای شبیه سازی در روش المان محدود طراحی شده است. صفحهی فرامواد بسیار خوبی برای پیشبینی خواص این گپ انرژی در حالت محاسباتی و شبیهسازی شده نشان میدهد.



شکل ۹ مدل ساده شده و سه بعدی از سلول واحد فرامواد طراحی شده [۱۳]



فرامواد روی گپ انرژی [۱۳]

۴– صفحات فرامواد صوتی برای جذب امواج الاستیک و دفع ارتعاشات

در یک مقاله که در سال ۲۰۱۴ توسط پنگ و پای [۱۴] در دانشگاه میزوری امریکا انجام شده تکنیکهای مدلسازی و طراحی مکانیزمهای کاربردی صفحات فرامواد صوتی برای جذب امواج الاستیک و دفع ارتعاشات در ساختار آن نشان داده شده است.

هر یک از صفحات مورد بررسی از دو صفحه یمجزا و مشابه هم (از نظر خواص فیزیکی) با زیرسیستمهای فنر-جرم-دمپر که بعنوان جاذبهای ارتعاش محلی عمل می کنند تشکیل شده است. برای یک صفحه نامحدود، باند توقف توسط آنالیز پراکندگی⁽که روی یک سلول آن انجام شده بدست آمده است.



شکل ۱۱ صفحه ساخته شده از فرامواد با زیر سیستم جرم و فنر [۱۴]

آنالیز پاسخ فرکانسی مدل کامل المان محدود، نحوهی رفتار باند توقف را نشان میدهد که این رفتار توسط آنالیز گذرا^۲که بر پایهی انتگرالگیری عددی مستقیم از معادلات المان محدود میباشد مورد بررسی قرار گرفته است.

تأثیرات فرکانسهای تشدید محلی و نسبت دمپینگ و

دمپینگ صفحات، شرایط مرزی و فرکانسهای طبیعی و مودهای ارتعاشی جاذبهای ارتعاش مورد بررسی قرار گرفتهاند. تشدید ارتعاش جاذبها با امواج الاستیک تولیدی که حاوی یک نیروی متمرکز اولیه است برای جلوگیری از نیروی برشی اولیه در صفحه، همچنین مستحکمتر کردن صفحه و توقف انتشار موج انجام می شود.

نتایج عددی، مکان باند توقف که توسط جاذبهای فرکانس تشدید محلی تعیین شده است را نشان می دهد. عرض باند توقف با نسبت جرم کل جاذب به جرم یک سلول افزایش می یابد، همچنین افزایش دمپینگ جاذبها بطور مستقیم باعث افزایش عرض باند توقف و کاهش دامنه یارتعاش در فرکانس پائین می شود (افزایش بیش از حد دمپینگ ممکن است باعث از بین رفتن تأثیر باند توقف شود).



شکل ۱۲ (a) صفحات پراکندگی موج (b) نشان دادن باند توقف (نوار خاکستری رنگ) [۱۴]

۴-۱- فرامواد عایق صوت برای پهنای باند مشخص در فرکانس پائین

در تحقیقی در سال ۲۰۱۷ اوه و همکاران [۱۵] در دانشکده مهندسی مکانیک، هوافضای مؤسسهی ملی علم و فناوری اولسان کره جنوبی از یک مدل جدید فرامواد صوتی برای جذب ارتعاشات و گسترش باند توقف در پهنای باند مشخص استفاده کردهاند. رسیدن به باند توقف در طول یک پهنای باند در فرکانس پائین مهچنان بهعنوان یک چالش عظیم در علم تلقی می شود. (با توجه به تمام تلاشها در زمینه فرامواد و دیگر تکنولوژی های نو ساخته)

در این مقاله، در مکانیزم ارائه شده برای رسیدن به باند توقف در فرکانس پائین، سعی بر سخت ر کردن شرایط ایجاد برش و راحت ر کردن دوران قطعه شده است.

Transient analysis



شکل ۱۳ مدل ارائه شده برای ایجاد گپ انرژی در پهنای باند (ادغام فراماده صفحهای کاهش دهنده دوران و فراماده تیری سفت کننده برشی منجر به فراماده دو منظوره شدهاست) [10].

طی مطالعات و محاسبات عددی صورت گرفته و آزمایشاتی که انجام شده است یک مکانیزم فیزیکی اساسی منتشر شده که تأثیر این فرامواد بر حفاظت از ارتعاشات در محدوده فرکانسی ۲۳۵ هرتز تا ۴۵۲۰ هرتز بررسی و تأیید شده است.



۴-۲- دفع ارتعاشات فرامواد صوتی با تشدید محلی سه بعدی توسط الاستومرهای مغناطیسی

در یک تحقیق در سال ۲۰۱۸ توسط ژو و همکارانش [۱۶] در مؤسسه علم و فناوری گواندونگ چین از الاستومرهای مگنتورئولوژیکال برای پوشش سه بعدی یک تشدیدگر محلی فرامواد صوتی استفاده شده است. بهعبارت دیگر فرمواد صوتی بهعنوان هسته و این الاستومر پوستهی آن می باشد.



شکل ۱۵ یک واحد فرامواد با هسته مکعبی و کروی(از خارج به داخل پوشش اپوکسی، فراماده الاستومر مگنتورئولوژیکال و تنگستن) [۱۶]

برای بررسی ساختار باند الاستیکی، نحوهی انتقال و مودهای ارتعاشی از روش المان محدود برای موج الاستیکی ورودی استفاده شده است. نتایج نشان داده که موقعیت مرکز و عرض گپ انرژی الاستیک این فرامواد میتواند با استفاده از میدان

مغناطیسی کنترل شود، همچنین میتوان با تغییر ضخامت الاستومر موقعیت مرکز و عرض گپ انرژی موردنظر را تنظیم کرد. از این روش میتوان برای طراحی جاذب ارتعاش الاستومرهای مگنتورئولوژیکال استفاده کرد.



عرض گپ انرژی [۱۶]

۴-۳- دفع ارتعاشات طولی در فرکانس پائین با استفاده از فرامواد صوتی

در سال ۲۰۱۸ لی و همکاران [۱۷] در دانشگاه آژو کره جنوبی برای دفع ارتعاشات طولی در محدوده فرکانسی پائین یک مدل علمی از فرامواد صوتی پیشنهاد کردهاست که با استفاده از روش عددی و تجربی مورد بررسی قرار گرفته است. یک آنالیز مشترک با استفاده از مدل علمی که شامل سیستم جذب ارتعاش مجزا و یک مجرای کوتاه است و به صورت متناوب تکرار شده اجرا شده است. روش ماتریس انتقال و قضیه بلاک-فلوکوت برای محاسبه فاز بلاک سلول واحد فرامواد صوتی انجام شده است. گپ انرژی پیش بینی شده از فاز بلاک محاسبه شده از فرکانس صفر شروع می شود و تا فرکانسی که دارای مقدار انتقال کمتر از یک می باشد ادامه پیدا می کند.



شکل ۱۷ فرامواد آکوستیک پیشنهادی [۱۷]

تأثیرات پارامترهای سلول واحد روی حداکثر مقدار فرکانس گپ انرژی و همچنین رابطه پراکندگی و منحنیهای چگالی جرم مؤثر فرامواد صوتی، فیزیک پایه آن را توضیح میدهد.

¹ MRE metamaterial magnetorheological elastomer:



می توان به جای یک سیستم ارتعاشی مجزا از یک سیستم ارتعاشی پیوسته در مدل های حقیقی استفاده کرد. آنالیز المان محدود و تست آزمایشگاهی برای اعتبار سنجی دفع ارتعاشات و عملکرد موردنظر انجام شده است. نتایج نشان داده استفاده از این فرامواد برای دفع ارتعاشات طولی بین دو قسمت مکانیکی مؤثر بوده است.

۴-۴- امواج الاستیک و گپ انرژی ارتعاشات در فرامواد صوتی دو بعدی

در سال ۲۰۱۸ ژانگ و همکاران [۱۸] در دانشگاه هوهای چین مدل جدیدی از فرامواد صوتی که وظیفه جذب ارتعاشات را بر عهده دارند، مورد بررسی قرار دادهاند.. فرامواد صوتی دو بعدی دارای سیستمهای جرم و فنر مجزا هستند که وظیفه جذب ارتعاشات وارد به جسم را دارند. برای مشخص کردن مکانیزم گپ انرژی در این فرامواد یک سیستم متقارن نامحدود مورد مطالعه قرار گرفته است. همچنین تأثیر عدم تقارن نامحدود مورد مطالعه ضریب سختی مطلق فنرهای متصل به سلولها بهوجود آمده است بررسی شده است. اگرچه این عدم تقارن نمی تواند باعث تغییر پهنای گپ انرژی شود ولی می تواند تغییر فاز سرعت و بهوجود آمدن مود برشی را از طریق محاسباتی ثابت کند.

برای مطالعه وضعیت ارتعاش و ویژگیهای آن در فرامواد صوتی، جرم مؤثر هر سلول واحد درنظر گرفته شده است. ویژگیهای جرم مؤثر در تشدیدگر یگانه و تشدیگرهای چندگانه که تحت تحریک هارمونیک قرار داده شدهاند مورد بررسی قرار گرفته است همچنین تأثیر تعداد سلولهای واحد، تعداد

تشدیدگرهای چندگانه در هر سلول واحد، درجهبندی تشدیدگرها در مدل فرامواد صوتی ایجاد شده برای جذب ارتعاشات توسط آنالیز پاسخ فرکانسی بررسی شدهاند.



۴-۵- ارتعاش تیرهای فرامواد با تشدید محلی دورهای

در مطالعهای در سال ۲۰۱۴ توسط نوح و همکاران [۱۹] در دانشگاه مریلند امریکا مدل خاصی از تیرهای متشکل از فرامواد مورد بررسی قرار گرفته است. در این مطالعه یک تیر فرامواد از کنارهم قراردادن تعدادی سلول متناوب که دارای تشدیدگر محلی هستند تشکیل شده و هر یک از این سلولها شامل یک ساختار پایه با تعداد متعددی حفره است که با یک پوستهی ویسکوالاستیک پر شده است که میتواند یک وزن کوچکی را تحمل کند (پایهی تشدیدگر محلی).



شکل ۲۰ تیر فرامواد آکوستیک با تشدیدگر محلی متناوب شامل تکیهگاه، جرم مرتعش و غشاء ویسکو الاستیک ⁽[۱۹]

این ساختار خاص از تیر متشکل از فرامواد دارای رفتار خاصی در فرکانسهای پائین در باند توقف میباشد. با استفاده از یک مدل المان محدود، مودهای ارتعاش، پاسخ فرکانسی و باند توقف اشکال مختلف تیر با تشدیدگرهای محلی را میتوان شبیه سازی کرد و مورد بررسی قرار داد.

مدل المان محدود ایجاد شده توسط مدل تجربی اعتبارسنجی می شود، بدین صورت که تیر از فرکانس ۱۰ هرتز تا ۵۰۰۰ هرتز مورد آزمایش قرار می گیرد. نتایج به دست آمده نشان

میدهد پاسخهای مدل المان محدود شباهت زیادی به آزمایشهای تجربی انجام شده دارد. نتایج برای سه مدل تیر ساده، تیر با حفره های متعدد و تیری با حفرههای پر شده با تشدیدگرهای محلی متناوب بهدست آمده است. تمام نتایج به این نکته تأکید دارند که تیرهای متشکل از فرامواد پتانسیل بسیار خوبی برای تضعیف ارتعاشات و افزایش باند توقف برای فرکانسهای پائین دارند. از نتایج بدست آمده میتوان به این نکته پی برد که تیرهای فرامواد در تضعیف و فیلتر کردن ارتعاشات در فرکانسهای پائین بسیار مؤثرتر از تیرهای ساده و متناوب با همان اندازه و وزن میباشند.

۵- کاربرد فرامواد در صنعت خودرو

با تغییر روند برقی شدن خودرو، تراز کلی نویز در خودرو به تدریج کاهش یافتهاست. مشکل صدای فرکانس پایین در خودرو که پیش از این نادیده گرفته می شد، روز به روز برجسته تر می شود. برای حل مشکل صدای فرکانس پایین خودرو، ترکیبی از آزمایشهای خودروی واقعی و تحلیل شبیهسازی انجام میشود. در طول تست، مشخص شده که صدای غرش با فرکانس نسبتاً پایین در خودرو وجود دارد که ناشی از تشعشع ساختاری صدای لرزش درب صندوق است. بنابراین، برای حل این مشکل، از یک فراماده آکوستیکی با وزن سبک و کوچک شده بر اساس اصل رزونانس محلى كريستال هاى فونونيك طراحى شدهاست. نتايج آزمایش تجربی خودرو نشان داده که پس از اتصال فراماده آکوستیک طراحی شده، تراز فشار صدای فرکانس پایین در جلو و عقب خودرو به ترتيب ۲ (A) dB و ۲٫۳ (A) dB كاهش يافته و کیفیت صدای نویز داخلی بهبود یافته است. حداکثر تراز فشار صدا در گوش راست راننده در خودرو در فرکانس ۳۵ هرتز اتفاق افتادهاست. علاوه بر آن، راننده و سرنشینان احساس کردهاند که صدای غرش نسبتاً واضحی در خودرو وجود دارد و از طریق فیلتر سیگنالهای جمع آوری شده، تأیید شده که صدا با فرکانس ۳۵ هرتز علت اصلی تولید نویز فرکانس پایین است. از طریق تحلیل شبیهسازی المان محدود فراموادی طراحی و تحلیل شده که با استفاده از آن میتوان نویز در فرکانس ۳۵ هرتز ناشی از لرزش ورقه فلزی درب صندوق را کاهش داد [۲۰].

دیری و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۲ با استفاده از فرامواد میزان کاهش تراز صوت مافلر یک خودروی تجاری را مورد بررسی قرار دادهاند که این بررسی شامل شبیه سازی و تحلیل عددی در نرمافزار کامسول و اعتبارسنجی آن به روش تجربی توسط یک نمونه پرینت سه بعدی فراماده است. طبق این مطالعه

یک مانع مهم برای استفاده عملی از فرامواد صوتی، نیاز به استراتژیهای مدلسازی کم هزینه و کارآمد در مرحله طراحی است. نتایج نشان داده با بکارگیری فرامواد درون مافلر اگزوز یک خودرو افت انتقال صوت ۴۰ دسیبل در فرکانس ۱۵۰۰ هرتز قابل دستیابی است همچنین این تحقیق نشان داده است که فرامواد آکوستیک را می توان در تنظیمات عملی، مانند صدا خفه کن خودرو، برای بهبود عملکرد کلی کاهش صدا استفاده کرد. نتایج تجربی و عددی و مقایسه افت انتقال برای طراحیهای مختلف در شکل ۲۱ قابل مشاهده است. مدل تحلیلی توصیف شده پتانسیل ابزارهای طراحی کم هزینه مرتبط صنعتی را نشان می دهد [۲۱].





شکل ۲۱ الف مقایسه نتایج تجربی افت انتقال صوت برای سایلنسر خالی (آبی)، استوانه سخت (قرمز)، استوانه متخلخل (زرد)، استوانه طراحی شده برای کاهش نویز فرامواد (بنفش) ب مقایسه نتایج عددی افت انتقال صوت برای سایلنسر خالی (آبی)، استوانه سخت (قرمز)، استوانه متخلخل (زرد)، استوانه فرامواد (بنفش) [11]

در سال ۲۰۲۲ ابراهیمی نژاد و همکاران [۲۲] تاثیر محل ورودی و خروجی به مافلر، هندسه و طرح سوراخهای صفحات متخلخل به شکل فرامواد داخل مافلر را بر میزان افت انتقال صوت مافلرهای یک و دو محفظهای مورد بررسی قرار دادند. در این مطالعه ابتدا با ثابت نگه داشتن پارامتر طرح و اندازه سوراخ و محل ورودی تاثیر موقعیت خروجی مافلر بر افت انتقال بررسی شده سپس تاثیر موقعیت ورودی با در نظر گرفتن طرح و اندازه سوراخ، مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج نشان داده در حالت تک محفظه و سوراخ دایرهای ۲۵٪، در باند گستردهای از فرکانس نشريه مهندسي مكانيك

۷- مراجع

- [1] Sachan, M., and Majetich, S., "DARPA Meta-Materials Program Report", May, (2005).
- [2] Liu, S., "DARPA Meta-Materials Program Report", May, (2005).
- [3] Pendry, J. B., "Negative refraction makes a perfect lens", *Phys. Rev. Lett.*, Vol. 85, No. 18, pp. 3966, (2000).
- [4] Pendry, J. B., "Negative refraction", *Contemp. Phys.*, Vol. 45, No. 3, pp. 191–202, (2004).
- [5] Tanaka, T., Ishikawa, A., and Kawata, S., "Unattenuated light transmission through the interface between two materials with different indices of refraction using magnetic metamaterials", *Phys. Rev. B*, Vol. 73, No. 12, pp. 125423, (2006).
- [6] Tanaka, T., "Plasmonic metamaterials produced by two-photon-induced photoreduction technique", J. Laser Micro/Nanoengineering, Vol. 3, No. 3, pp. 152–156, (2008).
- [7] Li, J., and Chan, C. T., "Double-negative acoustic metamaterial", *Phys. Rev. E*, Vol. 70, No. 5, pp. 55602, (2004).
- [8] Fang, X., Chuang, K.C., Jin, X. and Huang, Z., 2018. "Band-gap properties of elastic metamaterials with inerter-based dynamic vibration absorbers", *J. Applied Mechanics*, Vol. 85, No. 7, p.071010.
- [9] Sun, H., Du, X., and Pai, P. F., "Theory of metamaterial beams for broadband vibration absorption", *J. Intell. Mater. Syst. Struct.*, Vol. 21, No. 11, pp. 1085–1101, (2010).
- [10] Zhu, R., Liu, X. N., Hu, G. K., Sun, C. T., and Huang, G. L., "A chiral elastic metamaterial beam for broadband vibration suppression", *J. Sound Vib.*, Vol. 333, No. 10, pp. 2759–2773, (2014).
- [11] E. D. Nobrega, F. Gautier, A. Pelat, and J. M. C. Dos Santos, "Vibration band gaps for elastic metamaterial rods using wave finite element method," *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 79, pp. 192–202, (2016).
- [12] Li, S., Dou, Y., Chen, T., Wan, Z., Huang, J., Li, B. and Zhang, F.,, "Evidence for complete lowfrequency vibration band gaps in a thick elastic steel metamaterial plate", *Mod. Phys. Lett. B*, Vol. 33, No. 4, (2019).
- [13] He J.-H., and Huang, H.-H., "Complete vibrational bandgap in thin elastic metamaterial plates with periodically slot-embedded local resonators", *Arch. Appl. Mech.*, Vol. 88, No. 8, pp. 1263–1274, (2018).

افت انتقال ۵۸ دسیبل و در سوراخ مستطیلی ۷۵٪، ۶۷ دسیبل است همچنین برای مافلر دو محفظه میزان افت انتقال برابر با ۸۸ دسیبل در بازه گسترده تری از فرکانس است. تغییر محل ورودی و خروجی مافلر نیز در افت انتقال تاثیر گذار است و در کاربردهایی که حجمی محدود برای بکارگیری مافلر در دسترس است محاسبات مربوطه بایستی انجام گیرد.

۶- نتیجه گیری

در این مقاله تحقیقات پیشین مرتبط با موضوع فرامواد آکوستیکی و الاستیکی مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج این بررسی نشان میدهد که اساساً در پژوهشهای پیشین، تأثیر و کاربرد این مواد در سیستمهای مختلف مورد توجه قرار گرفته است. همچنین می توان نتیجه گرفت با استفاده از فرامواد آکوستیکی یعنی مواد مصنوعی ساخته شده از سلولهای واحد شامل ارتعاش کنندههای محلی با ابعادی کوچکتر از طول امواج صوتی مورد نظر می توان دامنه امواج صوتی را در بازه فرکانسی ۱۰ تا ۵۰۰۰ هرتز بصورت مؤثر کاهش داد همچنین تحقیقات نشان داده در حوزه خودرو با استفاده از فرامواد می توان تراز فشار صدا در فرکانس ۳۵ هرتز ناشی از درب صندوق عقب را حداکثر ۲/۳ دسیبل کاهش داد. با افزایش درجات آزادی سلولها و یا افزایش دمیینگ آنها میتوان گپ انرژی را افزایش داد. طبق نتایج می توان گفت با استفاده از الاستومرهای مگنتور ئولوژیکال برای پوشش سه بعدی یک تشدیدگر محلی می توان فراموادی برای کاهش تراز صوت ساخت. برای طراحی فراماده از روشهای عددی و تجربی در کنار هم استفاده می شود. در دهه اخیر، تلاشهایی جهت افزایش کاربرد این مواد انجام شده است و نویسندگان در مقالات خود کاربردهای متنوعی برای بهبود مسائل آکوستیکی مختلف مانند کنترل صدا زیر آب، جاذب یا عایق صدا در هوا، لرزش ساختاری و کنترل ضربه بهره بردهاند. همچنین از فراماده در کاهش دمپ تیرها نیز استفاده شدهاست. کاربرد و طراحی فرامواد آکوستیکی مناسب با نیاز مسئله زمینه مناسبی برای کارهای آتی است. اکثر نویسندگان از این مواد در زمینههای متفاوت همچون میرایی، جذب، کنترل و کاهش نویز استفاده کردهاند، از سویی دیگر محققان پیشبینیهایی نیز از آینده این مواد در مطالعه خود ارائه دادهاند. با توجه به روند افزایش تحقیق در این زمینه پیشبینی می شود کاربرد فرامواد و طراحی های نوین ارتعاش کننده های محلی با توجه به نیاز صنعت برای کاهش نویز و ارتعاشات در صنعتهای مختلف ادامه خواهد داشت.

- [19] Nouh, M., Aldraihem, O., and Baz, A., "Vibration characteristics of metamaterial beams with periodic local resonances", *J. Vib. Acoust.*, Vol. 136, No. 6, pp. 061012, (2014).
- [20] Liao, Y., Huang, H., Chang, G., Luo, D., Xu, C., Wu, Y., Tang, J., "Research on low-frequency noise control of automobiles based on acoustic metamaterial", *Materials*, Vol. 15, pp. 3261, (2022).
- [21] Deery, D., Flanagan, L., O'Brien, G., Rice, HJ., Kennedy, J., "Efficient modelling of acoustic metamaterials for the performance enhancement of an automotive silencer", *Acoustics*, Vol. 4(2), pp. 329-344, (2022).
- [22] Ebrahimi-Nejad, S., Rahimi, D., Kheybari, M., Majidi-Jirandehi, AA., "Effects of inlet-outlet positioning, muffler geometry, and baffle design on vehicle muffler performance for desired sound transmission loss", Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, March (2022).

- [14] Peng H., and Frank Pai, P., "Acoustic metamaterial plates for elastic wave absorption and structural vibration suppression", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 89, pp. 350–361, (2014).
- [15] Oh, J. H., Qi, S., Kim, Y. Y., and Assouar, B., "Elastic Metamaterial Insulator for Broadband Low-Frequency Flexural Vibration Shielding", *Phys. Rev. Appl.*, Vol. 8, No. 5, (2017).
- [16] Xu, Z., Tong, J., and Wu, F., "Magnetorheological elastomer vibration isolation of tunable threedimensional locally resonant acoustic metamaterial", *Solid State Commun.*, Vol. 271, pp. 51–55, (2018).
- [17] Lee, S., Ahn, C. H., and Lee, J. W., "Vibro-acoustic metamaterial for longitudinal vibration suppression in a low frequency range", *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 144, pp. 223–234, (2018).
- [18] An, X., Fan, H., and Zhang, C., "Elastic wave and vibration bandgaps in two-dimensional acoustic metamaterials with resonators and disorders", *Wave Motion*, Vol. 80, pp. 69–81, (2018).

ISSN: 160-9719 DOI: 10.30506/MMEP.2022.557979.2034 نشریه مهندسی مکانیک نشریه علمی انجمن مهندسان مکانیک ایران



بررسی عوامل تأثیرگذار بر استحکام قطعات ساخته شده توسط چاپگرهای سه بعدی FFF

چکیده: ساخت افزودنی مبتنی بر اکستروژن یک روش تولید نوظهور است که امروزه بسیار مورد توجه قرار گرفته و اساس کار چاپگرهای سه بعدی FFF است. در این روش، پلیمر ذوب شده از طریق یک نازل به صورت لایه به لایه روی هم قرار می گیرد تا یک جسم سه بعدی ایجاد شود. به دلیل انجماد سریع لایه ها ممکن است فضاها و حفره هایی بین لایه ها ایجاد شود که این فضاهای خالی منجر به کاهش خواص مکانیکی از جمله استحکام قطعات می شوند. از آن جا که پیش بینی و بهبود خواص مکانیکی از چالش های این روش تولید است، هدف از این مطالعه، بررسی عوامل موثر بر استحکام قطعات تولید شده توسط FFF است. از جمله عوامل تأثیرگذار میتوان به دمای نازل، درصد پر شدن، راستای نمونه، زاویه رسوب گذاری رشته ها، ضخامت لایه و قطر نازل اشاره کرد. طبق نتایج پژوهش های پیشین میتوان گفت که افزایش دمای نازل، درصد پر شدن و قطر نازل و کاهش ضخامت لایه منجر به افزایش سطح تماس رشته های ذوب شده و همچنین کاهش فضاهای خالی بین رشته ها میشود و بدین ترتیب استحکام قطعات تولید شده بهبود مییابد. هم چنین، استفاده از زاویه رسوب گذاری هم جهت با محور کشش میتواند تا حد زیادی استحکام قطعات را افزایش دهد. **محمدرضا پوربافرانی** دانشجوی کارشناسی ارشد

روح اله عزیزی تفتی* استادیار، دانشکده مهندسی مکانیک، دانشگاه یزد، یزد

مقاله مروری دریافت: ۱۴۰۱/۰۴/۲۶ پذیرش: ۱۴۰۱/۰۶/۱۳

واژه های راهنما: استحکام، ساخت افزودنی مبتنی بر اکستروژن، چاپ سهبعدی، پارامترهای چاپ، ساخت رشته ذوب شده

Mohammad Reza Pourbafrani MSc Student

Roohallah Azizi Tafti* Assistant Professor, Faculty of Mechanical Engineering Yazd University, Yaz

Investigating the factors affecting the strength of parts produced by FFF 3D printers

Abstract: Nowadays, extrusion-based additive manufacturing is an emerging manufacturing method that is receiving much attention and is the basis of FFF 3D printers. In this method, molten polymer is deposited layer by layer through a nozzle to create a three-dimensional object. Due to the rapid freezing of the layers, small gap and cavities may be created between the layers and lead to a decrease in the mechanical properties, including the strength of the parts. Since predicting and improving the mechanical properties is one of the challenges of this production method, the purpose of this study is to investigate the factors affecting the strength of parts produced by FFF. Investigation of the previous studies shows that the influencing factors are the nozzle temperature, filling percentage, sample alignment, filament deposition angle, layer thickness and nozzle diameter. Furthermore, it is concluded that increasing the nozzle temperature, filling percentage, and nozzle diameter and decreasing the layer thickness improve the strength of the produced parts. This is due to an increase in the contact surface of the deposition angle in the tension axis of the part can greatly increase its strength.

Keywords: Strength, Extrusion-based Additive Manufacturing, 3D Printing, Printing Parameters, Fused Filament Fabrication

سال سی و یکم، شماره سوم، مرداد و شهریور ۱۴۰۱

۱– مقدمه

ساخت افزودنی یا چاپ سهبعدی یک فناوری جدید است که از رسوب لایه به لایه مواد برای ساخت قطعات بر اساس مدل طراحی شده به کمک رایانه استفاده می کند. در این روش، مدل رایانهای به تعدادی مقطع دوبعدی تفکیک شده و دادههای حاصل به چاپگر انتقال داده می شود. گیبسون و همکاران ساخت افزودنی را به چند دسته طبقهبندی کردند که عبارتند از همجوشی بستر پودر ۱ پلیمریزاسیون ۲ اکستروژن مواد ۳ جت مواد ۲ رسوب مستقیم انرژی^۵ و جت بایندر ۲ [۱]. در میان روش های ساخت افزودنی، ساخت رشته ذوب شده ۲ (FFF) از دسته ی اکستروژن مواد، بیش ترین توجه، توسعه و نوآوری را به دلیل هزینه کم تجهیزات و عملکرد ساده در چند دهه اخیر به خود جلب کرده است [۲].

FFF با علامت تجاری مدلسازی رسوب ذوبشده^ (FDM)، در سال ۱۹۸۸ توسط شرکت استراتاسیس (Stratasys) ابداع شد. در این روش تولید، بعد از تبدیل مدل رایانهای به کدهای حرکتی توسط نرمافزار، رشتهی پلیمری در یک نازل تا دمایی بالاتر از دمای ذوب حرارت داده می شود. سیس، با حرکت کنترل عددی شدهی نازل در دو جهت طولی و عرضی، پلیمر ذوبشده روی بستر چاپ رسوب داده شده و یک لایه ایجاد می گردد. پس از تکمیل هر لایه، بستر چاپ به اندازهی ارتفاع یک لایه در جهت عمودی حرکت کرده و شرایط برای رسوب لایه بعدی فراهم می شود (شکل ۱). در نهایت، با روی هم قرار گرفتن این لایهها، قطعه ایجاد می شود [۳]. در این روش، معمولا از یلیمرهای ترمویلاستیک مانند یلیلاکتیکاسید^۹ (PLA) و اكريلونيتريل بوتادين استايرن (ABS) استفاده می شود [۱]. در سالهای اخیر، به دلیل صرفه اقتصادی و دقت مطلوب FFF، استفاده از این روش تولید برای ساخت بسیاری از محصولات رواج یافته است. از کاربردهای FFF می توان به ساخت مدلهای ریخته گری [۴]، ساخت نمونههای اولیه محصولات [۱]، تولید داربستهای زیستی در زمینه مهندسی بافت [۵] و ساخت ایمیلنتهای پزشکی [۶] اشاره کرد.



شكل ۱ فرآيند ساخت رشته ذوبشده (FFF) [۳]

عدم هم یوشانی لایه ها و ایجاد فضاهای خالی بین لایه ای از چالشهای روش تولید FFF است که از یک سو، باعث کاهش خواص مکانیکی قطعات چاپشده می شود و از سوی دیگر، پیشبینی خواص مکانیکی را مشکلتر میکند [۷]. بنلی و همکاران [۸] با استفاده از روشهای عددی و تجربی عوامل موثر بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده به روش FFF را بررسی کردند. طبق نتایج آنها، راستای نمونه و جهت گیری رسوب رشتهها از عوامل موثر بر خواص مكانيكي قطعات چاپشده هستند. کوزنتسف و همکاران [۹] تأثیر دمای نازل، سرعت چاپ و سرعت خنکشدن را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده به روش FFF بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که دمای نازل مهمترین پارامتر تأثیرگذار بر استحکام قطعات چاپشده است. میزان اثر گذاری راستای نمونه، ارتفاع لایه، درصد پرشدن بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده توسط راجو و همکاران [۱۰] مطالعه شد. آنها در این بررسی از طراحی آزمایش تاگوچی و آزمونهای تجربی استفاده کردند. یافتههای آنها نشان داد که ارتفاع لایه بیش از سایر پارامترها بر خواص مكانيكي قطعات تأثير گذار است. در اين مطالعه تلاش شده است یارامترهای موثر بر استحکام قطعات چاپشده به روش FFF بررسی شوند. بر اساس نتایج ارائه شده در پژوهشهای پیشین، پارامترهایی مانند دمای نازل [۹]، درصد پرشدن [۱۰]، ارتفاع لايه [10]، قطر نازل [11]، زاويه رسوب رشتهها [٨] و زاويه

- ¹ Powder Bed Fusion
- ² Polymerization
- ³ Material Extrusion
- ⁴ Material Jetting
- ⁵ Directed Energy Deposition
- ⁶ Binder Jetting
- ⁷ Fused Filament Fabrication
- ⁸ Fused Deposition Modeling
- ⁹ Polylactic Acid
- ¹ Acrylonitrile Butadiene Styrene⁰

ساخت قطعه [۸] از عوامل تأثیر گذار بر خواص مکانیکی از جمله استحکام قطعات هستند.

۲- عوامل تأثیرگذار بر استحکام قطعات ساختهشده در فرآیند FFF ۲-۱- دمای نازل

منظور از دمای نازل دمای پلیمر ذوب شده در هنگام اکستروژن است که معمولا بالاتر از دمای ذوب آن پلیمر در نظر گرفته می شود. اگر دمای نازل پایین باشد، چسبندگی لایه ها به یکدیگر و استحکام قطعه پایین خواهد بود. دمای نازل خیلی بالا سبب ریزش پلیمر ذوب شده و چسبندگی نامطلوب لایه ها خواهد شد. بنابراین، در مواد اولیه مختلفی که در پرینترهای سهبعدی استفاده می شوند، یافتن دمای مناسب برای نازل جهت خروج پلیمر ذوب شده از آن اهمیت بسیار بالایی دارد. در بیش تر پلیمر های مورد استفاده در پرینترهای سهبعدی، بازه ی مناسب برای دمای ذوب از طرف شرکت سازنده پیشنهاد می شود [۱۲]. باکیر و همکاران [۱۳] با مطالعه عوامل تأثیر گذار بر استحکام

بعیر و سادران (۲۱۱ با بساعی موسل عیر عار بر ساعت کششی نهایی قطعات پلیاتیلن ترفتالات (PET) در فرآیند ساخت افزودنی دریافتند که با افزایش دمای نازل، استحکام کششی نهایی قطعات ساخته شده افزایش مییابد. در این مطالعه، آنها نمونه ها را بر اساس استاندارد آزمون کشش MASTM محمل و پا کردند. آنها استحکام کششی نهایی را در دماهای نازل ۲۰۰۵۲، ۲۰°۲۵، ۲۵°۲۵ و ۲°۲۶۰ بررسی دماهای نازل ۲۰°۲۲، ۵°۲۲، ۲۵°۲۵ و ۲°۲۶۰ بررسی افزایش دما، استحکام کششی نهایی نیز افزایش مییابد. آنها دماهای بالاتر از ۲°۲۶۰ را نیز مطالعه نمودند که در این دماها دماهای بالاتر از ۲۰°۲۶ را نیز مطالعه نمودند که در این دماها بلیمر دچار تخریب شد. با توجه به نتایج آزمون کشش، آنها دمای ۲۶۰۰ را به عنوان بهترین دما برای چاپ سه بعدی PET

جاتی و همکاران [۱۴] دمای نازل را به عنوان پارامتر موثر بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده توسط فرآیند ساخت افزودنی مبتنی بر اکستروژن در نظر گرفتند. در این مطالعه، آنها اثر پنج دمای نازل C[°] ۱۹۰، C[°] ۲۰۰، C[°] ۲۱۰، C[°] ۲۲۰ و C[°] ۲۳۰ را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس PLA بررسی کردند. نتایج مطالعه آنها نشان داد که با افزایش دما، استحکام کششی نهایی افزایش مییابد (شکل ۴).

آنها نتیجه گرفتند که افزایش دمای اکستروژن منجر به کاهش ویسکوزیته ماده می گردد که این امر باعث می شود تا سطح مقطع رشته اکسترودشده از شکل دایرهای دور شده و بیضی شکل گردد. این امر به نوعی باعث افزایش سطح تماس بین رشتهها در لایههای متوالی شده و استحکام قطعه را افزایش می دهد.



شکل ۲ تنش بر حسب کرنش در دماهای مختلف نازل [۱۳]



از جنس PET [۱۳]



¹ Polyethylene Terephthalate

برایان وو و همکاران [۱۵] تأثیر سه دمای ناازل C°۲۱۵، C°۲۰۰ و C°۲۴۵ را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از رشتههای پلیپروپیلن^۱(PP) را بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش دمای نازل، استحکام قطعات چاپشده افزایش مییابد (شکل ۵).



جنس PP [۱۵]

در پژوهش علافقانی و همکاران [۱۶] پارامترهای موثر بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس PLA بررسی شد. آنها خواص مکانیکی نمونهها را در دماهای نازل C°۱۷۵۰ ۵۰ ما خواص ۱۸۵° و ۲۰۵۰ بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش دمای نازل، مدول یانگ، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی افزایش مییابد (شکل۶).



چارلون و همکاران [۱۷] با بررسی تأثیر دمای نازل بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس PP دریافتند که با افزایش دمای نازل، استحکام پیوند بین رشتهها افزایش مییابد که در نتیجه، باعث افزایش استحکام کششی نهایی قطعه می گردد. آنها در مطالعه خود برای بررسی این موضوع نمونههایی را که در دماهای 2°۲۰، 2°۲۵ و 2°۲۰ چاپشده بودند با استفاده از میکروسکوپ الکترونی روبشی^۲ (SEM) بررسی کردند. تصاویر SEM نشان میدهد که با افزایش دمای نازل، تخلخل بین لایهها کاهش مییابد که این موضوع باعث افزایش چسبندگی بین رشتهها شده و در نهایت باعث افزایش استحکام



شکل ۷ تصویر میکروسکوپ الکترونی روبشی⁽(SEM) مربوط به نمونه چاپشده از جنس PP در دمای نازل [°] ۵۷۵ [۱۷]



شکل ۸ تصویر SEM مربوط به نمونه چاپشده از جنس PP در دمای نازل C° ۱۸۰ [۱۷]

وانگ و همکاران [۱۸] در سال ۲۰۲۰ در مطالعهی خود بر روی فرآیند چاپ سهبعدی پلیاتراترکتون^۳(PEEK)، کامپوزیت

¹ Polypropylene

² Scanning Electron Microscope

³ Polyether Etherketone

پلیاتراترکتون و الیاف شیشه (GF/PEEK) و همچنین کامپوزیت پلیاتراترکتون و فیبرکربن^۲ (CF/PEEK)، تأثیر دمای نازل را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از این مواد بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش دمای نازل، برای هر سه ماده مورد نظر، خواص مکانیکی از جمله استحکام کششی نهایی افزایش مییابد (شکل ۹). همچنین، برای بیان علت این پدیده، آنها نمونهها را با استفاده از SEM بررسی کردند (شکلهای ۱۰ و ۱۱). تصاویر SEM نشان میدهد که با افزایش دمای نازل، لایهها با یکدیگر پیوند بهتری برقرار کرده و مرزهای بین لایهای که محل تمرکز تنش هستند کاهش مییابند.



شکل ۹ تأثیر دمای نازل بر استحکام کششی نهایی CF/PEEK ،PEEK و GF/PEEK [۱۸] GF/PEEK



شکل ۱۰ تصویر SEM نمونه چاپشده PEEK در دمای نازل ۲۰۰°C [۱۸]



شکل ۱۱ SEM نمونه چاپشده PEEK در دمای نازل ۲۴۰۰°C

عسگری و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۱ تأثیر چهار پارامتر دمای نازل، جهتگیری رسوب رشتهها، الگوی پرشدن و ارتفاع لایه را برخواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس پلیاکسیمتیلن^۳ (POM) بررسی کردند. در این مطالعه از طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است و نتایج نشان داد که دمای نازل پس از جهتگیری رسوب رشتهها مهم ترین عامل اثرگذار بر استحکام نهایی کشش قطعات چاپشده است. همچنین نتایج آنها نشان داد که با افزایش دمای نازل استحکام نهایی کششی قطعات چاپشده افزایش می یابد.

۲-۲- جهتگیری رسوب رشتهها

جهت گیری رسوب رشته ها زاویه ی مسیر چاپ نسبت به محور بار گذاری نمونه است. باکیر و همکاران [۱۳] در مطالعه خود تأثیر سه جهت رسوب ^۰ (موازی)، ^۴۵۵ (مورب) و ^۹۰۰ (عمود) را بر استحکام نمونه های چاپ شده از جنس PET بررسی کردند (شکل ۱۲).



- ¹ Polyether Etherketone/ Glass Fiber
- ² Polyether Etherketone/ Carbon Fiber
- ³ Polyoxymethylene

سال سی و یکم، شماره سوم، مرداد و شهریور ۱۴۰۱

(a) (b) (c)

شکل ۱۴ سطح مقطع نمونهها پس از شکست با جهت گیری رشته مختلف (a جهت گیری رشته عمود، b مورب و c موازی) [۱۳]

نتایج مشابهی را زیمیان و همکاران [۱۹] در سال ۲۰۱۵ گزارش نمودند که برای بررسی تأثیر جهتگیری رسوب رشتهها از چهار زاویه °۰، ۴۵°، °۹۰ و ۴۵°/۴۵– (متقاطع) برای چاپ قطعاتی از جنس ABS استفاده کردند. آنها بیشترین استحکام کششی نهایی (۲۵ مگاپاسکال) را برای نمونههای با زاویه رشته °۰ مشاهده نمودند. با توجه به این که در این نمونهها، رشتهها هم جهت با محور کشش بودند در حین آزمون کشش، رشتهها کشیده شدند تا در نهایت، شکست رخ داد. اما در نمونههای دیگر، تمرکز تنش در فاصله بین لایهها باعث کاهش استحکام قطعات گردید.

نداگوندی و همکاران [۲۰] به وسیله آزمون کشش و با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی با در نظر گرفتن سه سطح ۰۰، ۳۰۰ و ۶۰۰ برای زاویه رسوب رشتههای ذوبشده از جنس ABS، استحکام کششی نهایی قطعات را بررسی کردند. آنها نیز به نتایجی مشابه با دو پژوهش قبلی رسیدند.

عسگری و همکاران [۱۲] در سال ۲۰۲۱ تأثیر چهار پارامتر دمای نازل، جهتگیری رسوب رشتهها، الگوی پرشدن و ارتفاع لایه را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس POM بررسی کردند. آنها در این مطالعه از طراحی آزمایش تاگوچی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد که زاویه رسوب رشته مهم ترین عامل اثرگذار بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده است. در این مطالعه آنها سه زاویه رشته °۰/°۰۰، چاپشده است. در این مطالعه آنها سه زاویه رشته ۵۰/°۰۰، نهایی کشش در زاویه رشته °۰/°۹۰ بدست آمد. آنها دلیل این مسئله را هم جهت بودن لایهها با نیروی کششی اعمال شده بیان کردند.

۲-۳- راستای نمونه

منظور از راستای نمونه امتداد آن نسبت به بستر چاپ است . باکیر و همکاران [۱۳] تأثیر دو راستای عمودی و افقی را بر خواص مکانیکی نمونهها بررسی کردند (شکل ۱۵). نتایج آزمون کشش نشان داد که نمونهها با جهتگیری موازی نسبت به دیگر جهتگیریها نه تنها از استحکام کششی نهایی بیشتری برخوردار هستند (شکل ۱۳) بلکه افزایش طول بالاتری را تا شکست تجربه میکنند به طوریکه افزایش طول میانگین ۱۹۹ درصد برای آنها مشاهده شد (جدول ۱). در حالی که در جهتگیری مورب، افزایش طول میانگین بسیار کمتری برابر با ۷/۹ درصد دیده شد و جهتگیری عمود افزایش طول میانگین ۳/۳ درصد را نشان داد. این در حالی است که استحکام کششی نهایی و مدول الاستیک جهتگیریهای عمود و مورب نزدیک به هم و کمتر از جهتگیری موازی است.



شکل ۱۳ تأثیر جهتگیری رسوب رشتههای PET بر روی نمودار تنش-کرنش [۱۳]

PET بر خواص	رسوب رشتههای	جهتگیری	۱ تأثير	جدول
	قطعات [١٣]	مکانیکے		

Raster orientation	UTS (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Perpendicular	33.3±2.4	1.44±0.8	3.3±1.2
Diagonal	35.8±1.0	1.41±1.0	7.9±5.3
Parallel	47.7±0.2	1.73±0.2	199±1.2

آنها با بررسی محل شکست نمونهها دریافتند که نمونهها با جهت گیری های مورب و عمود در سطح مشترک بین رشته ها دچار شکست شدند اما نمونه با جهت گیری موازی پس از تجربه ی یک کاهش سطح مقطع قابل توجه شکسته است (شکل۱۴).

نشریه مهندسی مکانیک



شکل ۱۵ جهت گیری نمونه افقی و عمودی با زاویه رشته ^۰ • [۱۳]

جدول ۲ خواص مکانیکی نمونههای چاپشده توسط آنها در دو راستای افقی و عمودی را نشان می دهد. نمونهها با راستای افقی دارای میانگین استحکام کششی نهایی ۴۷/۷ مگاپاسکال بودند، در حالی که میانگین استحکام کششی نهایی نمونههای عمودی کمتر از نصف این مقدار (۲۳/۵ مگاپاسکال) بود. تفاوت قابل توجهی نیز برای ازدیاد طول در هنگام شکست مشاهده شد. به صورتی که نمونههای عمودی در افزایش طول میانگین بسیار کم ۱/۴ درصد دچار شکست شدند در حالی که نمونهها با راستای افقی افزایش طول میانگین ۱۸۹/۹ درصدی را تجربه کردند.

جدول ۲ خواص مکانیکی با راستای نمونه افقی (و عمودی با دمای نازل C° ۲۰ و ۸۰ درصد پرشدن [۱۳]

Specimen orientation	UTS (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation at break (%)
Horizontal (with parallel raster)	47.7±0.2	1.73±0.2	198.9±11.8
Vertical	23.5±1.4	1.67±0.5	1.4±0.1

آنها با استفاده از میکروسکوپ نوری از سطح مقطع شکست نمونهها بعد از آزمون کشش عکسبرداری کردند (شکلهای ۱۶ و ۱۷). همان طور که شکل ۱۶ نشان میدهد نمونههایی که در راستای عمودی چاپ شدند در محل اتصال رشتهها شکستهاند و تغییرشکل قابل توجهی در شکل ظاهری رشتهها دیده نمیشود. این در حالی است که رشتههای نمونههایی که در راستای افقی چاپ شدند در هنگام شکست تغییرشکل زیادی یافتهاند (شکل .)



شکل ۱۶ سطح مقطع شکست نمونهی چاپشده در راستای عمودی زیر میکروسکوپ نوری [۱۳]



شکل ۱۷ سطح مقطع شکست نمونهی چاپشده در راستای افقی زیر میکروسکوپ نوری [۱۳]

راستای نمونه یکی از پارامترهای بررسی شده توسط حکمت و همکاران [۲۱] است. در این بررسی که با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی انجام شد، راستای نمونه بیش ترین تأثیر گذاری را بر استحکام قطعات چاپ شده از جنس PLA داشته است. آن ها دو حالت مسطح و روی لبه را در نظر گرفتند (شکل ۱۸) و با انجام آزمون کشش دریافتند که قطعاتی که در حالت روی لبه چاپ شدند استحکام بیش تری نسبت به قطعات مسطح دارند (شکل ۱۹).



شکل ۱۸ نمونه های چاپ شده بهصورت مسطح (سمت چپ) و به صورت روی لبه (سمت راست) [۲۱]









ویسنت و همکاران [۲۲] با استفاده از طراحی آزمایش فاکتوریال کامل و انتخاب دو سطح برای درصد پرشدن نتیجه گرفتند که درصد پرشدن از عوامل تأثیرگذار بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس ABS است. آنها هم چنین دریافتند که با افزایش درصد پرشدن، استحکام کششی نهایی و سفتی قطعات چاپشده افزایش مییابد.

ملنکا و همکاران [۲۳] با استفاده از روش طراحی آزمایش فاکتوریال کامل، میزان اثرگذاری سه پارامتر راستای نمونه، ارتفاع لایه و درصد پرشدن را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از PLA بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که درصد پرشدن بیشترین تأثیر را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده دارد و با افزایش درصد پرشدن، استحکام کششی قطعات چاپشده افزایش مییابد. همچنین ارتفاع لایه و راستای نمونه به ترتیب در ردههای دوم و سوم از نظر میزان اثرگذاری قرار گرفتند.

علافقانی و همکاران [۱۶] در پژوهش خود تأثیر درصد پرشدن را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس PLA بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش درصد پرشدن، مدول الاستیک، استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی افزایش مییابد. آنها گزارش دادند که درصد پرشدن تأثیر بیشتری بر استحکام تسلیم و استحکام کششی نهایی دارد (شکل ۲۱).

حکمت و همکاران [۲۱] هفت پارامتر تأثیرگذار بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده از جنس PLA را با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی بررسی کردند. در این مطالعه، آنها سه



شکل ۱۹ مقایسهی استحکام نمونههای چاپشده به صورت روی لبه با نمونههای مسطح [۲۱]

۲-۴- درصد پرشدن

درصد پرشدن را می توان معیاری برای متخلخل بودن قطعه کار در نظر گرفت که با هم رابطهی عکس دارند به صورتی که با افزایش درصد پرشدن، تخلخل کاهش می یابد. باکیر و همکاران [۱۳] تأثیر درصد پرشدن را بر خواص مکانیکی نمونههای چاپ شده از جنس PET بررسی کردند. آنها در مطالعه خود نمونههایی را با پنج درصد پرشدن متفاوت چاپ کردند که جدول ۳ نتایج حاصل از آزمون کشش آنها را نشان می دهد. مشاهده می شود که با افزایش درصد پرشدن، استحکام کششی نهایی و مدول الاستیک افزایش می یابد. در عین حال، درصد پرشدن تأثیر مشخصی بر درصد افزایش طول در هنگام شکست نداشته است.

جدول ۳ خواص مکانیکی نمونههای PET با درصدهای پرشدن متفاوت [۱۳]

Infill ratio (%)	UTS (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Elongation at break (%)
20	14.2±3.2	0.7±0.03	6.9±0.5
40	16.2±2.7	0.7 ± 0.07	5.7±0.5
60	17.9 ± 1.1	0.8 ± 0.03	6.2±1.8
80	35.8±1.0	1.4 ± 0.10	5.6±1.5
100	45.3±1.0	1.7±0.17	7.2±1.2

جاتی و همکاران [۱۴] تأثیر درصد پرشدن را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس PLA بررسی کردند. آنها دریافتند که با افزایش درصد پرشدن، استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده افزایش مییابد (شکل۲۰). آنها این موضوع را این گونه توضیح دادند که درصد پرشدن بیش تر به این معنی

درصد پرشدن ۸۰، ۹۰ و ۱۰۰ را در نظر گرفتند. آنها دریافتند که با افزایش درصد پرشدن، استحکام قطعات افزایش مییابد (شکل ۲۲) و همچنین از بین پارامترهای بررسیشده، درصد پرشدن پس از راستای نمونه و قطر نازل سومین پارامتر تأثیرگذار بر استحکام قطعات چاپشده است.



شکل ۲۱ تأثیر درصد پرشدن بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس E) PLA مدول یانگ، Sy استحکام تسلیم و Ts استحکام کششی نهایی) [۱۶]



شکل ۲۲ تأثیر درصد پرشدن بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ شده از PLA [۲۱]

حیدری و همکاران [۲۴] در سال ۲۰۲۰ میزان اثرگذاری سه پارامتر درصد پرشدن، ارتفاع لایه و سرعت چاپ را بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده بررسی کردند. آنها در این مطالعه از طراحی آزمایش تاگوچی استفاده کردند. نتایج آنها نشان داد با افزایش درصد پرشدن وسرعت چاپ و هم چنین کاهش ضخامت لایهها استحکام کششی نهایی نمونههای چاپشده از جنس PLA افزایش مییابد.

رادوان و همکاران [۲۵] در سال ۲۰۱۹ تأثیر سه پارامتر درصد پرشدن، ارتفاع لایه و زاویه رسوب رشتهها را بر خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس ABS مطالعه کردند. در این مطالعه که از طراحی آزمایش تاگوچی استفاده شده است نتایج نشان که مهمترین عامل تاثیرگذار بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده درصد پرشدن است. نتایج آنها نشان داد که با افزایش درصد پرشدن استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده افزایش می یابد.

باپتیستا و همکارانش [۲۶] در سال ۲۰۲۰ تأثیر پارامترهای فرآیند FFF بر خواص مکانیکی داربستهای زیستی از جنس PLA را بررسی کردند. آنها داربستها را در سه درصد پرشدن ۳۰، ۵۰ و ۷۰ مورد مطالعه قرار دادند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش درصد پرشدن، استحکام فشاری داربستها افزایش مییابد اما تخلخل داربستها که برای رشد و تکثیر سلولی مفید است کاهش مییابد.

از دست و همکاران [۲۷] نیز با مطالعه با بررسی تخلخل داربستهای زیستی تولیدشده از جنس PLA نتایج مشابهی را گزارش کردند. ازدست و همکاران [۲۸] در سال ۲۰۲۱ با استفاده از طراحی آزمایش تاگوچی میزان اثرگذاری پارامترهای ضخامت لایه، زاویه رسوب رشتهها و درصد پرشدن را بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس PLA بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد درصد پرشدن موثرترین عامل بر روی استحکام ضربه قطعات چاپشده است و با افزایش درصد پرشدن، استحکام ضربه قطعات افزایش می یابد.

۲-۵- ارتفاع لایه

جاتی و همکارانش [۱۴] مشاهده کردند که با افزایش ارتفاع لایه، استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده از جنس PLA کاهش مییابد (شکل ۲۴).







شکل ۲۷ مقایسه تأثیر گذاری دمای بستر، دمای نازل، سرعت چاپ و ارتفاع لایه بر مدول الاستیک قطعات چاپشده از جنس ABS [۲۹]



خاتونی و همکاران [۳۰] برای مطالعه چگونگی تأثیرگذاری ارتفاع لایه بر استحکام قطعات چاپشده، قطعاتی از جنس PLA را با سه ضخامت ۰/۱، ۲/۰ و ۲/۰ میلیمتر چاپ کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش ارتفاع لایه، استحکام کششی نهایی قطعات کاهش مییابد (شکل ۲۹). همچنین، برای درک بهتر این موضوع، از نمونهها عکسهای SEM تهیه شد (شکل ۳۰ و ۳۱). با توجه به تصاویر SEM. با افزایش ارتفاع لایه، سطح تماس بین لایهها کاهش مییابد که این مسئله باعث کاهش چسبندگی بین لایهها و در نتیجه کاهش استحکام کششی نهایی میشود.

وانگ و همکاران [۱۸] تأثیر ارتفاع لایه را بر روی خواص مکانیکی قطعات چاپشده از جنس GF/PEEK ،PEEK و CF/PEEK بررسی کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش ارتفاع لایه، استحکام کششی نهایی قطعات کاهش مییابد (شکل ۳۲). با افزایش ارتفاع لایه، فاصله بین لایهها افزایش یافته است و تخلخل و حفرهها در بین لایهها افزایش مییابد که این امر باعث تمرکز تنش و همچنین کاهش چسبندگی بین لایهها میشود و به این ترتیب، استحکام قطعات چاپشده با افزایش ارتفاع لایه کاهش مییابد (شکلهای ۳۳ و ۳۴). قطعات چاپشده از جنس ABS را تخمین زدند و سپس نتایچ را با دادههای تجربی مقایسه کردند. نتایج آنها نشان داد که با افزایش ارتفاع لایه، خواص مکانیکی از جمله مدول الاستیک و استحکام کششی نهایی کاهش مییابد (شکل های ۲۵ و ۲۶). همچنین، آنها با بررسی اثر دمای نازل، دمای بستر و سرعت چاپ بر خواص مکانیکی و مقایسه آنها با تأثیر ارتفاع لایه دریافتند که ارتفاع لایه بیشترین تأثیرگذاری را بر روی خواص مکانیکی دارد (شکلهای ۲۷ و ۲۸).







PLA شکل ۳۰ تصویر SEM سطح مقطع نمونه چاپ شده از جنس PLA با ارتفاع لایه ۲/۲ میلیمتر [۳۰]



۰/۱ شکل SEM ۳۱ سطح مقطع نمونه از جنس PLA با ارتفاع لایه ۱/۱ میلیمتر [۳۰]





شکل ۳۳ تصویر SEM سطح نمونه با ارتفاع لایه ۰/۱ میلیمتر [۱۸]



شکل ۳۴ تصویر SEM سطح نمونه با ارتفاع لایه ۰/۲ میلیمتر [۱۸]

۲-۶- قطر نازل

قطر نازل یکی از پارامترهایی است که بر میزان مواد خارجشده از نازل تأثیرگذار است و بر همین اساس، تغییر قطر نازل ممکن است بر استحکام قطعات چاپشده نیز تأثیرگذار باشد.

ترییونو و همکاران [۱۱] تأثیر قطر نازل را بر چگالی و استحکام قطعات چاپشده بررسی کردند. آنها در مطالعهی خود از چهار نازل با قطرهای ۲/۳، ۴/۰، ۵/۰ و ۶/۰ میلیمتر، دمای بستر C^o ۶۰ و دمای نازل C^o ۲۲۰ برای چاپ رشتههایی از افزایش قطر نازل، چگالی و استحکام قطعات چاپشده افزایش افزایش قطر نازل، چگالی و استحکام قطعات چاپشده افزایش مییابد (شکل ۳۵ و ۳۶). برای بررسی بیشتر این موضوع از افزایش قطر نازل، فاصله بین رشتههای چاپشده کاهش مییابد و در نتیجه، باعث کاهش تخلخل و افزایش چگالی قطعات میشود. همچنین، با کاهش فضاهای خالی بین رشتههای ذوب شده، سطح تماس بین رشتهها افزایش مییابد که در نهایت منجر به افزایش استحکام کششی نهایی میشود (شکلهای ۳۷ و ۲۸). حکمت و همکاران [۲۱] در سال ۲۰۲۱ میزان اثرگذاری هفت پارامتر بر استحکام قطعات چاپشده را بررسی کردند. این پارامترها عبارتند از راستای نمونه، جهتگیری رسوب رشتهها، قطر نازل، درصد پرشدن، دمای نازل، تعداد پوسته و سرعت چاپ. در این بررسی، از روش طراحی آزمایش تاگوچی با تعداد ۱۸ آزمایش با هدف تعیین میزان تأثیرگذاری پارامترها بر استحکام قطعات چاپشده از جنس PLA، استفاده شد. نتایج آنها نشان داد که با افزایش قطر نازل، استحکام کششی نهایی قطعات افزایش مییابد (شکل ۳۹). همچنین، آنها دریافتند که از نظر میزان اثرگذاری، قطر نازل تأثیر قابل توجهی بر استحکام قطعات چاپشده دارد به گونهای که بعد از راستای نمونه در رده دوم پارامترهای تاثیرگذار قرار گرفت.



شکل ۳۹ تأثیر قطر نازل بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده از جنس PLA [۲۱]

خاتونی و همکاران [۳۰] برای بررسی تأثیر قطر نازل بر استحکام قطعات چاپ شده، نمونه هایی را با پنج قطر نازل ۲/۰، ۲/۰، ۴/۰، ۲/۴۵ و ۲/۵ میلی متر چاپ کردند. نتایج آزمون کشش نشان داد که با افزایش قطر نازل، استحکام کشش قطعات چاپ شده افزایش می یابد (شکل ۴۰).





شکل ۳۶ تأثیر قطر نازل بر استحکام کششی نهایی قطعات چاپ شده از جنس PLA در دمای بستر $^\circ$ ۶۰ و دمای نازل $^\circ$ ۲۲ [۱۱]



شکل ۳۷ تصویر SEM سطح نمونه با قطر نازل ۰/۳ میلیمتر در رشتههایی از جنس PLA [۱۱]



شکل ۳۸ تصویر SEM سطح نمونه با قطر نازل ۰/۶ میلیمتر در رشتههایی از جنس PLA [۱۱]

parameters: a review of current research and future prospects, *Adv. Manuf*, Vol. 3, No. 1, pp. 42–53, (2015).

[3] Zaman, U.K.U., Boesch, E., Siadat, A., Rivette, M., Baqai, A., Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's design of experiments, *Int J Adv Manuf Technol*, Vol. 101, pp. 1215–1226, (2019).

[4] Lee, C., Chua, C., Cheah, C., Tan, L., Feng, C., Rapid investment casting: direct and indirect approaches via fused deposition modelling, *Int. J. Adv. Manuf. Technol*, Vol. 23, pp. 93–101, (2004).

[5] Zhang, B., Seong, B., Nguyen, V., Byun, D., 3D printing of high-resolution PLA-based structures by hybrid electrohydrodynamic and fused deposition modeling techniques, *Journal of Micromechanics and Microengineering*, Vol. 26, No. 2, pp. 25015, (2016).

[6] Van Noort, R., The future of dental devices is digital, *Dental Materials*, Vol. 28, No. 1, pp. 3–12, (2012).

[7] Coogan, T.J., Kazmer, D.O., Healing simulation for bond strength prediction of FDM, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 23, No. 3, pp. 551–561, (2017).

[8] Bellini, A., Güçeri, S., Mechanical characterization of parts fabricated using fused deposition modeling, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 9, No. 4, pp. 252–264, (2003).

[9] Kuznetsov, V.E., Solonin, A.N., Tavitov, A., Urzhumtsev, O., and Vakulik, A., Increasing strength of FFF three-dimensional printed parts by influencing on temperature-related parameters of the process, *Prototyping Journal*, Vol. 26, No. 1, pp. 107–121, (2020).

[10] Raju, M., Gupta, M.K., Bhanot, N., Sharma, V., A hybrid PSO–BFO evolutionary algorithm for optimization of fused deposition modelling process parameters, *J Intell Manuf*, Vol. 30, No. 7, pp. 2743– 2758, (2019).

[11] Triyono, J., Sukanto, H., Saputra, R., Smaradhana, D., The effect of nozzle hole diameter of 3D printing on porosity and tensile strength parts using polylactic acid material, *Open Engineering*, Vol. 10, No. 1, pp. 762–768, (2020).

[12] Asgari, A., Dadgar, Y., and Morad Sheikhy, M., Investigation of the effect of process variables on the mechanical properties of printed parts made of polyoxymethylene using a 3D printer by Fused Deposition Modeling (FDM), *Karafan*, Vol. 18, No. 1, pp. 167-187, (2021). (in Persian)

[13] Bakır, A., Atik, R., and Özerinç, S., Effect of fused deposition modeling process parameters on the mechanical properties of recycled polyethylene terephthalate parts, *Appl Polym*, Vol. 138, No. 3, pp. 49709–49721, (2020).

۳- نتیجهگیری

در این مطالعه، عوامل موثر بر استحکام قطعات چاپشده به وسیلهی ساخت افزودنی مبتنی بر اکستروژن بررسی شده است. این عوامل عبارتند از دمای نازل، درصد پرشدن، راستای نمونه، جهت گیری رسوب رشتهها، ارتفاع لایه و قطر نازل که جمعبندی نتایج ارائه شده در پژوهش های پیشین را میتوان به صورت زیر خلاصه کرد:

۱- با افزایش دمای نازل، ویسکوزیته مواد کاهش یافته و سطح مقطع رشتهها از حالت دایرهای به بیضی شکل تغییر می کند که باعث افزایش سطح تماس رشتهها شده و در نهایت منجر به افزایش استحکام کششی نهایی قطعات چاپشده میشود. به همین دلیل پیشنهاد میشود در فرآیند FFF دمای نازل را تا محدودهای که باعث تخریب مواد نشود بالا در نظر گرفت.

۲- قطعاتی که رسوب گذاری رشتهها در آنها هم جهت با محور بارگذاری است استحکام کششی بیشتری از خود نشان میدهند به همین علت پیشنهاد می شود جهت بارگذاری قطعه قبل از ساخت شناسایی شود و رسوب گذاری رشتهها در همان جهت انجام شود.

۳- راستای نمونه از مهم ترین عوامل تأثیر گذار بر استحکام است
 که راستای افقی روی لبه منجر به بیش ترین استحکام کششی
 می شود.

۴- با افزایش درصد پرشدن تخلخل کاهش یافته و چگالی و استحکام افزایش می ابد. بنابراین با توجه به وزن مورد نظر قطعات، می توان با افزایش درصد پرشدن، قطعات با استحکام بالاتری را چاپ نمود.

۵- با افزایش ارتفاع لایهها، حفرههای موجود بین لایهها افزایش می یابد که این موضوع باعث افزایش نقاط تمرکز تنش و کاهش استحکام قطعات می شود. بنابراین پیشنهاد می شود برای افزایش استحکام قطعات چاپ شده کمترین ارتفاع لایه برای چاپ انتخاب شود.

۶- با افزایش قطر نازل، میزان مواد خارجشده از نازل افزایش می یابد که این موضوع باعث افزایش چگالی و کاهش فضای خالی بین لایهها می شود و بدین ترتیب استحکام قطعات افزایش می یابد. این پارامتر یکی از عوامل مهم تأثیرگذار بر استحکام قطعات چاپ شده است که پیشنهاد می شود برای افزایش استحکام قطعات، نازل هایی با قطر بالا برای چاپ استفاده شود.

۴- مراجع

[1] Gibson, I., Rosen, D., Stucker, B., Additive Manufacturing Technologies, *Springer*, (2015).

[2] Mohamed, O.A., Masood, S.H., and Bhowmik, J.L., Optimization of fused deposition modeling process [23] Melenka, G., Schofield, J., Dawson, M., Carey, J., Desktop 3D printer material properties and dimensional accuracy, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No. 5, pp. 618–627, (2015).

[24] Heidari, M., Ezati, N., Sadeghi, P., and Badrossamay MR., Optimization of FDM process parameters for tensile properties of polylactic acid specimens using Taguchi design of experiment method, *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, Vol. 118, No. 81746, pp. 1-18, (2020). (in Persian)

[25] Radhwan, M., Shayfull, Z., Hadj Abdellah, A., Irfan, A., and Kamarudin, K., Optimization parameter effects on the strength of 3D printing process using taguchi method, *AIP Conference Proceedings*, Vol. 2129, No. 1, pp. 1–6, (2019).

[26] Baptista, R., Guedes, M., Pereira, M.F.C., Maurício, A., Carrelo, H., and Cidade, T., On the effect of design and fabrication parameters on mechanical performance of 3D printed PLA scaffolds, *Bioprinting*, Vol. 20, No. 96, pp. 1–17, (2020).

[27] Azdast, A., Hasanzadeh, R., Polylactide scaffold fabrication using a novel combination technique of fused deposition modeling and batch foaming: dimensional accuracy and structural properties, *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 114, pp. 1309–1321, (2021). (in Persian)

[28] Hasanzadeh, R., Azdast, T., Optimization of FDM 3D printing process parameters of biodegradable poly lactic acid polymeric samples, *Modares Mechanical Engineering.*, Vol. 21, No. 2, pp. 69-78, (2021). (in Persian)

[29] Hernandez, S., Gonzalez, D., and Jérusalem, A., Design of FDM 3D printed polymers: an experimentalmodelling methodology for mechanical property prediction, *Materials & Design*, Vol. 188, No. 108414, pp. 1–27, (2020).

[30] Khatwani, J., Srivastava, V., Effect of process parameters on mechanical properties of solidified PLA parts fabricated by 3D printing process, *3D Printing and Additive Manufacturing Technologies*, Vol. 1, No. 1, pp. 95–104, (2018).

[14] Jatti, V., Jatti, S., and Patel, A., A study on effect of fused Deposition modeling process parameters on mechanical properties, *International Journal of Scientific* & *Technology Research*, Vol. 8, No. 11, pp. 689–693, (1994).

[15] Vo, B., Ajibade, A., and Rosengren, M., The effect of 3D printing temperature on the mechanical properties of polypropylene, *Journal of Undergraduate Chemical Engineering Research*, Vol. 8, No. 1, pp. 24–31, (2019).

[16] Alafaghani, A., Qattawi, A., Alrawi, B., Guzman, A., Experimental optimization of fused deposition modelling processing parameters: A design-formanufacturing approach, *Procedia Manufacturing*, Vol. 10, No. 1, pp. 791–803, (2017).

[17] Charlon, S., Boterff, J., and Soulestin, J., Fused filament fabrication of polypropylene: Influence of the bead temperature on adhesion and porosity, *Additive Manufacturing*, Vol. 38, No. 1, pp. 1–8, (2021).

[18] Wang, P., Zou, B., Effects of FDM-3D printing parameters on mechanical properties and microstructure of CF/PEEK and GF/PEEK, *Chinese Journal of Aeronautics*, Vol. 1, No. 5, pp. 236–246, (2021).

[19] Ziemian, S., Okwara, M., and Ziemian, C.W., Tensile and fatigue behavior of layered acrylonitrile butadiene styrene, *Rapid Prototyping Journal*, Vol. 21, No. 3, pp. 270–278, (2015).

[20] Nidagundi, V., Keshavamurthy, R., and Prakash, C., Studies on parametric optimization for fused deposition modelling process, *Materials Today*, Vol. 2, No. 4, pp. 1691–1699, (2015).

[21] Hikmat, M., Rostam, S., and Ahmed, Y., Investigation of tensile property-based Taguchi method of PLA parts fabricated by FDM 3D printing technology, *Results in Engineering*, Vol. 11, No. 100264, pp. 1–10, (2021).

[22] Vicente, C., Martins, T., Leite, M., Ribeiro, A., Influence of fused deposition modeling parameters on the mechanical properties of ABS parts, *Polym Adv Technol*, Vol. 33, No. 3, pp. 501–507, (2020).





واژه های راهنما: شیب سنج، تراشه، میکروکنترلر، پروتکل SPI، میکروماشین

Masood Teymouri^{*} Assistant Professor, Faculty of Electrical Engineering, Urmia University of Technology, Urmia

Design and fabrication of a dual-axis inclinometer with a range of ±90 degrees and an accuracy of 0.1 degrees

Abstract: In this paper, a dual-axis inclinometer based on a micro-machine chip is introduced. The main purpose of this paper is to present a high-speed inclinometer with a wide measurement range and high accuracy for use in self-leveling systems. The inclinometer can measure the slope of the ground and generate the information of the slope in each direction as 11-bit digital data. The generated digital data is sent to the outside of the chip using the traditional SPI protocol. The part number of the chip is SCA100T-D02, which is controlled by an ATMEGA 32 microcontroller. The entire inclinometer circuit is placed inside an aluminum box and can be installed on any surface. The test results are shown that the proposed inclinometer can measure the slope of the ground with a speed of 18 Hz in both horizontal and longitudinal directions, with a range of \pm 90 degrees and an accuracy of 0.1 degrees. The operating temperature range of the inclinometer is from -40 to 125 degrees Celsius, and the slope information can be seen on a 4×20 display. So, this inclinometer can be used in a wide range of industrial, agricultural, etc. equipment.

Keywords: Inclinometer, Chip, Microcontroller, SPI protocol, Micro-machine

یذیرش: ۱۴۰۱/۰۵/۱۴

۱– مقدمه

شیبسنج وسیلهای است که از آن برای اندازه گیری زاویه عرضی و طولى نسبت به يک محور مرجع مانند سطح افق استفاده مي-شود. شیبسنجها کاربردهای مختلفی در رباتیک، صنایع هواپیمایی، نمایشگرهای شیب، دوربینها و بطور خاص در هر وسیلهای که کارکردش میتواند تحت تاثیر شیب زمین قرار بگیرد از جمله ماشین آلات صنعتی و کشاورزی، تجهیزات نظامی، ماشین آلات حفاری، سیستمهای تراز اتومات و غیره مورد استفاده قرار گیرند [۴-۱]. به عنوان نمونه، جرثقیلها قبل از بلند کردن بار باید به تراز شیب عرضی و طولی برسند تا در حین کار، دچار واژگونی نشوند. همچنین در حوزه کشاورزی می توان به ماشین کمباین اشاره نمود که برای بهینهسازی سیستم برداشت، خرمنکوبی و جداسازی دانه، باید به یک تراز مطلوب برسد. در شکل ۱ نمونه یک ماشینی که در حین کار باید به تراز برسد نشان داده شده است. این ماشین آلات که نیاز دارند در حین کار به تراز سطحی در یک راستا و یا دو راستا (عرضی و طولی) برسند از سیستمی به نام تراز اتومات و یا تراز هوشمند استفاده می کنند. نحوه كار این سیستمها به این صورت است كه ابتدا اندازه شیب زمین در راستای که میخواهند ماشین مربوطه تراز شود از شیبسنج دریافت کرده بعد با استفاده از سیستم کنترل ارتفاع که به ماشین متصل شده است ماشین به تراز مربوطه می سد. در واقع در حین عملیات بر پایه یک الگوریتم تراز، ارتفاع گوشه-های مختلف ماشین طوری کنترل می شود که در نهایت ماشین با دقت مورد نظر به تراز نهایی برسد. از آنجاییکه بعضی از ماشين آلات نياز است فقط در يک راستا مثلاً عرضي تراز شوند و بعضی دیگر باید همزمان در دو راستای عرضی و طولی تراز گردند. لذا شیبسنج مربوطه نیز باید توانایی اندازه گیری شیب سطح زمین در یک راستا و یا دو راستا را داشته باشد. نتیجتاً یکی از عوامل اصلی دقت و سرعت تراز به دقت و سرعت شیب-سنج نيز بر مي گردد و اين سنسورها قلب تپنده تمامي سيستم-های تراز اتومات میباشند. هدف اصلی این مقاله معرفی انواع سنسور شیبسنج و در نهایت طراحی یک شیبسنج دو محوره برای اندازه گیری شیب زمین در دو راستا با دقت دهم درجه مى باشد.

شیبسنجهای رایج اساساً از تلفیق یک آونگ با یک زاویه-سنج نوع مقاومتی، خازنی، حرارتی و یا نوری تشکیل میشود. در بین این نوع از شیب سنج ها نوع خازنی به دلیل حساسیت و

¹ Tilt sensor or Inclinometer

رزولوشن بالا بیشتر مورد استفاده قرار می گیرد [۵-۳]. همچنین شیبسنجهای مبتنی بر سیال^۲که بر اساس جابجایی یک مایع در یک ظرف ساخته می شوند به دلیل قیمت پایین کاربردهای فراوانی در این حوزه دارند [۲-۶]. در تحقیقات اخیر که گزارش شده است بیشتر از سنسورهای میکروماشین^۳ برای ساخت شدبسنجها استفاده می شود که دلیل آن ساخت آسان، اندازه کوچک، وزن و توان مصرفی پایین و همچنین سرعت و دقت بالا می باشد [۹-۸].

در این مقاله یک شیبسنج دو محوره معرفی شده است که از یک سنسور میکروماشین با راه انداز میکروکنترلی تشکیل شده است که علاوه بر قیمت و توان مصرفی پایین، دقت و سرعت بالایی نیز دارد. به دلیل راهاندازی سنسور شیب توسط میکروکنترلر، امکان اجرای همزمان الگوریتم تراز توسط همان میکروکنترلر نیز وجود دارد. لذا میتوان با نصب این شیبسنج بر روی ماشین آلات با قابلیت تراز اتومات نه تنها میتوان شیب زمین را اندازه گیری نمود بلکه همزمان عملیات تراز را نیز انجام داد.

بخشهای مختلف مقاله به این ترتیب میباشد که در بخش ۲ انواع روشهای اندازه گیری شیب بیان شده است. در بخش ۳ شیبسنج ساخته شده توضیح داده شده و در ادامه در بخش ۴ و ۵ نحوه کد نویسی، نمایی واقعی و نتایج تست شیبسنج ساخته شده بیان گردیده است.



³ MEMS: micro-electromechanical system

² Fluid-based

۲- شیب سنجها

همانطور که بیان شد شیب سنج ها وسایلی برای اندازه گیری زاویه مابین راستای افق زمین و راستای مورد نظر میباشند. ساده ترین روش برای اندازه گیری زاویه مربوطه، استفاده از یک آونگ ^۱ ساده (پاندول) میباشد. که تصویر آن در شکل ۲ نشان داده شده است.





آونگ ساده از سه بخش وزنه به جرم m، طول بازوی L و پایه تشکیل شده است. در صورت اعمال نیرو به وزنه، زاویه عرضی α و طولی β با راستای پایه ایجاد می شود که این دو زاویه همان زوایای عرضی و طولی کفه پایه می باشند. به بیان ساده تر، با نصب این آونگ بر روی ماشین، می توان شیب عرضی و طولی زمینی که ماشین بر روی آن قرار دارد را از روی این دو زاویه α و β به دست آورد. روشهای مختلفی برای تبدیل زاویه ایجاد شده توسط آونگ، به سیگنالهای الکتریکی وجود دارد که سه روش اصلی به این شرح می باشد.

۲-۱- روش مقاومتی

در این روش، جابجایی چرخشی توسط یک مقاومت متغیر که تصویر آن در شکل ۳ نشان داده شده است تبدیل به تغییرات اندازه مقاومت در قطعه میشود [۱۰]. مقاومت بین دو ترمینال T_1 و T_2 مقدار ثابتی داشته اما با حرکت وایپر⁷مقدار مقاومت بین دو ترمینال ۱ و ۲ ((R)) و همچنین دو ترمینال ۳ و ۱ ((R)) تغییر مییابد که اندازه مقاومتها بر اساس رابطه زیر بهم ارتباط دارند.

$$R = R_1 + R_2 \tag{1}$$

¹ Pendulum

برای این کار می توان از انواع مقاومتهای متغییر استفاده نمود که دقت و حساسیت این قطعات تاثیر مستقیم روی اندازه-گیری زاویهای دارد. در هر حال، برای استفاده از این مقاومتهای متغییر باید یک مدار رابطی را استفاده نمود که پایهای ترین آن، مدار پل وتستون می باشد که تصویر آن در شکل ۴ دیده می شود.



شکل ۳ ولوم مقاومتی



شکل ۴ پل وتستون

در این سنسور، رابطه ولتاژ خروجی با تغییرات زاویه بر اساس روابط زیر قابل محاسبه میباشد [۱۰].

$$V_{O} = 0.5V_{E} - \frac{R_{2}}{R_{1} + R_{2}}V_{E} = 0.5(\frac{R_{1} - R_{2}}{R_{1} + R_{2}})V_{E}$$
 (7)

با توجه به رابطه ۱ و همچنین ارتباط خطی اندازه مقاومت با زاویه چرخشی θ خواهیم داشت.

$$R_{\rm I} = K \cdot \theta \tag{(7)}$$

$$V_{O} = \left(\frac{R_{1} - 0.5R}{R}\right)V_{E} = K_{1}\theta + K_{2}$$

$$K_{1} = \frac{K \cdot V_{E}}{R}$$

$$K_{2} = 0.5V_{E}$$

$$c_{1} = \left(\frac{K \cdot V_{E}}{R}\right)$$

$$K_{2} = 0.5V_{E}$$

$$c_{2} = 0.5V_{E}$$

در این رابطه ۸ صریب تبدیل راویه به مفاومت در پناسیومتر میباشد. همانطور که از رابطه ۴ دیده می شود زاویه θ با ولتاژ خروجی یک رابطه خطی دارد. واضح است برای اندازه گیری در دو راستای α و β ، دو عدد پتانسومتر و مدار پل وتستون نیاز میباشد.

۲-۲- روش خازنی

یکی از ایرادات اساسی سنسورهای مقاومتی، وجود اصطحکاک بین وایپر و نوار مقاومتی می باشد که این باعث کاهش دقت و عمر سنسور می گردد. سنسور جایگزین که این مشکل را ندارد سنسور خازنی می باشد. در این روش بجای استفاده از مقاومت متغییر، از خازنهای متغییر که نوع چرخشی آن در شکل ۵ نشان داده شده است استفاده می شود.



در این روش چرخش محور خازن متغییر، باعث می شود که صفحات خازنی در مقابل هم جابجا شده و بر اساس رابطه ۵، ظرفیت خازن C با زاویه چرخشی θ تغییر یابد [۱۰].

$$C = \frac{\varepsilon_r A(\theta)}{d}$$
(Δ)
$$A(\theta) = \frac{1}{2} |\pi - \theta| r^2; 0 \le \theta \le 2\pi$$

A در این رابطه ϵ_r ضریب دی الکتریک عایق بین صفحات، ϵ_r سطح مقطع صفحات، θ زاویه چرخشی سطح مقطع صفحات، ϵ_r

شفت)، d فاصله بین صفحات و r شعاع نیم دایره میباشد. همانطور که مشاهده میشود یک رابطه خطی بین ظرفیت خازن و زاویه چرخشی شفت وجود دارد [۱۱–۱۲].

۲-۳- روش القائي

در روش مغناطیسی، می توان جابجایی خطی و یا چرخشی را با استفاده از یک سیمپیچ به تغییرات خود القایی تبدیل نمود. در این روش با استفاده از ۳ سیمپیچ می توان زاویه را اندازه گیری کرد. همانطور که در شکل ۶ نشان داده شده است سیم پیچ شماره ۱ و ۲ نسبت بهم متعامد و ثابت بوده و توسط ولتاژهای سیم پیچ سوم حول محور خود، ولتاژی (V3) در آن القاء می شود که در آن زاویه θ تاثیر خطی بر اندازه ولتاژ آن دارد به این سیستم ریزالور ^{(۱}گفته می شود. محاسبات مربوط به ولتاژ القائی در سیمپیچ سوم بصورت زیر می باشد [۱۰].

$$V_{3} = \theta V_{m} \cdot \cos wt \cdot \cos \theta + \theta V_{m} \cdot \sin wt \cdot \sin \theta = \theta V_{m} \cdot \cos(wt + \theta)$$
(9)



۲-۴- سنسورهای میکروماشین

امروزه مدارات الکترونیکی با استفاده از تکنولوژی^۲CMOS قابل ساخت در ابعاد بسیار کوچک (نانو) میباشند که این فناوری باعث افزایش چشمگیر کارایی آنها شده است. سیستمهای نشريه مهندسي مكانيك

میکرو-الکترومکانیکی نیز به ما کمک میکنند تا سیستمهای مکانیکی را در ابعاد میکرو و نانو پیادهسازی نمود. این نوع از تکنولوژی به ما کمک میکند تا کارایی سنسورها را از بسیاری جهات مانند سرعت، دقت، توان مصرفی، سطح اشغالی، قیمت تمام شده و ... بهبود بخشید. به عنوان مثال، تکنولوژی میکروماشین کاربردهای بسیار فراوانی در ساخت میکرو سنسورها دارند که از آن جمله میتوان به سنسورهای شتابسنج و شیبسنج اشاره نمود.

۳- شیب سنج ارائه شده

همانطور که در بخش ۲ توضیح داده شد با روشهای مختلفی می توان جابجایی چرخشی (زاویه) را اندازه گیری نمود. با نصب هر نوع سنسور زاویه سنج بر روی محور آونگ (شکل ۲) می توان به راحتی شیب زمین را بسته به درجه آزادی آونگ، اندازه گیری کرد. استفاده از سنسورهای مقاومتی، خازنی و یا مغناطیسی محدودیتهای خاصی از قبیل نیروی لازم برای چرخاندن محور سنسور، حجم سنسور، توان مصرفی ، سرعت اندازه گیری و غیره دارد که امروزه سنسورهای میکروماشین این محدودیتها را تا حدود زیادی مرتفع کرده است. سنسوری که در سیستم طراحی شده مورد استفاده قرار گرفته است به شماره SCA100T-D02 می باشد که تصویر آن در شکل ۷ نشان داده شده است [-۱۴



شکل ۷ سنسور شیبسنج SCA100T-D02

۲-۱−۳ مشخصات سنسور SCA100T-D02

سری SCA100T، یک نوع شیبسنج با تکنولوژی میکروماشین میباشد که میتواند در تجهیزات ترازکن اتومات

۱- قابلیت اندازه گیری در دو راستای X و Y با رزولوشن ۰٫۰۰۳۵

- ۲- رنج اندازه گیری °۹۰±
- ۳- پهنای باند اندازه گیری ۱۸Hz
- ۴- توانایی تحمل شوک ۲۰۰۰۰g

۲-۲- بلوک دیاگرام داخلی سنسور

همانطورکه از بلوک دیاگرام سنسور در شکل ۸ دیده می شود. تراشه دارای دو حسگر element1 , element2 متعامد بوده که سیگنال خروجی آنها علاوه بر اینکه بصورت آنالوگ (OUT_1 , OUT_2) به بیرون تراشه ارسال می شود برای راحتی کاربر بعد از تنظیم و فیلتراسیون به بخش مبدل داده جهت تبدیل به کدهای دیجیتال نیز ارسال می گردد. تا کدهای جهت تبدیل به کدهای دیجیتال نیز ارسال می گردد. تا کدهای مست به خارج از سنسور ارسال گردد. برای افزایش دقت اندازه-گیری واحد کالیبراسیون نیز وجود دارد که باعث تصحیح خطای کدهای دیجیتال می گردد. همچنین بخش اندازه گیری دما نیز وجود دارد تا بتواند تاثیر دما را در کدهای نهایی نیز لحاظ نماید.



شکل ۸ بلوک دیاگرام سنسور شیبسنج SCA100T

در شکل ۹ وضعیت کلی ولتاژهای خروجی آنالوگ OUT_1 و OUT_2 در شرایط مختلف شیب نشان داده شده است. همانطور که دیده می شود در شرایط تراز، ولتاژهای خروجی برابر

نصف ولتاژ VDD یعنی ۲/۵ ولت میباشد و در شرایط شیب های مختلف میتواند بزرگتر یا کوچکتر باشد.



۳–۳– راه اندازی سنسور

شیبسنج ارائه شده با استفاده از تراشه SCA100T-D02 طراحی شده است. همانطور که قبلا اشاره شد برای به دست آوردن اطلاعات شیب هم میتوان از خروجیهای آنالوگ آن و هم میتوان از خروجی دیجیتال استفاده نمود. به دلیل تولید کدهای دیجیتال با دقت بالا توسط خود تراشه، از خروجی کدهای دیجیتال برای اندازه گیری شیب استفاده شده است. سنسور قادر است با استفاده از پایههای SCK , MOSI MISO بر SSB , SCK , MOSI MISO با ستفاده شده است. سنسور قادر اساس پروتکل SPI اطلاعات دیجیتال شیب را در دو راستای عرضی و طولی به بیرون تراشه ارسال نماید. برای راهاندازی تراشه سنسور، فقط کافیست پایه VDD به ولتاژ ۵ ولت و پایه GND به زمین مدار متصل گردد حال با استفاده از پایههای مربوط به اتصال SPI (شکل ۱۰) اطلاعات شیب را دریافت کرد.



همانطور که که در بخش قبلی توضیح داده شد می توان از طریق پروتکل SPI اطلاعات مربوط به شیب را بصورت یک داده دیجیتال ۱۱ بیتی از تراشه SCA100T-D02 دریافت نمود. نحوه اتصال میکروکنترلر به تراشه و دیاگرام زمانی مربوط در شکل ۱۱ نشان داده شده است.



شکل ۱۱ الف) نحوه اتصال میکرو به تراشه ب) دیاگرام زمانی SPI

همانطور که از دیاگرام زمانی دیده می شود ابتدا توسط O^LSCK تراشه فعال می گردد. بعد با ارسال پالس ساعت^۲SCK در ۸ کلاک به تراشه ضمینه ارسال فرمان از طریق^۳MOSI در ۸۱ کلاک ساعت ساعت و دریافت شیب از طریق^۴MISO در ۱۱ کلاک ساعت بصورت سریال مهیا می گردد. با ارسال فرمان 00010000 تراشه شیب عرضی را ارسال می کند و با ارسال فرمان 00010001 تراشه شیب طولی ارسال می گردد.

۵- تست شیب سنج

تصویر شیب سنج ساخته شده در شکل ۱۲ نشان داده شده است. میکروکنترلر مورد استفاده جهت راه اندازی تراشه، Atmega 32 بوده که توسط یک منبع سوییچنگ مبتنی بر تراشه Im2576

۴– کد نویسی سنسور

³ Master Out Slave In

⁴ Master In Slave Out

¹ Chip Select

² Serial Clock

نیستند. در این مقاله یک شیب سنج بر پایه سنسور میکروماشین معرفی شده است که توسط یک میکروکنترلر راهاندازی شده است. شیبسنج ساخته شده قادر است شیب زمین را در دو راستا با دقت ۱/۰ درجه و سرعت ۱۸ هرتز اندازه گیری نماید. این میزان از دقت و سرعت آنرا کاملا مناسب برای استفاده در انواع تجهیزات صنعتی مینماید. از طرفی به دلیل دریافت اطلاعات شیب زمین توسط میکروکنترلر، نصب این دستگاه بر روی انواع ماشین آلات، جهت تراز اتومات امکان پذیر میباشد. از آنجاییکه میتوان الگوریتم تراز اتومات را توسط همان میکروکنترلر شیبسنج پیاده سازی نمود. لذا این سیستم میتواند کارکرد بسیار مناسبی در شیب و هم اجرای الگوریتم تراز بصورت همزمان توسط شیب و هم اجرای الگوریتم تراز بصورت همزمان توسط میکروکنترلر شیب سنج اجرا میشود. این کار نه تنها باعث کاهش قیمت تمام شده سیستم ترازکن میشود بلکه سرعت و دقت تراز را نیز افزایش میدهد.

۷- مراجع

[1] Djambazian, H. H., Nerguizian, C., Nerguizian, V., Saad M, 3D Inclinometer and MEMS Acceleration Sensors, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, pp. 3338-3342, doi: 10.1109/ISIE.2006.296001, (2006).

[2] Zhong, Z. W., Zhao, L. P., Lin, H. H., Development and investigation of an optical tilt sensor, *Opt. Commun.*, Vol. 261, No. 1, pp. 23–28, (2006).

[3] Lee, J. H., Lee, S. S., Electrolytic tilt sensor fabricated by using electroplating process, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 167, No. 1, pp. 1–7, (2011).

[4] Han, Q., Chen, C., Research on tilt sensor technology, 2008 *IEEE International Symposium on Knowledge Acquisition and Modeling* Workshop, pp. 786–789, (2008).

[5] Teymouri, M., Fabrication and evaluation of a fourway automatic leveling system with the ability to adjust the lateral and longitudinal slope, *Scientific Journal of Mechanical Engineering of Iran*, Vol. 26, No. 5, pp. 75-82, (2018). (in Persian نفارسی).

[6] Jung, H., Kim, C. J., Kong, S. H., An optimized MEMS-based electrolytic tilt sensor, *Sensors and Actuators A: Physical*, Vol. 139, No. 1–2, pp. 23–30, Sep. (2007).

¹ Tolerance

تغذیه میشود. اندازه شیب عرضی و طولی (Alpha , Beta) در یک نمایشگر کاراکتری ۲۰×۴ قابل مشاهده می باشد.



شکل ۱۲ مدار شیب سنج

جهت تست شیب سنج، محفظه آلومینیومی مربوطه در شیبهای معلوم و دقیق عرضی و طولی قرار داده شد و معلوم گردید این شیب سنج میتواند شیب عرضی و طولی در رنج ۹۰± درجه با دقت ۱/۰ درجه و سرعت ۱۸ هرتز اندازهگیری نماید.

۶- نتیجهگیری

شیبسنجها قلب تپنده بسیاری از تجهیزات صنعتی و نظامی بویژه سیستمهای تراز اتومات میباشند. با استفاده از شیبسنجها میتوان شیب زمین را در یک و یا دو راستای عرضی و طولی اندازه گیری نمود. دقت، سرعت و رنج اندازه گیری شیبسنجها میتواند تاثیر فراوانی در کار کرد سیستمهای تراز کن داشته باشد. شیبسنجها، عموماً از تلفیق آونگ با یک سنسور زاویهسنج مقاومتی و یا خازنی ساخته میشوند. جهت جلو گیری از نوسان زیاد آونگ، معمولا از یک سیستم میراگر در آنها استفاده میشود که این به نوبه خود باعث کاهش سرعت شیبسنج می گردد. از طرفی به دلیل انحراف^۱ در سنسورهای زاویهسنج مقاومتی و خازنی، شیبسنجهای مربوطه از دقت بالایی نیز برخوردار [11] Hosseini, F., Mehran, M., Mohajerzadeh, S., Shoaei, O., Design, analysis, simulation, and fabrication of a novel linear MEMS capacitive inclinometer, *IEEE Sensors Journal*, Vol. 18, No. 17, doi: 10.1109/JSEN.2018.2851660, (2018).

[12] Coonley, K., Sequeira, D., Mann, B., Patterned rotary parallel-plate capacitor for frequency upconversion and RC circuit waveform conditioning, *Eng. Res. Express*, Vol. 2, No. 2, (2020).

[13] Hoang, M. L., Pietrosanto, A., A new technique on vibration optimization of industrial inclinometer for MEMS accelerometer without sensor fusion, *in IEEE Access*, Vol. 9, pp. 20295-20304, (2021).

[14] Nastro, A., Ferrari, M., Ferrari, V., MEMS Inclinometer with tunable-sensitivity and segmented overlapping allan variance analysis, 2020 AEIT International Annual Conference (AEIT), pp. 1-6, (2020). [7] Yotter, R. A., Baxter, R. R., Ohno, S., Hawley, S. D., Wilson, D. M., On a micromachined fluidic inclinometer, *in TRANSDUCERS '03. 12th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems. Digest of Technical Papers*, Vol. 2, pp. 1279–1282, (2003).

[8] Zou, X., Thiruvenkatanathan, P., Seshia, A., Microelectro-mechanical resonant tilt sensor with 250 nanoradian resolution, *in European Frequency and Time Forum & International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*, Joint, pp. 54–57, (2013).

[9] Yao, B., Feng, L., Wang, X. Liu, W., Jiao, H., Micrograting tilt sensor with self-calibration and direct intensity modulation, *Opt. J. Light Electron Opt.*, Vol. 126, No. 1, pp. 144–147, (2015).

[10] Regtien, P.P.L., Sensors for Mechatronics, *Elsevier*, (2018).