ماهنامه علمى پژوهشى



mme.modares.ac.ir



بررسي عددي جريان سه بعدى ناپايدار سيال ويسكوالاستيك غيرخطي حول كره

 4 محمود نوروزی 1* ، آلاله انارکی حاجی باقری 2 ، محمدهادی صداقت 3 ، محمد محسن شاه مردان

1- دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

2- كارشناس ارشد، مهندسي مكانيك، دانشگاه صنعتي شاهرود، شاهرود

3- دکتری، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

4– دانشیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی شاهرود، شاهرود

* شاهرود، صندوق پستی mnorouzi@shahroodut.ac.ir ،3619995161

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این تحقیق به بررسی سه بعدی جریان ناپایای سیال ویسکوالاستیک حول کره در محیط بینهایت پرداخته شده است. برای بررسی مناسبتر اثرات خواص سیال از مدل غیر خطی گزیکس به عنوان معادله متشکله سیال ویسکوالاستیک استفاده شده است. با توجه به سه بعدی بودن هندسه مورد مطالعه با تقسیم،بندی دامنه محاسباتی به بخشهای گوناگون از یک شبکه با سازمان در بسیاری از مناطق دامنه محاسباتی استفاده	مقاله پژوهشی کامل دریافت: 27 دی 1396 پذیرش: 19 خرداد 1396 ارائه در سایت: 17 آذر 1396
 شده است. حل معادلات مومنتم و معادلات متشکله سیال در این تحقیق توسط کد عددی منبع باز اپن فوم که از روش حجم محدود جهت	کلید واژگان:
مدلسازی معادلات حاکم بر جریان استفاده میکند، انجام گرفته است. در ابتدا نتایج میدان سرعت و خطوط جریان سیال نیوتنی حول یک کره	بررسی سه بعدی
در محیط بینهایت ارائه شده و با ترسیم مقدار سرعت در پشت کره عدد رینولدز مربوط به ناپایداری جریان ارائه شده است. در ادامه جهت معتبر	سيال ويسكوالاستيك
سازی این کد عددی نتایج حاصل از ضریب درگ بر روی کره با نتایج تحقیقات گذشته مقایسه شده است. سپس به بررسی جریان سیال	كره
ویسکوالاستیک بر ناپایداری گردابههای تولیدی در پشت کره در اعداد رینولدز بالا پرداخته شده و اثرات عدد رینولدز و وایزنبرگ در تولید و	مدل گزیکس
ناپایداری این گردابهها و تأثیر آن بر عدد استروهال توضیح داده شده است. نتایج نشان میدهد در اعداد رینولدز بالا اثرات خواص الاستیک بر	نرمافزار اپن فوم
روی رژیم جریان ناچیز بوده و عدد رینولدز در ناپایداری گردابههای تولیدی در پشت کره نقش بارزتری ایفا میکند.	

Numerical study of three dimensional instability of nonlinear viscoelastic fluid flow around a sphere

Mahmood Norouzi^{*}, Alaleh Anaraki Haji Bagheri, Mohammad Hadi Sedaghat, Mohammad Mohsen Shahmardan

Department of Mechanical Engineering, Shahrood University of Technology, Shahrood, Iran * P.O.B. 3619995161 Shahrood, Iran, mnorouzi@shahroodut.ac.ir

ARTICLE INFORMATION ABSTRACT

Original Research Paper Received 17 January 2017 Accepted 09 June 2017 Available Online 08 December 2017

Keywords: 3D Investigation Viscoelastic fluid Sphere Giesekus model OpenFoam In this paper, 3D investigation has been employed to study the wake instability of viscoelastic fluid flow behind unconfined sphere. For estimating the proper properties of the viscoelastic fluid in this study a non-linear Giesekus model is used as the constitutive equation of viscoelastic fluid. Numerical computations are carried out by solving the governing and the onstitutive equations of the viscoelasic fluid flow using the finite volume technique and OpenFOAM which is an open source code is used as the CFD solver. At first velocity field and flow streamlines of Newtonian fluid around the sphere for various Reynolds numbers have been plotted and by plotting the velocity magnitude and pressure at a point behind the sphere versus time, the value of Re_{cr} in which the flow become unstable has been reported. Furthermore, for validating the present numerical code, variation of drag coefficient around the sphere versus Reynolds number has been compared with previous investigations. In the following, the effect of Reynolds number gnumber on fluid flow and instability of wake formation behind a sphere have been investigated at high values of Reynolds number for the first time. Results show that at high values of Reynolds number the effect of Wisenberg number has less effect in contrast with Reynolds number on flow instability behind the sphere.

1- مقدمه

مواد متخلخل دارای بستری با ذرات کروی، مدل سازی فرایند رسوب گذاری در دریاچههای تهنشینی مواد معلق و نیز بررسی حرکت ریز گردها موجود در هوا [1] اشاره کرد. اولین حل تئوری موجود جهت مدل سازی جریان سیال نیوتنی در اطراف یک کره صلب به عنوان مساله استوک شناخته می شود. در واقع در این مطالعه، جریان خزشی (جریان لزج) در اعداد رینولدز بسیار

بررسی جریان سیال در اطراف ذرات صلب کروی شکل به دلیل کاربردهای گوناگون در علوم مهندسی و نیز مدلسازی جریانهای موجود در محیط پیرامون از دیرباز مورد توجه بسیاری از محققان قرار گرفته است. از جمله این کاربردها، میتوان به مدلسازی جریان سیال در فیلترهای صنعتی حاوی

Please cite this article using:

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

M. Norouzi, A. Anaraki Haji Bagheri, M. H. Sedaghat, M. M. Shahmardan, Numerical study of three dimensional instability of nonlinear viscoelastic fluid flow around a sphere, Modares Mechanical Engineering, Vol. 17, No. 12, pp. 213-222, 2018 (in Persian)

ضعیفی میکنند که با گذشت زمان در طی جریان دمپ میشوند و جریان پايدار مى گردد. با افزايش عدد رينولدز و در بازه عدد رينولدز بين 400 تا 500 گردابههای ایجاد شده در پشت کره شروع به ناپایداری به صورت پريوديک ميکنند. بنابراين عدد رينولدز بحراني که مرز بين جريان پايا و ناپايا را مشخص می کند، $\operatorname{Re}_{\operatorname{Cr}} = 400$ گزارش شده است. با توجه به اینکه بسیاری از سیالات مورد استفاده در صنعت و محیط پیرامون مانند انواع پلیمرها، حلالها و غیره از خود رفتار غیرنیوتنی نشان میدهند، بررسی جریان سیال غیرنیوتنی در اطراف اجسام صلب مانند کره از اهمیت خاصی برخوردار است. به عنوان مثال، با مدلسازی جریان سیال ویسکوالاستیک در اطراف یک ذره کروی که در ستونی از سیال در حال سقوط است، می توان خواص رئولوژیکی سیال مورد نظر و بررسی فرایندهای تەنشینی مواد و فیلتراسیون ذرات و غیره را مورد بررسی قرار داد [21]. چابرا و همکاران [22] با استفاده از این آزمایش، به بررسی خواص رئولوژیک یک سیال غیرنیوتنی جدید (سیال بوگر^۳) پرداختند. آریگو و مکنلی [23] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی میدان جریان حول کرهای که در حال سقوط در یک ستون از سیال باریک شونده می باشد، پرداختند. در این مطالعه، اثرات دیوارههای تیوبی که کره در آن در حال سقوط است و نیز خواص سیال باریک شونده بر گردابههای تولید شده در رینولدزهای پایین (جریان خزشی) بررسی شده است. نتایج این تحقیق نشان داد که اندازه سرعت برگشتی با افزاش عدد دبورا افزایش می یابد. و همچنین با افزایش عدد دبورا، مکان این سرعت كمينه به سمت پايين دست جريان حركت مىكند. آكرز و بلمنت [24] در یک مطالعه آزمایشگاهی به بررسی جریان ویسکوالاستیک سیال میسلی حول کره پرداختند. در این مطالعه کره از ارتفاعهای مختلف وارد یک ستون از سیال ویسکوالاستیک گردید. جهت مشاهده گردابههای تشکیل شده در پشت کره، کره از ارتفاعهای مختلفی به داخل ستون سیال رها شده است. نتایج آنها نحوه تشکیل و شکل گردابههای ایجاد شده در پشت کره را برای عدد رینولدز (Re<1)، مشخص کرد. وارگاس و همکاران [25] به بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک حول کره با استفاده از مدل فنه پرداختند. در این مطالعه به بررسی اثرات خواص سیال ویسکوالاستیک بر مقادیر تنش و نيز خطوط جريان در رينولدزهاي پايين (Re<20)پرداخته شد. هوسياداس و تنر [26] با استفاده از روش حساب اختلالات به حل تحلیلی جریان سه بعدى خزشي ويسكوالاستيك حول يك كره كه تحت جريان برشي قرار گرفته است، پرداختهاند. آنها در این مطالعه از مدلهای ماکسول، سیال مرتبه دو، فن تین تنر و نیز گزیکس جهت مدل سازی سیال استفاده کردهاند. یو و همکارن [27] و پوتز و همکاران [28] در تحقیقات جداگانهای به بررسی فرایند ته نشینی ذره کروی صلب در داخل ستونی از سیال باریک شونده^۴ در اعداد رينولدز كوچک (Re<1) پرداختند. همچنين،هارلن [29] و فرانک و لي [30] به بررسی خواص رئولوژیکی جریان سیالات ویسکوالاستیک حول کره بر الگوی جریان (در رینولدزهای کوچک) پرداختند. نتایج آنان نشان داد که الگوی جریان با توجه به نوع سیال ویسکوالاستیک می تواند متفاوت باشد. بر طبق این مطالعات، در سیالات باریک شونده و ضخیم شونده پدیده جریان برگشتی مشاهده شد ولی در جریان سیال بوگر این پدیده مشاهده نشد. آهوگويو و جوسيک [31] به بررسی اثرات زبری سطح کره که در داخل ستونی از سیال بینگهام بر الگوی جریان و ضریب درگ سطح کره پرداخته است.

کوچک (Re<<1) مورد بررسی قرار گرفت [2]. در ادامه، محققان در مطالعات بسیاری به بررسی جریان سیال نیوتنی غیرقابل تراکم در اطراف کره با در نظر گرفتن فرض تقارن محوری در رژیم پایدار پرداختند [4,3]. از جمله معایب این مطالعات استفاده از فرض تقارن محوری در مساله میباشد، زیرا این فرض در صورت پایین بودن سرعت سیال عبوری از روی جسم و آرام بودن میدان سرعت، صادق است و امکان مدلسازی صحیح و بررسی الگوی جریان برای اعداد رینولدز بالاتر را نمیدهد. در ادامه، محققان به بررسی جریان سیال در اعداد رینولدز بالاتر و مکانیزم تشکیل گردابه های ایجاد شده در پشت کره پرداختند. در اولین قدم، با افزایش عدد رینولدز به بررسی روند رشد گردابههای پایدار ایجاد شده در پشت کره و زمان پدید آمدن گردابههای ناپایدار مورد بررسی قرار گرفت. [6,5]. با مروری بر مطالعات انجام شده، می-توان عدد رینولدز بحرانی را که در آن گردابههای ناپایدار در پشت کره شروع ايجاد مي شوند را در بازه بين 270 تا 300 گزارش كرد [8,7]. مطالعات زیادی جهت بررسی الگوی جریان و میدان سرعت در اعداد رینولدز بالاتر از عدد رینولدز بحرانی و بررسی الگوی جریان گردابههای ناپایدار ایجاد شده در پشت كره انجام شد. از جمله اين مطالعات مي توان به مطالعات اكندو [9] و ریمن و چنگ [10] اشاره کرد که در آن به بررسی میدان جریان و سرعت با استفاده از شرط تقارن پرداخته شده است. هانازاکی [11] معادلات ناویراستوکس را برای جریان ناپایدار حول کره به روش تفاضل محدود تا رينولدز 200 مورد بررسی قرار داد که به دليل پايين بودن عدد رينولدز در نظر گرفته شده در محاسبات نتوانست شروع شدینگ^۲ در پشت کره را مشاهده کند. در ادامه مطالعات زیادی به بررسی جریان سیال نیوتنی حول كره تا حدود رينولدز 300 انجام شد [13,12]. در اين مطالعات جريان دوبعدی فرض شده و شرط تقارن محوری در حل معادلات مورد استفاده قرار گرفته است. همچنین تحقیقات آزمایشگاهی زیادی جهت محاسبه عدد رینولدز بحرانی و بررسی شروع ناپایداری گردابههای ایجاد شده در پشت کره انجام شد. طبق این تحقیقات عدد رینولدز بحرانی در حدود اعداد رینولدز 300 [14,5] تا 400 [16,15] گزارش شد. کیم و پیرلستین [17] و ناتاراجان و اکریووس [18] شروع شدینگ در پشت کره را در بازه عدد رینولدز بین 175 تا 210 گزارش کردند. با توجه به مغایرت این نتایج، تحقیقات بیشتری جهت بررسی این موضوع انجام شد.هارتمان و همکاران [19] در قسمتی از مطالعه خود به بررسی میدان جریان و ضریب درگ حول کره با استفاده از روش برش سلول در مختصات دکارتی در بازه عدد رینولدز بین 250 تا 300 پرداختند. از جمله تحقیقات انجام شده جهت بررسی الگوی جریان سیال عبوری از روی کره در اعداد رینولدز مختلف می توان به تحقیق لی [20] اشاره کرد. در این مطالعه، جریان سه بعدی سیال نیوتنی بر روی کره در محیط بینهایت برای اعداد رینولدز مختلف مورد بررسی قرار گرفت. نتایج حاصله از این تحقیق نشان داد که در حدود عدد رینولدز 20 جدایش لایه مرزی از سطح کره اتفاق افتاده و دو گردابه متقارن پایدار در پشت کره تشکیل می-شود. با افزایش عدد رینولدز تا حدود رینولدز 300 همچنان گردابههای ایجاد شده پايدار بوده و افزايش عدد رينولدز تنها باعث تغيير زاويه جدايش و افزایش اندازه گردابههای تشکیل شده می شود. همچنین، اثرات افزایش عدد رینولدز بر روی زاویه جدایش و طول گردابههای پایدار ایجاد شده در پشت کره گزارش شد. نتایج ایشان نشان داد، با افزایش عدد رینولدز و در بازه عدد رينولدز بين 300 تا 375، گردابه هاى ايجاد شده در ابتدا شروع به ناپايدارى

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-03

 ³ Booger
 ⁴ Shear thinning fluid

¹ Axisymmetric ² Shading

با مروری بر مطالعات پیشین، می توان دریافت که تحقیقات محدودی در زمینه بررسی الگوی جریان سیال ویسکوالاستیک حول کره انجام شده و اکثر تحقیقات گذشته به بررسی میدان سرعت و الگوی جریان خزشی (اعداد رينولدز پايين) پرداختهاند كه اين خود باعث درك محدود فيزيكي اين مساله می شود. بعلاوه در بیشتر مطالعات گذشته از یک مدل دو بعدی استفاده شده است در صورتی که تحلیل و مدل سازی دقیق این مساله نیاز به یک مدلسازی سه بعدی دارد [31]. در این پژوهش، به بررسی میدان سرعت سیال و الگوی جریان سیال ویسکوالاستیک حول کره صلب پرداخته شده است. جهت بررسی جریان سیال ویسکوالاستیک، مدل سه ثابته گزیکس به کار گرفته شده است. مدل سه ثابته گزیکس^۱ بر مبنای دیدگاه مولکولی بدست آمده است. امتياز اصلي اين مدل آن است كه قادر به ارائه رفتار پاورلو برای ویسکوزیته و ثابتهای اختلاف تنشهای نرمال است. همچنین جهت بررسی دقیق الگوی جریان و اثرات خواص رئولوژیک سیال ویسکوالاستیک بر الگوی شکل گیری گردابههای ایجاد شده، مدلسازی سه بعدی جریان حول کره در غیاب اثرات دیوارههای محدود کننده یا به عبارتی در محیط بینهایت (مطابق شکل 1) انجام شده است. به بیان دیگر در مطالعه حاضر، به بررسی اثرات خاصیت الاستیک و عدد رینولدز بر نحوه شکل گیری گردابهها و نیز بررسی شروع ناپایداری و فرکانس گردابههای ایجاد شده در پشت کره و مقایسه آن با جریان سیال نیوتنی پرداخته شده است.

در ادامه ابتدا معادلات حاکم و یا به عبارتی معادلات ساختاری جریان سیال ویسکوالاستیک بحث شده و پس از بحث در مورد نحوه مدلسازی عددی، به بحث در مورد نتایج عددی پرداخته می شود.

2- فرمول بندی ریاضی

در این قسمت، معادلات حاکم و معادلات متشکله در مدل سه ثابته گزیکش مدل گزیکس معرفی می گردد. پس از آن به بحث در مورد نحوه مدلسازی عددی پرداخته خواهد شد.

1-2- معادلات حاكم

در این تحقیق از دستگاه مختصات دکارتی نشان داده شده در شکل 1 استفاده شده است. معادلات حاکم بر جریان آرام غیر قابل تراکم سیال ویسکوالاستیک در مطالعه حاضر که شامل معادلات پیوستگی و مومنتم می-باشند، مطابق با معادله (1) عبارتند از:

$$\vec{\nabla} \cdot \vec{u} = 0$$

$$\frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \vec{\nabla} \vec{u} + \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} p = \frac{1}{\rho} \vec{\nabla} \cdot \sigma + \vec{g}$$
(1)

در روابط (1)، t زمان، p فشار، ho چکالی، $ec{u}$ بردار سرعت، $ec{g}$ بردار شتاب جذبه t

و
$$\sigma$$
 تانسور تنش میباشد.

تانسور تنش در مدل گزیکس را میتوان به صورت مجموع تنش نیوتنی و تنش الاستيك مطابق رابطه (2) بيان نمود:

 $\sigma = \sigma_N + \sigma_E$ (2)در معادله (2)، σ_{N} مربوط به سهم حلال نيوتني و σ_{E} سهم ويسكوالاستيک تانسور تنش است. سهم نيوتني سيال به صورت معادله (3) تعريف مي شود: $\sigma_N = \eta_N \dot{\gamma}$ بخش الاستيك تانسور تنش نيز طبق رابطه (4) قابل بيان است:



Fig. 1 Schematic geometry in current research شكل 1 مشخصات هندسه مورد بررسى در تحقيق حاضر

$$\sigma_E + \lambda \overline{\sigma}_E^{\nabla} + \alpha \frac{\lambda}{\eta_E} (\sigma_E \cdot \sigma_E) = \eta_E \dot{\gamma}$$
(4)

در معادلات (3) و (4)، $\eta_{
m N}$ ویسکوزیته سهم نیوتنی سیال و $\eta_{
m E}$ ویسکوزیته سهم ویسکوالاستیک سیال است که η_0 ویسکوزیته کل سیال و β نسبت ويسكوزيته از رابطه (5) قابل محاسبه است:

$$\eta_0 = \eta_N + \eta_E, \ \beta = \frac{\eta_E}{\eta_0} \tag{5}$$

همچنین در معادله (4) λ زمان رهایی از تنش سیال و lpha ضریب پویایی n یا تحرک در سیال ویسکوالاستیک میباشد که بیانگر رفتار غیر ایزوتروپیک برونی در هیدرودینامیک مولکولی ماده ویسکوالاستیک است. همچنین مشتق زمانی همرفتی پاد همبسته بخش الاستیک تانسور تنش ${}^{V}(\sigma_{E}^{V})$ بهصورت رابطه (6) قابل محاسبه است:

$$\vec{\sigma}_{\rm E} = \frac{\partial \sigma_{\rm E}}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla \sigma_{\rm E} - \sigma_{\rm E} \cdot \nabla \vec{u} - \nabla \vec{u}^{\rm T} \cdot \sigma_{\rm E}$$

$$(6)$$

در معادلات (3) و (4) $\dot{\gamma}$ تانسور نرخ برش است و مقدار آن از رابطه (/) قابل محاسبه است: (7)

$$= \nabla \vec{u} + \nabla \vec{u}^{\mathrm{T}}$$

برای تعیین نسبت نیروی اینرسی به نیروی ویسکوز از عدد بیبعد رینولدز (Re)، نسبت نیروی ناشی از خاصیت الاستیک به نیروی حاصل از ویسکوزیته عدد بی بعد وایزنبرگ (we) و همچنین فرکانس بی بعد استروهال (St) استفاده شده است. پارامترهای بیبعد ذکر شده حاکم بر مساله مطابق رابطه (8) عبارتند از:

Re =
$$\frac{\rho U_0 D}{\eta_0}$$
, We = $\frac{U_0 \lambda}{D}$, St = $\frac{f_s D}{U_0}$, C_D = $\frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 D}$ (8)

در معادله (8) U_0 سرعت جریان آزاد، D قطر کره، f_s فرکانس گردابههای تشکیل شده در پشت کره و λ و η_0 به ترتیب زمان رهایی از تنش و ویسکوزیته کل سیال میباشند. همچنین F_D نیروی درگ کل بوده که شامل هر دو درگ فشاری و اصطکاکی است و C_D ضریب درگ شکلی است که مجموع ضریب درگ اصطکاکی و فشاری است.

3-2- شرايط مرزى

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.56.8

¹ Giesekus

² Power-law

³ Mobility factor ⁴ Upper convected derivative

شرایط مرزی حاکم بر این جریان مطابق با شکل 1، به صورت زیر قابل بیان است:

بر روی سطح کرہ شرط مرزی عدم لغزش به صورت رابطه (9) برقرار است:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0, \frac{\partial \sigma}{\partial n} = 0, u = 0, v = 0, w = 0$$
(9)

همچنین در مرز ورودی فرض بر این است که جریانی با سرعت یکنواخت وارد شود، بنابراین مطابق رابطه (10) میدان تنش و گرادیان فشار در ورودی صفر است:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0, \sigma = 0, u = U_0, v = 0, w = 0$$
⁽¹⁰⁾

در مرز خروجی جریان، گرادیان سرعت و تنش برابر صفر میباشد و فشار برابر فشار اتمسفری در نظر گرفته شده است. بنابراین مطابق رابطه (11) می-توان نوشت:

$$P = P_{atm}, \frac{\partial \sigma}{\partial n} = 0, \frac{\partial u}{\partial n} = 0, \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \frac{\partial w}{\partial n} = 0$$
(11)

برای مرزهای اطرف هم شرط مرزی محیط بینهایت ^۱ مطابق رابطه (12) مورد استفاده قرار گرفته است:

$$\frac{\partial P}{\partial n} = 0, \frac{\partial \sigma}{\partial n} = 0, \frac{\partial u}{\partial n} = 0, \frac{\partial v}{\partial n} = 0, \frac{\partial w}{\partial n} = 0$$
(12)

$$c_{n} \operatorname{valck}(r), (12-9), n \operatorname{valck}(r), (12-9)$$

3- مدلسازی عددی

با توجه به پیچیدگی در هندسه سه بعدی این مساله و همچنین دشواریهای حل معادلات حاکم بر جریان سیال ویسکوالاستیک، می توان با گزینش مناسب نرمافزارهای کامپیوتری حل مناسبی برای این مساله ارائه نمود. در تحقیق حاضر، مدلسازی عددی با استفاده از نرمافزار این فوم^۲ انجام شده است. اپن فوم یک نرمافزار منبع باز^۳رایگان تحت لینوکس که خود یک سیستم عامل منبع باز و رایگان است، میباشد. این نرمافزار شامل یک مجموعه بزرگ از حلگرها^۴ و قابلیتهای^۵ از پیش نوشته شده قابل بهرهگیری در محدوده وسيعى از مسائل مختلف ديناميک سيالات محاسباتي در حوزه مكانيك محيط پيوسته ميباشد. همچنين با داشتن معلومات پيش نياز از روش مورد استفاده در فیزیک مسئله و تکنیکهای برنامهنویسی به زبان ++C می توان حلگر و کاربرد جدید به این نرمافزار اضافه کرد. در این نرمافزار گسستهسازی معادلات بر پایه روش حجم محدود^ع بوده و از الگوریتم سیمپل^۷ جهت حل معادلات غیر خطی و تصحیح فشار در تکرارهای عددی استفاده شده است. در این روش به جای استفاده مستقیم از مقادیر فشار از تصحیح فشار در محاسبات استفاده می گردد. همین امر در مورد میدان سرعت نیز برقرار است. یعنی سرعتهایی که از حل معادله مومنتم و با کمک فشار در گام زمانی قبلی به دست آمدهاند به عنوان مقادیر مبنایی فرض می شوند که تصحیحی باید به آنها اضافه شود.

3-1- تولید دامنه و شبکه محاسباتی

در تحقیق حاضر، جهت حذف اثر دیوارههای محدود کننده (محیط بینهایت) و نیز با بررسی استقلال حل عددی از دامنه محاسباتی، مطابق شکل 1، مقادیر K=6D ال 2011 و X=10D و X=10 و موقعیت کره در

- ⁵ Utilities
- 6 Finite volume method
- 7 Simple

نظر گرفته شده است [20]. جهت تولید شبکهبندی تا حد امکان از شبکه سازمان یافته^۸ استفاده شده است و نیز کنترل شبکه ایجاد شده در اطراف کره، ناحیه محاسباتی مطابق شکل 2، تقسیم بندی شده است.

مطابق شكل 2، مكعب كوچك اطراف كره، به صورت غيرسازمان يافته و مابقى نواحى به صورت سازمان يافته شبكهبندى شدهاند. جدول 1 مقادير ضريب درگ بر روى كره به ازاى مقادير نسبت طول سلول به قطر كره در گرههاى اطراف كره به ازاى سه عدد رينولدز نشان داده شده است. با بررسى استقلال حل عددى از شبكه محاسباتى و مقادير جدول 1 اندازه كوچكترين سلول نسبت به قطر كره در ناحيه مكعب اطراف كره برابر با 0.5، در هشت مكعب اطراف مكعب داخلى برابر با 0.1 و در نواحى اطراف برابر با 0.4 در نظر گرفته شده است.

4- نتایج عددی

در این بخش، نتایج حاصل از حل عددی برای شبیه سازی جریان سیال ناپایا ویسکوالاستیک بر روی یک کره در محیط بینهایت پرداخته میشود. در ابتدا جهت معتبرسازی مدل سازی عددی، به بررسی جریان سیال نیوتنی (= We 0) بر روی کره در محیط بینهایت پرداخته شده است و نتایج حاصله با



Fig. 2 Generated grid for the present numerical solution شکل 2 تولید شبکه محاسباتی برای حل عددی حاضر

8 Stucture

DOR: 20.1001.1.10275940.1396.17.12.56.8

¹ Free stream

OpenFOAM Open source

⁴ Solvers



Fig. 3 Streamlines around sphere verius Reynolds number on *xy* and *xz* planes شکل 3 خطوط جریان سیال نیوتنی اطراف کره به ازای مقادیر مختلف رینولدز در صفحات *xz* و *xz*

همان طور که در جدول 2 مشاهده می شود، مقادیر عدد استروهال برای اعداد رینولدز مختلف برای سیال نیوتنی در اعداد رینولدز 300 و 400 گزارش شده است. مقادیر عدد استروهال برای این دو عدد رینولدز نشان می دهد با افزایش عدد رینولدز و درنتیجه اثرات اینرسی در سیال نیوتنی به علت افزایش فرکانس گردابههای تولیدی در پشت کره عدد استروهال کوچکتر می گردد.



جدول 1 مقادیر ضریب درگ بر روی کره در شبکههای مختلف به ازای سه عدد . . ىنهلد: متفات

 Table 1
 Values of drag coefficient around the sphere for various grids at three differenct Reynolds number

$\Delta x/D$	Re=220	Re=250	Re=270
0.4	0.9854	0.8514	0.8315
0.2	0.9432	0.8125	0.7825
0.1	0.8912	0.7826	0.7413
0.05	0.8707	0.7377	0.7217
0.025	.8706	0.7375	0.7211

تحقیقات گذشته مقایسه می شود. در ادامه به بررسی جریال سیال ویسکوالاستیک (مدل گزیکس) در هندسه ذکر شده پرداخته شده و اثرات پارامترهای مختلف از جمله اعداد بی بعد رینولدز و وایز نبرگ بر الگوی جریان بحث می گردد.

همان طور که ذکر شد در ابتدای این بخش به بررسی جریان سیال نیوتنی (We = 0) بر روی یک کره در محیط بینهایت (مطابق با هندسه مشخص شده در شکل 1) به ازای اعداد رینولدز مختلف پرداخته می شود. در شكل 3، خطوط جريان سيال نيوتني حول كره به ازاى اعداد رينولدز مختلف در صفحات zy و xy ترسیم شده است. همان طور که در شکل 3 مشاهده می شود دو گردابه تشکیل شده در پشت کره تا حدود عدد رینولدز 300 (Re = 300) متقارن بوده و در صفحات zy و xy دو گردابه تقریبا شبیه به هم مشاهده می شوند. با افزایش عدد رینولدز از این دو گردابه تقارن خود را از دست داده و تصویر گردابهها در صفحات zy و xy متفاوت است. در واقع عدد رينولدز 300 عدد رينولدز بحراني بوده ($\mathrm{Re}_{\mathrm{cr}}=300$) و گردابههاي ايجاد شده در پشت کره علاوه بر اینکه تقارن خود را از دست میدهند شروع به ناپايداري ميكنند. براي بررسي چگونگي اين ناپايداري، نمودار اندازه سرعت و 4 فشار در یک نقطه به فاصله 3D از پشت کره بر حسب زمان در شکل ترسیم شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، در اعداد رینولدز کوچکتر از 300 ناپایداری در مقادیر سرعت و فشار مشاهده نمی شود ولي در عدد رينولدز بحراني Re_{cr} = 300 مقادير سرعت و فشار در پشت کره ناپایدار شده و و یک جریان ناپایدار متناوب نسبت به زمان مشاهده می شود. همچنین با بالا رفتن عدد رینولدز و در Re = 400 جریان در پشت کره از حالت تناوب طبیعی خود خارج شده و نمودارهای سرعت و فشار با دامنه های متفاوتی به صورت نامتقارن نوسان میکنند. جهت مقایسه حل عددی تحقیق حاضر و مطالعات پیشین، مقادیر ضریب درگ متوسط بر روی کره برای اعداد رینولدز مختلف در جدول 2 گزارش شده است. نتایج این جدول تطابق خوبي بين نتايج تحقيق حاضر و نتايج تحقيق لي [20] از خود نشان میدهد. اختلاف حدود 10 درصدی مشاهده شده بین نتایج این دو تحقیق احتمالا ناشی از محاسبه ضریب درگ در اطراف کره که یک ناحیه سه بعدی را تشکیل داده است میباشد. در ادامه مقادیر ضریب درگ بر حسب زمان در اعداد رینولدز مختلف در شکل 5 ترسیم شده است. همانطور که در این شکل مشاهده میشود، مقادیر ضریب درگ در زمانهای مختلف بر روی کره نیز از عدد رینولدز 300 به بعد از حالت پایدار خارج شده و دچار نوسان می شود. با افزایش عدد رینولدز و در عدد رینولدز 400، به علت افزایش اینرسی سیال در پشت کره دامنه نواسانات عوض می شود. جهت توصیف جریان نوسانی ایجاد شده در پشت کره می توان با استفاده از رابطه (8) و فركانس مقادير سرعت، عدد استروهال را محاسبه كرد.



Fig. 5 Values of drag coefficient on the sphere versus time at various Reynolds number

شکل 5 مقادیر ضریب درگ بر روی کره بر حسب زمان به ازای مقادیر مختلف عدد رینولدز

خواص ماده مورد استفاده در این تحقیق به صورت رابطه (13) در نظر گرفته شده است [32]:

 $\eta_N = 0.2$ Pa. s, $\eta_E = 0.2$ Pa. s, $\alpha = 0.4$, $\rho = 803 \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3}$ (13)برای بررسی اثرات ناپایداری جریان در پشت کره در شکل 6 مقادیر تغییرات اندازه سرعت و فشار در یک نقطه در فاصله 3D از پشت کره به ازای اعداد رينولدز 400، 500 و 1000 در عدد وايزنبرگ 100 گزارش شده است. همان طور که در شکل 6 مشاهده می شود، برای هر سه عدد رینولدز میدان سرعت و فشار مشاهده شده نوسانی بوده و با افزایش عدد رینولدز فرکانس حرکت گردابهها در پشت کره افزایش مییابد. برای بررسی اثرات تغییرات عدد رینولدز و وایزنبرگ بر نوسانات مشاهده شده در گردابههای ایجاد شده در پشت کره، تغییرات عدد استروهال بر حسب عدد رینولدز و وایزنبرگ در جدول 3 گزارش شده است. همان طور که مقادیر جدول 3 نشان می دهد، با افزایش عدد رینولدز یا به عبارتی افزایش اینرسی جریان، عدد استروهال در گردابههای تولیدی در پشت کره افزایش مییابد. این در حالی است که افزایش عدد وایزنبرگ که در واقع نشان دهنده افزایش خواص الاستیک سیال میباشد، تغییر چندانی در نوسان گردابههای تولیدی در پشت سیلندر ندارد و عدد استروهال با افزایش عدد وایزنبرگ تقریباً ثابت می ماند.





Fig. 4 Values of velocity magnitude and pressure behind the sphere versus time at various Reynolds number

شکل 4 مقادیر اندازه سرعت و فشار در یک نقطه در پشت کره بر حسب زمان به ازای مقادیر مختلف رینولدز

جدول 2 تغییرات متوسط ضریب درگ و عدد استروهال بر روی کره Table 1 Variation of averaged drag coefficient and Strohal number around the sphere

St (Ref [20])	St (تحقيق حاضر)	C _D (Ref [20])	C _D (تحقیق حاضر)	Re
-	-	0.85	0.7807	220
-	-	0.8	0.7377	250
-	-	0.79	0.7217	270
-	0.1224	0.77	0.6964	300
0.137	0.135	0.73	0.6406	400

همچنین عدد استروهال بدست آمده از تحقیق حاضر برای Re=400 تطابق مناسب با عدد استروهال در تحقیق نتایج تحقیق لی [20] را نشان میدهد.

در ادامه این بخش به بررسی تأثیر خواص غیر خطی ویسکومتریک بر روی جریان سیال ویسکوالاستیک بر روی یک کره در محیط بینهایت پرداخته میشود. همان طور که قبلاً ذکر شد، مدل مورد استفاده جهت بررسی معادله متشکله سیال ویسکوالاستیک در این بخش مدل گزیکس است.





Fig. 7 Streamlines around sphere for various Wisenberg number at Re=1000 on *xy* and *xz* planes

شکل 7 خطوط جریان سیال اطراف کره به ازای مقادیر مختلف عدد وایزنبرگ در Re=1000 در صفحات xz و xx

همچنین نشان میدهد در حالت Re=400 با افزایش خواص الاستیک سیال (عدد وایزنبرگ) تغییر چندانی در توزیع فشار اطراف کره مشاهده نمیشود اما با افزایش عدد رینولدز بازه تغییرات فشار در اطراف کره تقریباً پنج برابر می-شود. این بدان معناست که تنش فشاری در اعداد رینولدز بالا فقط تابع عدد رینولدز است و خواص الاستیک سیال در آن تقریباً بی تأثیر است. همچنین شکلهای 9 و 10 تنشهای برشی در راستای جریان را نشان میدهد.

این دو شکل نیز نشان می دهند در اعداد رینولدز بالا خواص الاستیک سیال تأثیر چشمگیری بر روی تنش های برشی بر روی کره ندارد اما افزایش عدد رینولدز باعث افزایش تنش برشی و در نتیجه ضریب درگ اصطکاکی بر روی کره شود. برای مثال در شکل 10 مقدار تنش v_{xy} در پشت کره در حالت Re=400 حدود 30 پاسکال است اما با افزایش عدد رینولدز تا 1000Re مقدار این تنش برشی در پشت کره به حدود 200 پاسکال می رسد. علت این امر را می توان به ناپایدار شدن بیشتر جریان در پشت کره و در نتیجه افزایش درگ اشاره نمود.

با وجود اینکه در سیالات نیوتنی مقدار تنشهای نرمال صفر است اما شکلهای 11 تا 13 نشان میدهند این تنشها در سیال ویسکوالاستیک سهم



Fig. 6 Variation of velocity manitude and pressure behind the sphere for various Reynolds number at We=100

شکل 6 تغییرات مقادیر اندازه سرعت و فشار در پشت کره بر حسب اعداد رینولدز در We=100

جدول 3 تغییرات عدد استروهال بر روی کره بر حسب اعداد رینولدز و وایزنبرگ Table 2 Variation of Strohal number around the sphere versus Reynolds and Wisenberg numbers

Re
RC
400
500
1000
1

مقایسه عدد استروهال از مقادیر جداول 2 و 3 برای Re=400 نشان می دهد که فرکانس گردابههای تشکیل شده در سیال نیوتنی نسبت به سیال ویسکوالاستیک کمتر است. علت این موضوع را میتوان به وجود اختلاف تنش نرمال اول و دوم دانست که در ادامه به توضیح آنها پرداخته می شود. در شکل 7 نمودار خطوط جریان سیال ویسکوالاستیک حول کره به ازای مقادیر مختلف عدد وایزنبرگ در Re=1000 در صفحات zz و x ترسیم شده است.

شكل 7 نشان مى دهد، با افزایش عدد وایزنبرگ به علت افزایش خواص الاستیک سیال در مقابل خواص اینرسی آن، گردابههای ایجاد شده در پشت کره کوچکتر می شوند. جهت بررسی بیشتر اثرات عدد رینولدز و وایزنبرگ بر روی رژیم جریان کانتورهای فشار وتنشهای برشی x_{xx} ، x_{xx} و تنشهای نرمال x_{xx} ، x_{xy} ، σ_{xz} اطرف کره را به ازای Re=400 و 20, 100 we=20 و همچنین در حالت 1000 Re و 2000 بر روی صفحه 0-بر و در لحظه ممچنین در حالت 1000 Re و 2000 بر روی صفحه 0-بر و در لحظه می دهد که فشار در نقطه سکون درجلوی کره به ماکزیمم مقدار خود می دسد و به تدریج با افزایش زاویه از نقطه سکون فشار شروع به کاهش می کند تا به می دهد که فشار در نقطه سکون درجلوی کره به ماکزیمم مقدار خود می دسد نقاط بالا و پایین کره می در درادامه با افزایش زاویه، فشار در پشت کره شروع به کاهش می کند و یک گرادیان فشار معکوس در پشت کره به وجود می آید. به علت بازیابی مومنتم ورودی به مقدار اولیه، دو گردابه در پشت کره شروع به تشکیل می کنند. این گردایها همان طور که قبلاً نیز توضیح داده شروع به تشکیل می کنند. این گردایهها همان طور که قبلاً نیز توضیح داده شد با افزایش اینرسی سیال به تدریج بزرگتر شده و تقارن خود را از دست می دهند و یک جریان ناپایای نوسانی در پشت کره به وجود می آورند. شکل 8



Re=1000,We=100

Fig. 8 Distribution of pressure (Pa) around the sphere on y=0 plane at t=0.11s

شکل 8 توزیع فشار بر حسب پاسکال در اطراف کره بر روی صفحه y=0 در زمان t=0.11s



Re=1000,We=100

Fig. 9 Distribution of σ_{xz} (Pa) around the sphere on y=0 plane at t=0.11sشکل 9 توزیع تنش σ_{xz} بر حسب پاسکال در اطراف کره بر روی صفحه y=0 در زمان t=0.11s



Re=1000,We=100

Fig. 10 Distribution of σ_{xy} (Pa) around the sphere on y=0 plane at t=0.11s

شکل 10 توزیع تنش σ_{xy} بر حسب پاسکال در اطراف کره بر روی صفحه y=0 در t=0.11s زمان t=0.11s

بسزایی در جریان دارند و مقدار آنها از تنشهای برشی حول کره نیز بیشتر است. شکل 11 نشان می دهد با افزایش زاویه از جلوی کره مقدار تنش نرمال در راستای جریان (σ_{xx}) افزایش می یابد و در نقطه جدایش به ماکزیمم مقدار نفسان می دهد با افزایش عدد رینولدز از 400 به 1000 به علت افزایش نشان می دهد با افزایش عدد رینولدز از 400 به 1000 به علت افزایش ناپایداری و فرکانس گردابههای در پشت کره مقدار تنش نرمال x_{xx} از حدود نور به 1000 به علت افزایش می یابد. این در حالی است که افزایش عدد وایزنبرگ از 20 به 40 در حالت 400 این در حالی است که افزایش عدد وایزنبرگ از 20 به 40 در حالت 800–11 تأثیر قابل ملاحظه ای بر توزیع تنش نرمال بر روی کره ندارد. همچنین شکلهای 11 و بر توزیع تنش نرمال ول ($w_{xx} - \sigma_{xx}$) بزرگی در اطراف کره را نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز افزایش قابل ملاحظه ای دارد و از حدود افزایش از اختلاف تنش نرمال ول ($w_{xx} - \sigma_{xx}$) بزرگی در اطراف کره را نشان می دهد که با افزایش عدد رینولدز افزایش قابل ملاحظه ای دارد و از حدود در استان از اختلاف تنش نرمال یکی از عوامل کاهش فرکانس گردابهها در می رسد. این اختلاف تنش نرمال یکی از عوامل کاهش فرکانس گردابه ها در پشت کره و در نتیجه کاهش عدد استروهال می گرد.

مقایسه شکلهای 12 و 13 نشان میدهند با وجود افزایش مقادیر تنشهای نرمال پرو ی⁻ و با افزایش عدد رینولدز مقدار اختلاف تنش نرمال دوم (N₁= σ_{yy}. σ_{zz}) بر روی رژیم جریان قابل ملاحظه نیست.

5- نتیجه گیری

در این تحقیق برای نخستین بار به بررسی ناپایداری جریان سیال ویسکوالاستیک حول یک کره در اعداد رینولدز بالا پرداخته شده است. با توجه به ماهیت سه بعدی گردابههای ناپایا تولیدی در پشت کره که در تحقیقات آزمایشگاهی گذشته بر روی جریان سیال نیوتنی بر روی کره نیز



Fig. 11 Distribution of σ_{xx} (Pa) around the sphere on y=0 plane at t=0.11s

شکل 11 توزیع تنش σ_{xx} بر حسب پاسکال در اطراف کره بر روی صفحه y=0 در زمان t=0.11s



Fig. 12 Distribution of σ_{yy} (Pa) around the sphere on y=0 plane at t=0.11s

شکل 12 توزیع تنش σ_{yy} بر حسب پاسکال در اطراف کره بر روی صفحه y=0 در (مان t=0.11s زمان



 $\begin{tabular}{c} \hline Re=1000, We=100 \\ \hline \end{tabular} \$

شکل 13 توزیع تنش σ_{zz} بر حسب پاسکال در اطراف کره بر روی صفحه y=0 در t=0.11s زمان

گزارش شده بود تحقیق حاضر به بررسی سه بعدی این مسئله پرداخته است. برای بررسی بهتر خواص سیال از مدل غیرخطی گزیکس جهت مدلسازی سیال ویسکوالاستیک استفاده شده است. با تقسیم بندی دامنه محاسباتی به نواحی مختلف امکان اعمال شبکه سازمان یافته در قسمت اعظمی از ناحیه محاسباتی مهیا شده است. حل عددی تحقیق حاضر به روش حجم محدود و با استفاده از کد عدد منبع باز اپن فوم انجام گرفته است. در ابتدا با در نظر گرفتن 0=We به بررسی جریان سیال نیوتنی حول کره پرداخته شده است. ترسیم خطوط جریان نشان میدهد که در 300 = Re_{cr} گردابههای تولیدی در پشت کره از حالت تقارن خارج شده و یک جریان ناپایا در پشت کره تشکیل می شود. با ترسیم مقادیر اندازه سرعت و فشار در یک نقطه پشت کره یر برسی این پدیده عدد استروهال معرفی و استفاده شده است. با افزایش عدد رینولدز فرکانس حرکت گردابهها و در نتیجه عدد استروهال در پشت کره رینولدز فرکانس حرکت گردابهها و در نتیجه عدد استروهال در پشت کره رینولدز فرکانس می می از در نتیجه عدد استروهال در پشت کره

در ادامه برای بررسی جریان ناپایای سیال ویسکوالاستیک بر روی کره و شروع ناپایداری جریان، اثرات خواص الاستیک جریان بر روی کره به ازای Re> 300 که در آن جریان به حالت ناپایا رسیده است، بررسی شده است. نتایج این بررسی نشان میدهد در اعداد رینولدز بالا با افزایش عدد رینولدز از 400 به 1000 عدد استروهال تقریباً 2.5 برابر میشود و این در حالی است که در حالت 1000 عدد استروهال تقریباً 2.5 برابر میشود و این در حالی است که افزایش حدودا 4 درصدی دارد که این ناشی از تأثیر کم خواص الاستیک در اعداد رینولدز بالا عدد استروهال دارد، اما افزایش عدد رینولدز به شدت سبب افزایش فرکانس گردابهها در پشت کره و در نتیجه عدد استروهال دارد. intermediate Reynolds numbers, *The Physics of Fluids*, Vol. 12, No. 5, pp. 949-959, 1969.

- [11] H. Hanazaki, A numerical study of three-dimensional stratified flow past a sphere, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 192, No. 1, pp. 393-419, 1988.
- [12] E. J. Chang, M. R. Maxey, Unsteady flow about a sphere at low to moderate Reynolds number, Part 2. Accelerated motion, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 303, No. 1, pp. 133-153, 1995.
- [13] J. Magnaudet, M. Rivero, J. Fabre, Accelerated flows past a rigid sphere or a spherical bubble, Part 1. Steady straining flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 284, No. 1, pp. 97-135, 1995.
- [14] H. Sakamoto, H. Haniu, A study on vortex shedding from spheres in a uniform flow, ASME, Transactions, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 112, No. 4, pp. 386-392, 1990.
- [15] E. Achenbach, Vortex shedding from spheres, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 62, No. 2, pp. 209-221, 1974.
- [16] R. Clift, J. R. Grace, M. E. Weber, Bubbles, Drops, and Particles: Courier, pp. 30-66, New York: Dover publication, 2005.
- [17] I. Kim, A. J. Pearlstein, Stability of the flow past a sphere, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 211, No. 1, pp. 73-93, 1990.
- [18] R. Natarajan, A. Acrivos, The instability of the steady flow past spheres and disks, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 254, No. 1, pp. 323-344, 1993.
- [19] D. Hartmann, M. Meinke, W. Schröder, A strictly conservative Cartesian cut-cell method for compressible viscous flows on adaptive grids, *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, Vol. 200, No. 9, pp. 1038-1052, 2011.
- [20] S. Lee, A numerical study of the unsteady wake behind a sphere in a uniform flow at moderate Reynolds numbers, *Computers & Fluids*, Vol. 29, No. 6, pp. 639-667, 2000.
- [21] C. L. Lin, S. Lee, Transient state analysis of separated flow around a sphere, *Computers & Fluids*, Vol. 1, No. 3, pp. 235-250, 1973.
- [22] R. Chhabra, P. Uhlherr, D. Boger, The influence of fluid elasticity on the drag coefficient for creeping flow around a sphere, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 6, No. 3-4, pp. 187-199, 1980.
- [23] M. T. Arigo, G. H. McKinley, An experimental investigation of negative wakes behind spheres settling in a shear-thinning viscoelastic fluid, *Rheologica Acta*, Vol. 37, No. 4, pp. 307-327, 1998.
- [24] B. Akers, A. Belmonte, Impact dynamics of a solid sphere falling into a viscoelastic micellar fluid, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 135, No. 2, pp. 97-108, 2006.
- [25] R. Vargas, O. Manero, T. N. Phillips, Viscoelastic flow past confined objects using a micro-macro approach, *Rheologica Acta*, Vol. 48, No. 4, pp. 373-395, 2009.
- [26] K. D. Housiadas, R. I. Tanner, Perturbation solution for the viscoelastic 3D flow around a rigid sphere subject to simple shear, *Physics of Fluids*, Vol. 23, No. 8, pp. 083101, 2011.
- [27] Z. Yu, A. Wachs, Y. Peysson, Numerical simulation of particle sedimentation in shear-thinning fluids with a fictitious domain method, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 136, No. 2, pp. 126-139, 2006.
- [28] A. Putz, T. Burghelea, I. Frigaard, D. Martinez, Settling of an isolated spherical particle in a yield stress shear thinning fluid, *Physics of Fluids*, Vol. 20, No. 3, pp. 033102, 2008.
- [29] O. G. Harlen, The negative wake behind a sphere sedimenting through a viscoelastic fluid, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 108, No. 1, pp. 411-430, 2002.
- [30] X. Frank, H. Z. Li, Negative wake behind a sphere rising in viscoelastic fluids: A lattice Boltzmann investigation, *Physical Review E*, Vol. 74, No. 5, pp. 056307, 2006.
- [31] F. Ahonguio, L. Jossic, A. Magnin, Influence of surface properties on the flow of a yield stress fluid around spheres, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 206, No. 1, pp. 57-70, 2014.
- [32] J. Azaiez, R. Guenette, A. Ait-Kadi, Entry flow calculations using multimode models, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 66, No. 2, pp. 271-281, 1996.

ترسیم خطوط جریان در اطراف کره نشان از کوچکتر شدن گردابههای تولیدی در پشت کره با افزایش عدد وایزنبرگ را دارد. همچنین با ترسیم کانتورهای توزیع فشار و تنش برشی در اطراف کره تأثیر ناچیز اثرات الاستیک در مقابل اثرات اینرسی بر روی این پارامترها نیز مشاهده گردید. در ادامه با ترسیم کانتور تنشهای نرمال اطراف کره مشاهده گردید که بر خلاف سیال نیوتنی که در آن مقادیر این تنشها صفرند در سیالات ویسکوالاستیک تنش نرمال مقادیر بیشتری حتی نسبت به تنش برشی دارند. برای مثال در حالت Re=1000 و We=100 تنش نرمال σ_{xx} در پشت کره حدود 7 برابر تنش برشی σ_{xy} در پشت کره است و این یکی از عوامل کاهش عدد استروهال در سیالات ویسکوالاستیک نسبت به سیالات نیوتنی است. نتایج همچین نشان میدهد که σ_{xx} نسبت به دیگر تنشها سهم بیشتری در نیروی الاستیک وارد بر کره دارد و با افزایش عدد رینولدز این سهم افزایش چشمگیری میکند. نتایج همچنین نشان داد بر خلاف اختلاف تنش نرمال دوم که مقدار ناچیزی در این جریان دارد اختلاف تنش نرمال اول نیز یکی دیگر از پارامترهایی است که که بر روند الگوی جریان تأثیر داشته و با افزایش عدد رینولدز از 400 به 1000 این پارامتر نیز یک افزایش حدود 4 برابری دارد.

6- تقدير و تشكر

این مقاله مستخرج از یک طرح پژوهشی درون مؤسسهای است که از سوی دانشگاه صنعتی شاهرود مورد حمایت است. لذا نویسندگان از حمایتهای مالی و معنوی دانشگاه تشکر و قدردانی مینمایند.

7- مراجع

- H. A. Barnes, J. F. Hutton, K. Walters, An Introduction Tto Rheology, pp. 50-67, Amesterdam: Elsevier, 1989.
- [2] G. G. Stokes, On the Effect of the Internal Friction of Fluids on the Motion of Pendulums, pp. 20-45, Cambridge: Pitt Press, 1851.
- [3] W. Chester, D. Breach, I. Proudman, On the flow past a sphere at low Reynolds number, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 37, No. 4, pp. 751-760, 1969.
- [4] H. Pruppacher, B. Le Clair, A. Hamielec, Some relations between drag and flow pattern of viscous flow past a sphere and a cylinder at low and intermediate Reynolds numbers, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 44, No. 4, pp. 781-790, 1970.
- [5] S. Taneda, Experimental investigation of the wake behind a sphere at low Reynolds numbers, *Journal of the Physical Society of Japan*, Vol. 11, No. 10, pp. 1104-1108, 1956.
- [6] I. Nakamura, Steady wake behind a sphere, *The Physics of Fluids*, Vol. 19, No. 1, pp. 5-8, 1976.
- [7] R. Magarvey, R. L. Bishop, Transition ranges for three-dimensional wakes, *Canadian Journal of Physics*, Vol. 39, No. 10, pp. 1418-1422, 1961.
- [8] B. Fornberg, Steady viscous flow past a sphere at high Reynolds numbers, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 190, pp. 471-489, 1988.
- [9] J. Ockendon, The unsteady motion of a small sphere in a viscous liquid, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 34, No. 2, pp. 229-239, 1968.
- [10] Y. Rimon, S. Cheng, Numerical solution of a uniform flow over a sphere at

Downloaded from mme.modares.ac.ir on 2024-05-03