ماهنامه علمى پژوهشى

مهندسی مکانیک مدرس

mme.modares.ac.ir



# یک مدل جبری جدید بر مبنای تانسور همبستگی سرعت برای شبیه سازی مستقیم عددی کاهش درگ آشفته به کمک افزودنیهای میکروفیبر

امین موسائی<sup>1\*</sup>، کوروش گودرزی<sup>1</sup>، جلیل عباسی<sup>2</sup>

1- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

2- دانش آموخته کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه یاسوج، یاسوج

\* ياسوج، صندوق پستى moosaie@yu.ac.ir ،75914-353

چکیدہ	اطلاعات مقاله
در این مقاله، یک مدل بستگی جبری برای شبیهسازی مستقیم عددی کاهش درگ آشفته در جریان کانال به کمک افزودنی های میکروفیبر	مقاله پژوهشی کامل
پیشنهاد شده است. این مدل توسعهای از یک مدل موجود در جهت رفع برخی نواقص آن است. در این مدل پیشنهادی، با درنظر گرفتن تانسور	دریافت: 06 تیر 1393
همبستگی سرعت در فرآیند مدلسازی، شرایط فیزیکی بیشتری از جریان آشفته در مدل دخیل است. با این کار، بخشی از نواقص مدلهای	پذیرش: 14 مرداد 1393
در مرقب در این مدل بر زندانی با مرضواری برای شریبانی مرتبی می تو میدو کرهانی در ماله خوانی با درنظر گرفتن تانسور	ارائه در سایت: 17 آبان 1393
ببری ببی برعرف شده شده بسی پیشهدی بری شبیسی می سیم عرفی سیم عدی فلس بری خدی معنی در است بری عدل می معن عربین	<i>کلید واژگان:</i>
فشار ثابت به کار رفته است. برای این منظور، معادلات ناویر -استوکس سهبعدی و وابسته به زمان برای جریان تراکم ناپذیر یک سیال غیرنیوتنی	جریان کانال آشفته
به صورت عددی حل شده است. کمیتهای آماری بهدست آمده از مدل جدید در مقایسه با شبیهسازی حل دقیق مونت-کارلو و مدلهای جبری	کاهش درگ
پیشین آورده شدهاند. انطباق خوب نتایج نشان از دقت مناسب مدل جدید دارد. بهطور خاص، جذر متوسط مربعات نوسانهای سرعت در جهت	مدل بستگی جبری
اصلی جریان با دقت بسیار بیشتری نسبت به مدلهای قبلی پیشبینی شده است. دیگر کمیتهای آماری نیز با دقت مناسبی محاسبه شدهاند.	شبیهسازی مستقیم عددی
این مدل همه ویژگی های جریان کاهش درگ یافته به کمک میکروفیبر را پیشربینی میکند.	تانسور همبستگی سرعت

## A new algebraic model based on the velocity correlation tensor for DNS of turbulent drag reduction by microfiber additives

Amin Moosaie<sup>1\*</sup>, Kourosh Goudarzi<sup>1</sup>, Jalil Abbasi<sup>1</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Yasouj University, Yasouj, Iran. \* P.O.B. 75914-353 Yasouj, moosaie@yu.ac.ir

ARTICLE INFORMATION	Abstract
Original Research Paper Received 27 June 2014 Accepted 05 August 2014 Available Online 08 November 2014	In this paper, a new algebraic closure model for the DNS of turbulent drag reduction in a channel flow using microfiber additives is presented. This model is an extension of an existing model and cures some of the shortcomings of the old model. In the proposed model, using the velocity correlation tensor in the modeling process, more physical conditions of the flow field are taken into account. With this, some of the shortcomings of other models are cured. The proposed model is used to directly simulate turbulent drag reduction in a horizontal channel flow under the action of a constant pressure gradient. For this purpose, time-dependent, three-dimensional Navier-Stokes equations for the incompressible flow of a non-Newtonian fluid are numerically solved. Statistical quantities obtained by the new model are compared with the results of previous simulations. Good agreement between the results demonstrates the proper accuracy of the new model. Especially, the root-mean-square of velocity fluctuations in the streamwise direction is predicted with high accuracy as compared to previous models. Other statistical quantities are also computed with appropriate accuracy. This model is capable of predicting all properties of a microfiber-induced drag-reduced flow.
Keywords: Turbulent channel flow drag reduction algebraic closure model direct numerical simulation velocity correlation tensor	

### 1 - مقدمه

مشخص حرکت میکند. جریان آشفته در نزدیکی دیواره را میتوان به سه لایه مجزا تقسیم بندی کرد که شامل زیر لایه لزج، لایه بافر و ناحیه لگاریتمی است. جریان در زیر لایه لزج آرام است. آرام بودن جریان در زیر لایه لزج بهمعنای دایم بودن جریان نیست، بلکه جریان در این ناحیه، بهدلیل نفوذ اثر جریان آشفته لایه بالای آن غیردایم است. با توجه به این که لایههای بالاتر آشفتهتر هستند، توسط مكانيزم تزريق و جاروب در جريان آشفته، سيال با سرعت بالا از ناحیه دور از دیوار به نزدیک دیواره پمپ می شود. این عمل باعث افزایش

از مباحث مهم و بسیار پیچیده در زمینه مکانیک سیالات مبحث جریان های آشفته است. با توجه به نامگذاری آن مشهود است که دارای رفتاری بسیار اتفاقی و بیسازمان است. به واسطه فر آیندهای اختلاطی شدید، به جز در نواحی بسیار نزدیک به دیواره، شکل لایههای جریان بهراحتی قابل تشخیص نبوده و ذرات سیال مسیرهای مشخص و از پیش تعیین شدهای را طی نمیکنند. این رفتار برخلاف رفتار جریان آرام است که در آن سیال تحت لایهها و مسیرهای

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید: A. Moosaie, K. Goudarzi, J. Abbasi, A new algebraic model based on the velocity correlation tensor for DNS of turbulent drag reduction by microfiber additives, Modares Mechanical Engineering, Vol. 14, No. 16, pp. 223-230, 2015 (In Persian)

Please cite this article using:

گرادیان سرعت متوسط و در نتیجه افزایش نیروی درگ لزج بر روی دیواره میشود[1]. بنابراین، آشفتگی باعث افزایش قابل ملاحظه درگ اصطکاکی میشود. این پدیده به نوبه خود موجب افزایش مصرف انرژی و در نتیجه کاهش بهرهوری اقتصادی و نیز افزایش آلایندگی محیط زیست میشود.

در مسایل صنعتی و مهندسی، بهدنبال راهی برای کاهش درگ آشفته هستیم. نیروی درگ در جریانهای داخلی به صورت افزایش در افت فشار و نیاز به توان پمپاژ بیشتر و در جریانهای خارجی به صورت افزایش در توان مورد نیاز سیستمهای پیشرانش و جلو برنده ظاهر می شود. از این رو، جای تعجب نیست که سالیان متمادی همواره سعی شده که این نیرو در کمترین مقدار ممکن قرار داشته باشد. برخی از روشهای موجود برای کاهش درگ اصطکاکی عبارتاند از: افزودنیهای پلیمری و فیبری [۲،3]، استفاده از حباب و میکروحباب[4] و ریبلتها[5].

در این پژوهش، پدیده کاهش درگ آشفته بهوسیله افزودن میکروفیبرها (پلیمرهای صلب) مورد توجه قرار گرفته است. پلیمرها به دو دسته انعطاف پذیر و صلب میلهای شکل تقسیم میشوند. پلیمرهای انعطاف پذیر در مقایسه با پلیمرهای صلب (فیبرها) درگ را در سطح بالاتری کاهش میدهند، اما حالت ارتجاعی آنها سبب میشود که در یکدیگر فرو رفته و خواص خود را در کاهش درگ جریان آشفته ازدست دهند. بنابراین، کاهش درگ ناشی از فیبرها پایدارتر از کاهش درگ ناشی از پلیمرهای انعطاف پذیر است[2]. در ضمن، پیشنهاد شده برای کاهش درگ از پلیمرهای صلب و انعطاف پذیر به-صورت همزمان نیز استفاده شود که در این زمینه تحقیقات زیادی صورت نگرفته و یک مسأله پژوهشی باز است.

بررسی پدیده کاهش درگ، بهدلیل مطالعه بنیادی فیزیک جریان کاهش درگ یافته و همچنین بهدلیل کاربرد زیاد آن در صنایع گوناگون، بهعنوان مثال در حرکت زیردریایی، حمل و نقل مایعات و لولههای آتشنشانی اهمیت بسیاری دارد. در سالهای اخیر، مطالعات مبسوطی بهمنظور شناخت مکانیزم تأثیرگذاری فیبرها بر جریان آشفته و همچنین نقش پارامترهای مختلف بر میزان کاهش درگ صورت گرفته است. در گذشته، بهدلیل کمبود امکانات محاسباتی و نیز عدم وجود مدل های رئولوژیکی دقیق برای جریان های سوسپانسیون فیبر، پژوهشها معمولاً فقط بهصورت آزمایشگاهی و نظری انجام گرفته است. اما، امروزه، با پيدايش روش شبيهسازى مستقيم عددى (DNS)، تحلیل کمیتهای جریان آشفته به صورت بسیار دقیق انجام می گیرد. یک جریان آشفته شامل طیف وسیعی از مقیاسهای مکانی و زمانی است. شبیهسازی مستقیم عددی برای یک میدان جریان آشفته تمامی مقیاسهای مکانی و زمانی را بهدقت شبیهسازی میکند و طیف کامل مقیاسهای جریانی، اعم از بزرگترین گردابهها که در مرتبه طول مقیاس هندسی جریان میباشند تا کوچکترین گردابهها در طول مقیاس کولموگروف را بهطور کامل تحت سیطره محاسباتی خود در می آورد.

جریان آشفته سوسپانسیون فیبر دارای معادلات حاکم پیچدهای است، زیرا، علاوهبر حل میدان جریان، باید تأثیر دینامیک فیبرها و رئولوژی آنها نیز درنظر گرفته شود. اثرگذاری فیبرها بر روی جریان، با درنظر گرفتن فرضیاتی که در ادامه مطرح میشوند، توسط یک تانسور تنش غیرنیوتنی بیان میشود. این تنش تابع جهتگیری ذرات معلق است. جهتگیری فضایی میکروفیبرها توسط تابع توزیع احتمال جهتگیری توصیف میشود. همچنین، تابع توزیع احتمال جهتگیری نیز از حل معادله فوکر -پلانک بهدست میآید. معادله فوکر -پلانک تابعی از دو متغیر در فضای حالت، سه متغیر در فضای فیزیکی اقلیدسی و همچنین زمان است. بنابراین، حل معادله فوکر -پلانک،

بهدلیل ابعاد بالای آن (شش بعد)، بهوسیله روشهای عددی معمول کاربردی نیست. حجم چشمگیر محاسبات شبیهسازی مستقیم عددی برای سیال نیوتنی بدون حضور فیبرها، که تقریباً متناسب با توان سوم عدد رینولدز است، این تکنیک را در حال حاضر محدود به جریانهای با عدد رینولدز کوچک تا متوسط کرده است. حال، چنانچه فیبرها هم اضافه شوند، حجم محاسبات مورد نیاز بسیار بالا خواهد بود. این موضوع موجب شده است که محققان به ارائه مدلهای نسبتاً ساده مهندسی برای شبیهسازی مستقیم عددی پدیده کاهش درگ با استفاده از کامپیوترهای شخصی در مدت زمان قابل قبول و پاسخهایی با دقت بالا تمایل داشته باشند.

اورلاندی [6] یکی از پیشگامان DNS جریان کاهش درگ یافته به کمک افزودنیهای پلیمری است. وی با معرفی یک مدل ساده از پلیمرهای ناهمسانگرد کششی در جریان توسعه یافته در داخل کانال کاهش درگ را بررسی نمود. این مدل بهوسیله نتایج آزمایشگاهی و یافتههای تئوری پشتیبانی میشود که نشان میدهند، در جریان کاهش درگ یافته، پلیمر باعث لزجت کششی بالا و تغییرات اندک در لزجت برشی میشود. مدل اورلاندی می گوید که لزجت ناهمسانگرد ناشی از پلیمرها برپایه تانسورهای نرخ کرنش و نرخ چرخش محاسبه میشود. لزجت کششی موقعی به وجود می آید که اختلاف نرخ کرنش از نرخ چرخش از یک مقدار از پیش تعریف شده بیشتر باشد. مدل ساده او قادر است که ویژگیهای اساسی جریان کاهش درگ یافته را پیشبینی کند. با این حال، هنوز راههای زیادی برای بهبود مدل پلیمر معلق در جریان سیال آشفته وجود داشت.

دن توندر و همکاران [7] برای مطالعه کاهش درگ از یک مدل مبتنی بر لزجت غیرایزوتروپ، که اثر فیبرهای صلب را درنظر می گیرد، استفاده کردند. این مدل براساس این فرض است که جهت فیبر بهطور کامل با بردار محلی سرعت جریان در یک راستاست. بعدها مانهارت و فریدریش[8] از این مدل برای مطالعه جریان آشفته کاهش درگ یافته در جریان کانال استفاده و به کمک آن تأثیر برخی پارامترها بر میزان کاهش درگ را بررسی کردند.

هر دو مدل فوق کاملاً لزج هستند که با موفقیت کامل به پیش بینی کاهش درگ در جریان آشفته دست یافتند. این حقیقت در راستای تئوری کاهش درگ پیشنهاد شده توسط لاملی[3] است که اثرات لزج را مسئول کاهش درگ میداند. این تئوری در تقابل با تئوری الاستیک تابور و دی جینیس[9] است که اثرات الاستیک را مسئول کاهش درگ میدانند. اثرات ویسکوز کافی هستند تا جریان از خود کاهش درگ نشان دهد، هر چند شواهد تجربی و عددی وجود دارند که نشان میدهند الاستیسیته سوسپانسیون در کاهش درگ به وسیله یا میکروفیبرها ب یدیده گذار از حالت پیچه به حالت گسترش یافته و آغاز کاهش درگ مؤثر است. البته، شایان ذکر است که گیلیسن[10] به وسیله حل عددی نشان داد که الاستیسیته پلیمر نقش حاشیهای در مکانیزم کاهش درگ دارد.

شبیهسازی جریانهای سوسپانسیون فیبر را میتوان بهصورت کوپل یک-طرفه و یا دوطرفه انجام داد. در کوپل یکطرفه، اثر میدان جریان بر فیبرها درنظر گرفته میشود و از اثرگذاری فیبرها بر روی میدان جریان صرفنظر میشود، ولی، در کوپل دوطرفه، اثرات میدان جریان و دینامیک فیبرها بر روی هم بهطور همزمان درنظر گرفته میشود. برای شبیهسازی جریانهای کاهش درگ یافته به کمک میکروفیبر سه روش کلی وجود دارد که عبارتاند از: روش مستقیم، روش تقریب گشتاور و روش مدل جبری. کارهای انجام شده در زمینه شبیهسازی در ادامه ارائه شدهاند.



شکل 1 میکروفیبر صلب و بردار جهت گیری فضایی آن

مانهارت[11] یک حلگر مستقیم مونت-کارلو برای محاسبه دینامیک جهت گیری فیبرها پیشنهاد کرد. او از شبیه سازی یک طرفه در جریان کانال آشفته استفاده كرد و اثر ضريب نفوذ براونى و ضريب منظر در تنش غیرنیوتنی ناشی از فیبرها را مورد مطالعه قرار داد. شبیهسازی دوطرفه کاهش درگ اولینبار بهوسیله پاشکویتز و همکاران[12] در جریان کانال آشفته با استفاده از روش تقریب گشتاور همراه با مدل بستگی ترکیبی و برازش بهینه بر پایه نامتغیرها ارائه شد. آنها نشان دادند فیبرهای غیربراونی نسبت به فيبرهاى براونى در كاهش درگ نقش مؤثرترى دارند و ماكزيمم كاهش درگ از فیبرهای غیربراونی حاصل می شود. این نتیجه در تطابق است با این حدس که اثرات لزج بهطور اصلی مسئول کاهش درگ توسط فیبرها هستند. باید توجه داشت که در مورد فیبرها، الاستیسیته، که مربوط به حرکت براونی دورانی فیبرهاست، نیز مهم است[13]. پس از آن، گیلیسن و همکاران[15،14] شبیهسازی کاهش درگ در کانال را براساس روش تقریب گشتاور به کمک مدل بستگی برازش بهینه برپایه مقدار ویژه انجام دادند. موسائی[16] برای نخستینبار حل دو طرفه مستقیم (دقیق) از طریق حل معادله فوکر -پلانک به کمک یک روش اویلری -لاگرانژی استوکاستیک مونت -كارلو را ارائه نمود. نتايج اين تحقيق، همچنين، در مرجع [17] ارائه شده است. این حل نشان داد که شبیه سازی با استفاده از روش تقریب گشتاور به-ویژه در نزدیکی دیوار دقت کافی ندارد و در نتیجه میزان کاهش درگ را به-درستی پیشبینی نمی کند. اخیراً، موسائی[18] استفاده از روش میدانهای تصادفی برای شبیهسازی مستقیم عددی کاهش درگ آشفته به کمک میکروفیبرها را پیشنهاد داده است. وی نشان داد که این روش دارای دقت بالا و حجم محاسبات قابل قبولي است.

محاسبه مستقيم ديناميک فيبرها در مقايسه با روش تقريب گشتاور بسیار حجیم است و نیاز به سوپرکامپیوترهای بزرگ دارد[16]. روش تقریب گشتاور حجم محاسبات کمتری دارد، اما حجم محاسبات آن کماکان می تواند قابل توجه باشد، بهویژه اگر از یک مدل بستگی گشتاور پیچیده استفاده شود. علاوهبر این، معادله تقریب گشتاور فاقد جمله نفوذ فضایی است و بنابراین بدیهی است حل عددی آن ساده نبوده و دقت ویژهای را می طلبد. برای رفع این مشکلات، استفاده از روش مدلهای جبری پیشنهاد می شود. اور لاندی[6] و همچنین دن توندر و همکاران[7] از این روش برای شبیهسازی کاهش درگ استفاده کردهاند. مدل های جبری آن ها مشکلاتی داشت. در توسعه روش های مدل بستگی جبری، اخیراً، مدل جبری VAF توسط موسائی و مانهارت[19] پیشنهاد شده است. با استفاده از این مدل جبری برخی از مشکلات مدلهای قبلی رفع شده است. در این مدل، فرض شده است که فیبرها با بردار سرعت نوسانی جریان آشفته همراستا هستند. با توجه به کاهش قابل توجه حجم محاسبات در این مدل، شبیه سازی جریان کاهش درگ یافته فیبری در اعداد رينولدز برشى بالانيز بررسى شده است[20]. نتايج شبيهسازى اين مدل براى كميتهاى آمارى با مطالعات قبلى مطابقت قابل قبولى دارند. مدل جبرى VAF هنوز دارای این مشکل است که در ناحیه مرکز کانال و به دور از

دیوارها، تانسور گشتاور دوم تابع توزیع جهت گیری فیبرها را بهدرستی پیش-بینی نمی کند. در این مقاله، این مشکل با استفاده از تانسور همبستگی سرعت برطرف شده است.

ادامه این مقاله بهترتیب زیر ارائه شده است. در بخش دوم، بهاختصار فرضیات درنظر گرفته شده برای حل جریان غیرنیوتنی سوسپانسیون فیبر معرفی میشوند. در بخش سوم، تئوری و معادلات حاکم بر مسئله بیان میشوند. بخش چهارم به معرفی مدلهای بستگی جبری می پردازد. در بخش پنجم، مدل جدید پیشنهادی آورده شده، در بخش ششم روشهای عددی و پارامترهای شبیهسازی ارائه میشوند. بخش هفتم به گزارش نتایج شبیهسازی می پردازد و نهایتاً مقاله در بخش هشتم نتیجه گیری شده است.

#### 2- فرضيات اساسي

مفروضاتی که در این مقاله مورد استفاده قرار می گیرند، در زیر آورده شدهاند. فيبرهاى معلق در جريان، صلب و به شكل بيضي گون هستند. از حركت براوني دورانی فیبرها صرفنظر شده است. حرکت براونی دورانی ناشی از بمباران فيبرها توسط مولكولهاى سيال اطراف آن است. تمام فيبرهاى معلق در جریان دارای اندازه و خواص یکسان هستند. طول فیبرها از کوچکترین گردابههای جریان یعنی مقیاس طولی کولموگروف، کوچکتر است. بهدلیل اینکه فیبرهای مورد استفاده بسیار کوچک هستند، جریان اطراف آنها خزشی درنظر گرفته می شود و می توان از اثرات اینرسی جریان چشمپوشی کرد. همچنین، از کشش سطحی میان سیال و ذرات صرفنظر میشود. سیال حامل بدون حضور میکروفیبرهای معلق یک سیال نیوتنی است و اثرات غیرنیوتنی صرفاً ناشی از حضور فیبرهاست. از بردار یکه محوری  $ec{n}$  مطابق شکل 1 برای توصیف ریاضی جهت گیری فضایی ذرات فیبر استفاده می شود.

یکی از خواص هندسی مهم فیبرها ضریب منظر آنها یعنی r = Lla است که در آن L نصف طول فیبر و همچنین a شعاع استوای فیبر است. برای فیبرها،  $\mathbf{1} < r$  است و با افزایش بیشتر r فیبرها تمایل به ناز کتر شدن پیدا میکنند. براساس یافتههای تجربی، فیبرهای با ضریب منظر بزرگتر از 30 برای کاهش درگ مناسب هستند. همچنین، هنگامی که r حدوداً بزرگ-تر از 100 است، افزایش بیشتر r سبب تغییر کیفی در رفتار تنشهای غیرنیوتنی نشده و فقط تغییرات کمی را درپی دارد.

بهدلیل کاهش حجم محاسبات و یکسان بودن کیفی نتایج هنگامی که سوسپانسيون نيمهرقيق و يا رقيق درنظر گرفته شود، در اين پژوهش، سوسپانسیون فیبر رقیق درنظر گرفته شده است. برای دستهبندی سوسپانسیون به رژیمهای مختلف، نیاز به پارامترهایی برای کمیسازی غلظت است. دو پارامتر مهم برای این منظور کسر حجمی  $\phi$  و چگالی عددی n است که با استفاده از روابط (1) و (2) تعریف می شوند:

$$\phi = \frac{V_p N_p}{V_t} = n V_p \tag{1}$$

$$x = \frac{V_p}{V_t} \tag{2}$$

که در آن  $N_p$  تعداد ذرات،  $V_t$  حجم کل سوسپانسیون و  $V_p$  حجم یک ذره است. شرایط برقراری سوسپانسیون رقیق عبارت است از  $\mathbf{1} > \phi r^2$  که در آن میتوان از تعاملات مكانيكي (تأثير مستقيم فيبرها بر روى يكديگر بهدليل تماس مكانيكي) و تعاملات هیدرودینامیکی (تأثیر فیبرها بر روی همدیگر از راه دور، بدون تماس مستقیم و از طریق میدان جریان سیال حامل) صرفنظر کرد. حالت نیمهرقیق در محدودہ  $\phi r$  < 1 <  $\phi r^2$  حاصل می شود که فقط تعاملات هیدرودینامیکی مهم هستند. همچنین، سوسپانسیون فیبر غلیظ نیز برای حالت r < rایجاد می شود که در آن تعاملات مکانیکی و هیدرودینامکی هر دو پر اهمیت هستند.

#### 3- تئوري و معادلات حاكم

با درنظر گرفتن فرضیات پیش گفته، تأثیر فیبرها بر روی جریان را میتوان توسط تانسور تنش غیرنیوتنی نشان داد. معادلات حاکم بر جریان معادلات ناویر -استوکس غیر نیوتنی تراکم ناپذیر هستند که توسط روابط (3) و (4) بيان مىشوند:

$$\nabla \cdot \vec{U} = \mathbf{0} \tag{3}$$

$$\rho \frac{DU}{Dt} = -\nabla P + \nabla \cdot (\underline{\tau}^{N} + \underline{\tau}^{NN})$$
(4)

که در روابط بالا، abla اپراتور نابلا،  $ec{U}$  میدان برداری سرعت، hoچگالی سیال حامل و P میدان فشار است. مشتق مادی بردار سرعت نیز به شکل رابطه (5) توصيف مىشود:

$$\frac{D}{Dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla$$
(5)

نمادهای ۵ و ۳ بهترتیب ضرب دیادیک و ضرب اسکالر هستند. تانسور تنش نيوتنى  $\frac{\pi}{2}$  طبق قانون لزجت نيوتن بهصورت رابطه (6) توصيف مىشود:

 $\underline{\tau}^N = \mathbf{2}\mu D$ (6)

در رابطه (6)، µ ضریب لزجت دینامیکی سیال حامل و <u>D</u> تانسور نرخ کرنش است:  $\underline{D} = \frac{\mathbf{I}}{2} (\nabla \circ \vec{U} + \vec{U} \circ \nabla)$ (7)

به منظور بسته شدن معادلات ناویر -استوکس (3) و (4)، نیاز به تانسور تنش غیرنیوتنی <u>۲<sup>NN</sup> ا</u>ست. براساس تئوری رئولوژی برنر[21]، تانسور تنش غیرنیوتنی وابسته به گشتاورهای آماری دوم و چهارم تابع توزیع جهتگیری<sup>ا</sup> فیبرهاست. بنابراین، نیاز به دانستن دینامیک جهت گیری فیبرها در میدان  $\psi(\vec{n}; \vec{x}, t)$  جریان است که با استفاده از تابع توزیع جهت گیری فیبرها توصيف می شود. ( $\vec{n}; \vec{x}, t$  بيان کننده احتمال يافتن فيبری در جهت  $\vec{n}$  در نقطه  $\vec{x}$  از میدان جریان در زمان t است. ( $\psi(\vec{n}; \vec{x}, t)$  بیان کننده احتمال یافتن فیبری در جهت  $\vec{n}$  در نقطه  $\vec{x}$  از میدان جریان در زمان t است. برای بهدست آوردن تابع توزيع جهت گيري بايد معادله فوكر -پلانك<sup>2</sup> (8) حل شود:

$$\frac{\partial \psi}{\partial t} + \vec{U} \cdot \nabla \psi = -\nabla_n \cdot (\vec{n}\psi) + D_r \Delta_n \psi$$
(8)  
An one of the best of the test of t

$$= \underline{\Omega} \cdot \vec{n} + \kappa [\underline{D} \cdot \vec{n} - (\vec{n} \cdot \underline{D} \cdot \vec{n})\vec{n}]$$
(9)

(9) که در آن  $\underline{\Omega}$  تانسور نرخ چرخش و  $\kappa$  ضریب شکل فیبرهاست که با روابط و (10) تعريف مي شوند:

$$\underline{\Omega} = \frac{1}{2} (\nabla \circ \vec{U} - \vec{U} \circ \nabla) \tag{10}$$

$$\kappa = \frac{1}{r^2 + 1} \tag{11}$$

معادله جفری (9) از حل تحلیلی معادله استوکس (جریان خزشی) بر روی ذرات بیضی گون (فیبر) حاصل شده است. ترم اول  $\underline{\Omega} \cdot \vec{n}$  در سمت راست معادله (9) دوران جسم صلب و ترم  $\underline{D} \cdot \vec{n}$  نشان دهنده تغییر فرم فیبرها توسط تانسور نرخ کرنش است. بهدلیل اینکه فیبرها صلب هستند، بردار یکه

جهت گیری آنها نیز ثابت و بهعنوان یک قید هندسی در کلیه فرمول ها باید لحاظ شود. ترم  $(\vec{n} \cdot \underline{D} \cdot \vec{n})$  تغییر فرم ناشی از  $(\vec{n} \cdot \underline{D} \cdot \vec{n})$  را جبران و یکه نگه داشتن بردار جهت گیری أ را تضمین می کند.

 $\psi(\vec{n}; \vec{x}, t)$  گشتاورهای آماری مرتبه دوم و چهارم تابع توزیع جهت گیری توسط روابط (12) و (13) تعريف مى شوند:

$$\langle \vec{n}\vec{n} \rangle_{\psi} (\vec{x},t) = \iint_{s} \vec{n} \circ \vec{n} \psi (\vec{n};\vec{x},t) ds (\vec{n})$$
(12)

$$\langle \vec{n}\vec{n}\vec{n}\vec{n}\rangle_{\psi}(\vec{x},t) = \left| \left| \vec{n} \circ \vec{n} \circ \vec{n} \circ \vec{n}\psi(\vec{n};\vec{x},t)ds(\vec{n}) \right| \right|$$
(13)

که در آنها انتگرالهای سطح بر روی فضای حالت که سطح کره واحد است، انجام شدهاند. طبق تئوری برنر[21]، تانسور تنش غیرنیوتنی  $\frac{\tau}{2}$  حاصل از حضور فيبرها در جريان بهصورت رابطه (14) بيان مىشود:  $\tau^{NN} = 2\mu_0$ 

$$D_{\underline{D}} + \mu_1 \underline{E}(\underline{D}; \langle \vec{n}\vec{n} \rangle_{\psi}) + \mu_2 \underline{D}; \langle \vec{n}\vec{n}\vec{n}\vec{n} \rangle_{\psi}$$

+ 
$$2\mu_3(\langle nn \rangle_{\psi} \cdot \underline{D} + \underline{D} \cdot \langle nn \rangle_{\psi})$$
  
+  $2\mu_4 D_r(\mathbf{3}\langle \vec{n}\vec{n} \rangle_{\psi} - E)$  (14)

در رابطه (14)، 4<sub>=0-4</sub> پنج ضریب مواد، <u>E</u> تانسور یکه، D<sub>r</sub> ضریب نفوذ براونی دورانی و اوپراتور ضرب اسکالر دوگانه تانسورهاست. پنج ضریب مواد  $\phi$  تابعی از لزجت سیال حامل  $\mu$ ، نسبت منظر فیبرها r و کسر حجمی  $\mu_i$ (توصيف غلظت سوسپانسيون) هستند. اين توابع در [16] داده شدهاند.

حل معادلات فوق منجر به پاسخ دقیق مسأله میشود، اما این کار مستلزم حجم محاسبات بسیار زیادی است. برای کاهش حجم محاسبات از مدل های بستگی جبری استفاده می شود که موضوع بخش بعدی است.

#### 4- مدل های بستگی جبری

(15)

مدل های بستگی جبری، که توسط محققان مختلف ارائه شدهاند، در این بخش تشريح میشوند و مشکلات هر يک مورد بازبينی قرار میگيرد. نخستین مدل بستگی جبری توسط اورلاندی [6] ارائه شد. این مدل بهوسیله نتایج آزمایشگاهی و یافتههای تئوری پشتیبانی میشود. در این مدل، وی تانسور تنش غیر نیوتنی را براساس تجربه طبق رابطه (15) پیشنهاد داد:

 $\underline{\tau}^{NN} = \mathbf{2}\mu_p \underline{D}$ 

که در آن  $\mu_p = \mu_p(\vec{x}, t)$ ميدان لزجت غيرايزوتروپ بهدليل حضور فیبرهااست که در جریانهای کششی (هنگامی که دو گردابه در خلاف جهت همدیگر می چرخند) تشدید می شود. مدل اور لاندی ویسکوزیته ناهمسانگرد ناشی از فیبرها را برپایه تانسورهای نرخ کرنش و نرخ چرخش محاسبه می کند. ویسکوزیته کششی موقعی بهوجود می آید که اختلاف نرخ کرنش از نرخ چرخش  $\Omega: \Omega \ge D$  و همچنین از یک مقدار ثابت از پیش تعریف شده  $S_T$  بزرگتر باشد. این مدل ساده قادر است که ویژگیهای اساسی جریان کاهش درگ یافته را پیشبینی نماید. طبق یافتههای تجربی، اورلاندی مدلی مطابق رابطه (16) را برای محاسبه لزجت یلیمر پیشنهاد کرد:

$$\mu_p = C\left(\frac{\underline{\Omega}:\underline{\Omega}}{\underline{D}:\underline{D}}\right) \tag{16}$$

از نواقص این مدل می توان به عدم ارائه یک رابطه ریاضی بین ثابت مدل C و غلظت پليمرها يا فيبرها اشاره كرد. همچنين، اين مدل نسبت به تبديلات گالیله نامتغیر نیست.

در تلاش برای بهدست آوردن آمار واقعیتر از جریان آشفته کاهش درگ یافته، مدل بستگی جبری دوم توسط دن توندر و همکاران[7] برای مطالعه کاهش درگ در جریان لوله پیشنهاد شد. بعداً این مدل توسط مانهارت و فریدریش[8] برای شبیهسازی کاهش درگ در جریان کانال به کار رفت. این مدل لزج غیرایزوتروپ (۷۸) نام دارد که اثر فیبرهای صلب را درنظر می گیرد. در این مدل فرض می شود که فیبرها با بردار سرعت محلی جریان همراستا

<sup>1-</sup> Orientation distribution function (ODF) 2- Fokker-Planck equation

هستند. این فرض قبل از آن توسط لیپسکومب و همکاران[22] برای مطالعه جریان سوسپانسیون فیبر در هندسههای پیچیده و در اعداد رینولدز پایین پیشنهاد شده است. با توجه به معادله مواد برای تانسور تنش غیرنیوتنی، برای فیبرهای غیربراونی و بسیار نازک، میتوان نشان داد که رابطه (14) به رابطه (17) تقلیل مییابد[19]:

$$\underline{\tau}^{NN} = \alpha \mu \underline{D} : \langle \vec{n} \vec{n} \vec{n} \vec{n} \rangle_{\psi}$$

(17)

که در آن µ ضریب لزجت دینامیکی سیال حامل و α تابعی از کسر حجمی و ضریب منظر فیبرهاست که بهصورت رابطه (18) تعریف میشود:

$$x = \frac{\phi r^2}{\ln r} \tag{18}$$

این مدل براساس این فرض است که جهت فیبر بهطور کامل با بردار محلی سرعت جریان طبق رابطه **(19)** در یک راستا است:

$$\vec{n} = \frac{\vec{U}}{|\vec{U}|} \tag{19}$$

که بر اساس این فرض، برای تانسور تنش غیر نیوتنی میتوان رابطه (20) را نوشت:

$$\underline{\tau}^{NN} = \alpha \mu \underline{D} : \frac{\vec{U} \circ \vec{U} \circ \vec{U} \circ \vec{U}}{\left(\vec{U} \cdot \vec{U}\right)^2}$$
(20)

هر دو مدل جبری فوق کاملاً لزج هستند و با موفقیت به پیشبینی کاهش درگ اصطکاکی دست یافتند. اما هر دو روش نسبت به تبدیل گالیه ناوردا نیستند و این یک نقص اساسی برای آنهاست. علاوه بر این مشکل، مدل VA مشکلات دیگری نیز دارد. این مدل لزجت برشی را بسیار کمتر از حالت واقعی تخمین میزند. همچنین، از شبیه سازی های مستقیم عددی میدانیم که تانسور گشتاور دوم متوسط ( $\psi(\vec{n}\vec{n})$ ) در مرکز کانال باید حالت ایزوتروپ داشته باشد. اما تانسور گشتاور دوم متوسطی که این مدل پیش بینی می کند به شدت غیر ایزوتروپ است.

اخیراً موسائی و مانهارت[19] یک مدل جبری بهنام VAF را پیشنهاد دادهاند که برخی از مشکلات اساسی دو مدل قبل را مرتفع کرده است و پدیده کاهش درگ را با دقت بالایی پیش بینی می کند. مدل VAF در حقیقت توسعه ای از مدل VAF است. در این مدل، طبق رابطه (21)، فرض شده است که فیبرها با بردار سرعت نوسانی  $\tilde{n}$  جریان آشفته، که با رابطه (22) تعریف می شود، هم راستا هستند:

$$\vec{i} = \frac{u}{|\vec{u}|} \tag{21}$$

$$\vec{\iota} = \vec{U} - \langle \vec{U} \rangle$$
 (22)

که در آن سرعت نوسانی  $\vec{u}$  از تفاضل بردار سرعت لحظهای  $\vec{U}$ و سرعت متوسط  $\langle \vec{U} \rangle$  حاصل می شود. با قرار دادن رابطه (21) درون رابطه تانسور تنش غیر نیوتنی (17) رابطه (23) به دست می آید:

$$\underline{\underline{\tau}}^{NN} = \alpha \mu \underline{\underline{D}} : \frac{\vec{u} \circ \vec{u} \circ \vec{u}}{(\vec{u} \cdot \vec{u})^2}$$
(23)

#### 5- مدل جدید بستگی جبری پیشنهادی

در این مقاله، یک مدل بستگی جبری جدید پیشنهاد میشود که VAFC نامگذاری شده است. مدل بستگی جبری پیشنهاد شده در واقع توسعهای از مدل قبلی VAF است که شرایط فیزیکی بیشتری از جریان آشفته کاهش درگ یافته بهوسیله میکروفیبرها را ارضا مینماید. مدل VAF کاهش درگ در جریانهای غیرایزوتروپ را بهخوبی شبیهسازی میکند. یکی از ضعفهای این مدل آن است که پاسخها بهصورت متوسط صحیح هستند، ولی بهصورت لحظهای نادرست هستند.

با بررسی جریان فیبری در کانال و در محدوده بسیار نزدیک به دیوار، که

در آن سرعتهای نوسانی تقریباً به شکل  $\mathbf{v} = w = \mathbf{v} \in \mathbf{0} \neq \mathbf{w}$  هستند، میتوان گشتاور آماری مرتبه دوم بهدست آمده از مدل VAF را به طور تقریبی مطابق رابطه (24) نوشت:

$$\langle n_{i}n_{j} \rangle = \frac{u_{i}w_{j}}{u_{k}u_{k}}, \vec{u} = u_{i}\vec{e}_{i} = (u, v, w)$$

$$\langle n_{1}n_{j} \rangle = \frac{u^{2}}{u^{2} + v^{2} + w^{2}} = 1$$

$$\langle n_{1}n_{2} \rangle = \mathbf{0} \langle n_{1}n_{3} \rangle = \mathbf{0}$$

$$\langle n_{2}n_{2} \rangle = \mathbf{0} \langle n_{2}n_{3} \rangle = \mathbf{0},$$

$$\langle n_{3}n_{3} \rangle = \mathbf{0}$$

$$(24)$$

از طرفی، حل دقیق مسأله به روش مونت- کارلو گشتاور آماری مرتبه دوم در نزدیکی دیوار را تقریباً به شکل تانسور (25) بهدست میدهد[16]:

$$\langle \vec{n}\vec{n} \rangle = \begin{pmatrix} \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{pmatrix}$$
(25)

بنابراین، گشتاور دوم پیشبینی شده توسط مدل VAF در محدوده نزدیک به دیوار با حل مستقیم مطابقت دارد. ضمناً، گشتاور آماری مرتبه دوم معادله (25) نشاندهنده آن است که جهت گیری فضایی همه فیبرها در جهت x است.

شبیهسازی مونت-کارلو نشان میدهد که در مرکز کانال، احتمال یافتن فیبرها در همه جهات تقریباً یکسان است[16]. یعنی گشتاور دوم تقریباً یک تانسور کروی است. در اینجا مشکل مدل VAF ظاهر میشود؛ در مرکز کانال، سرعتهای نوسانی تقریباً با یکدیگر برابر هستند، یعنی w = v = u. بر این اساس گشتاور آماری مرتبه دوم با روابط (26) و (27) محاسبه می شود:

$$\langle n_1 n_1 \rangle = \frac{u^2}{3u^2} = \frac{1}{3}, \langle n_i n_j \rangle = \frac{1}{3}$$

$$\langle \vec{n}\vec{n} \rangle = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$

$$(26)$$

$$(un) = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$$
 (27)

نتیجه بهدست آمده از مدل VAF در مرکز کانال، در مقایسه با حل دقیق، یکسان نیست. برای رفع این مشکل، مدل جدید VAFC در این مقاله پیشنهاد می شود. در مدل جدید، جزئیات بیشتری از فیزیک جریان آشفته (یعنی تانسور همبستگی<sup>1</sup> سرعت) در مدل بستگی جبری درنظر گرفته شده است. تانسور همبستگی سرعت با رابطه (28) تعریف می شود:

$$\underline{R}(\vec{x},t) = \langle \vec{u}(\vec{x},t) \circ \vec{u}(\vec{x},t) \rangle = \langle \vec{u} \circ \vec{u} \rangle$$
(28)

با ضرب کردن تانسور همبستگی سرعت در گشتاور آماری مرتبه دوم بهدست آمده از مدل VAF، پاسخ فیزیکی در جریانهای ایزوترپ از رابطه (29) استخراج می شود:

$$\langle n_i n_j \rangle = \frac{u_i u_j}{u_k u_k} R(u_i u_j)$$
<sup>(29)</sup>

دلیل این انتخاب آن است که تانسور همبستگی سرعت بهدست آمده از DNS جریان کانال، رفتاری کاملاً مشابه رفتار تانسور گشتاور آماری مرتبه دوم به-دست آمده از حل مستقیم دارد. بنابراین، با استفاده از مدل جدید ارائه شده، بهلحاظ نظری انتظار میرود که پدیده کاهش درگ در سطح مطلوبی در نزدیکی دیواره و همچنین در مرکز کانال پیشبینی شود. برای آزمون درستی این مطلب، روش فوق در کد DNS مورد استفاده پیادهسازی شده و شبیه-سازی مستقیم عددی انجام شده است که نتایج آن در بخش 7 ارائه میشود.

#### 6- روش عددی و جزئیات شبیهسازی

برای حل معادلات ناویر استوکس تراکمناپذیر و غیرنیوتنی از کد MGLET استفاده شده است. این کد برای شبیه سازی مستقیم عددی و شبیه سازی گردابه های بزرگ جریان آشفته قابل استفاده است. برای گسسته سازی فضایی در این کد از یک روش گسسته سازی حجم محدود مرتبه دوم و برای انتگرال گیری زمانی از یک روش رونگه کوتا مرتبه سوم استفاده شده است.

<sup>1-</sup> Correlation



شکل 2 محل قرار گیری سرعتها و فشار در یک سلول محاسباتی جابهجا شده



شكل 3 هندسه و ابعاد كانال شبيهسازي شده

معادله پواسون برای تصحیح فشار بهطور مستقیم حل میشود. برای این منظور، در دو جهت پریودیک به کمک تبدیل فوریه و در جهت عمود بر دیوار از یک حلگر سه قطری توماس (TDMA) استفاده میشود. متغیرهای جریان در یک شبکه جابهجا شده ذخیره میشوند. تانسور تنش غیرنیوتنی در نقاط گرهی فشار (در مرکز سلول محاسباتی) و مؤلفههای سرعت بر روی سطوح سلول قرار می گیرند (مطابق شکل 2).

جریان کانال عبارت است از جریان عبوری بین دو صفحه بینهایت بزرگ که در راستای محور z به فاصله 2h از یکدیگر قرار می گیرند. برای آنکه انجام شبیه ازی ممکن شود، به جای صفحات بینهایت بزرگ از صفحات محدود استفاده می شود. در جهات x و y جریان با شرط مرزی پریودیک درنظر گرفته می شود. در جهت عمود بر دیوار z شرط عدم لغزش اعمال شده است. دامنه جریانی مورد استفاده در این شبیه سازی، یک مکعب مستطیل به ابعاد دامنه جریانی مورد استفاده در این شبیه سازی، یک مکعب مستطیل به ابعاد شبکه محاسباتی غیریکنواخت کارتزین سه بعدی گسسته شده است. این شبکه دارای ( $Ian, Ian, Ian, Ny, N_z$ ) گره محاسباتی است که مجموعاً شامل 3225600 سلول است. هندسه کانال به طور شماتیک در شکل د نشان داده شده است.

جریان در کانال توسط یک گرادیان فشار ثابت در جهت x رانده می شود. این گرادیان فشار طبق رابطه (30) با تنش برشی متوسط دیوار و نصف ارتفاع کانال مرتبط است:

$$\frac{\partial\langle P\rangle}{\partial x} = -\frac{\tau_w}{h} \tag{30}$$

گرادیان فشار اعمالی، ضریب لزجت و دیگر خواص جریان چنان انتخاب شدهاند که عدد رینولدز برشی **Re**<sub>r</sub> = **180** حاصل شود. عدد رینولدز برشی به صورت رابطه (31) بیان می شود:

$$\mathbf{Re}_{\tau} = \frac{hu_{\tau}}{v} \tag{31}$$

که در آن v لزجت سینماتیکی سیال حامل بوده و سرعت برشی u<sub>r</sub> براساس تنش برشی دیوار مطابق رابطه (32) تعریف میشود:

$$u_{\tau} = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \tag{32}$$

با استفاده از سرعت برشی  $u_{\tau}$  می توان فاصله بدون بعد از دیوار  $z^{+}$  و تابع بدون بعد سرعت متوسط (U) را به صورت روابط (33) و (34) تعریف کرد:  $z^{+} = \frac{zu_{\tau}}{v}$  (33)

$$\langle U \rangle^+ = \frac{\langle U \rangle}{\eta} \tag{34}$$

اعتبارسنجی کد محاسباتی فوق در اعداد رینولدز مختلف در مرجع [23] و دیگر منابع بررسی شده است. همچنین با توجه به بزرگتر شدن مقیاسهای جریان کاهش درگ یافته نسبت به جریان نیوتنی، شبکهای که برای DNS جریان نیوتنی مناسب باشد، حتماً برای DNS جریان کاهش درگ یافته نیز مناسب است.

#### 7- نتايج

در این قسمت، نتایج مدل جبری جدید پیشنهاد شده یعنی مدل VAFC در جریان کانال آشفته کاهش درگ یافته در رینولدز برشی **180 = .** در قیاس با شبیهسازی مستقیم مونت-کارلو[16]، مدل VAF[19] و جریان نیوتنی ارائه میشود. بهصورت کلی، خواص جریان کاهش درگ یافته آشفته درون کانال نسبت به جریان نیوتنی عبارتاند از: افزایش فاصله بین رگههای جریان در ناحیه نزدیک دیوار، افزایش ضخامت رگههای جریان، افزایش سرعت متوسط، افزایش نوسانهای سرعت در جهت جریان، کاهش نوسانهای سرعت در دو جهت دیگر و نیز کاهش تنش برشی رینولدز. در ادامه، خواص جریان کاهش درگ یافته بحث و بررسی صورت میگیرد.

نمایه سرعت متوسط بهعنوان تابع فاصله بیبعد از دیوار در شکل 4 نشان داده شده است. افزایش سرعت قابل ملاحظهای در جریان فیبری نسبت به جریان نیوتنی دیده میشود که نشانه کاهش درگ است. در نزدیک دیواره، نمایه سرعت متوسط در روشهای مختلف تقریباً یکسان است، اما در مرکز کانال بسته به مدل به کار رفته متفاوت است. مطابقت مطلوب مدل جدید ارائه شده با حل دقیق مونت-کارلو نیز به صورت مطلوبی مشهود است.

کمیتهای آماری مرتبه دوم (در اینجا ریشههای متوسط مربع سرعتهای نوسانی) بهعنوان تابع فاصله بدون بعد از دیوار +z در مدلهای VAF، VAFC، مونت-کارلو و نیوتنی با یکدیگر مقایسه شده و در شکلهای 5 تا 7 نشان داده شدهاند. بی بعدسازی کمیتهای آماری با استفاده از رابطه (35) صورت گرفته است:

$$u_{rms}^{+} = \frac{\sqrt{\langle uu \rangle}}{u_{\tau}}, v_{rms}^{+} = \frac{\sqrt{\langle vv \rangle}}{u_{\tau}}, w_{rms}^{+} = \frac{\sqrt{\langle ww \rangle}}{u_{\tau}}$$
(35)

*u*<sup>+</sup>*m*s</sub> در جریان کاهش درگ یافته در مقایسه با جریان نیوتنی افزایش می یابد، در صورتی که rms نوسانهای سرعت در جهت عرضی کانال *y* و نیز در جهت عمود بر دیوار *z* نسبت به جریان نیوتنی کاهش پیدا می کنند. بررسی این موضوع توسط پروسه توزیع مجدد در جریان آشفته بیان می شود[**1**]. مؤلفه *u*<sup>+</sup>*ms* دارای مقداری بسیار بزرگتر از دو مؤلفه دیگر است. تطابق بسیار خوب این کمیت در مدل VAFC با حل دقیق مونت-کارلو بیانگر کارآیی بالای این مدل است. در جریان های کاهش درگ یان می ونت کاهش پیدا نیز در جهت عمود بر دیوار *z* نسبت به جریان نیوتنی کاهش پیدا می کنند. بررسی این موضوع توسط پروسه توزیع مجدد در جریان آشفته دیگر است. تطابق بسیار خوب این کمیت در مدل VAFC با حل دقیق مونت-کارلو بیانگر کارآیی بالای این مدل است. در جریانهای کاهش درگ یافته، ماکزیمم مقدار ریشههای متوسط جریان در فاصله دورتری از دیواره اتفاق می افتد که این نشانه ای از ضخیم تر شدن زیر لایه لزج است. این ضخیم تر شدن زیر لایه لزج در شبیه سازی دیگر محققان هم مشاهده شده است.

228



شکل 4 پروفایل سرعت متوسط نسبت به فاصله از دیوار در مدل های VAF، VAFC،

مونت-کارلو و نيوتني



مکل 5 کمیت u<sub>rms</sub> نسبت به فاصله بدون بعد از دیواره در مدل های VAF، VAFC، کمیت **b** مونت -کارلو و نیوتنی



شکل **6** کمیت v<sub>rms</sub> نسبت به فاصله بدون بعد از دیواره در مدلهای VAF، VAFC، حمیت **6** کمیت و نیوتنی

نمایه تنش برشی رینولدز بی بعد +(uw) – در شکل 8 نشان داده شده است. دیده می شود که تنش برشی در جریان فیبری نسبت به جریان نیوتنی کاهش پیدا کرده است. مطابق ترم تولید در جریان آشفته، که در رابطه (36) نشان داده شده است، +(uw) – در تولید انرژی آشفتگی مؤثر است[16]:

$$P_{ij} = -\langle u_i u_k \rangle \frac{\partial \langle U_j \rangle}{\partial x_k} - \langle u_j u_k \rangle \frac{\partial \langle U_i \rangle}{\partial x_k}$$
(36)

مهندسی مکانیک مدرس، فوقالعاده اسفند 1393، دوره 14، شماره 16



شکل 7 کمیت w<sup>+</sup><sub>rms</sub> نسبت به فاصله بدون بعد از دیواره در مدل های VAF، VAFC، VAFC مونت-کارلو و نیوتنی



**شكل 8** تنش برشى رينولدز <sup>+</sup>(uw)- نسبت به فاصله از ديواره.

بنابراین، کاهش این کمیت موجب تضعیف مکانیزم تولید آشفتگی میشود. به همین دلیل جریان در نزدیک دیواره آرام تر شده که به نوبه خود باعث افزایش ضخامت زیر لایه لزج میشود. این پدیده در مکانیزم کاهش درگ بسیار مهم است.

#### 8- نتیجه گیری

در مقاله حاضر، شبیهسازی مستقیم عددی کاهش درگ آشفته به کمک افزودنیهای میکروفیبر با استفاده از یک مدل بستگی جبری جدید، که VAFC نامگذاری شده، در عدد رینولدز برشی 180 گزارش شده است. برای حل معادلات حاکم بر جریان سوسپانسیون میکروفیبر، در ابتدا فرضیاتی درنظر گرفته شده است. معادلات حاکم بر مسئله معادلات ناویر-استوکس سهبعدی و وابسته به زمان برای جریان تراکمناپذیر یک سیال غیرنیوتنی هستند. تأثیر فیبرهای غیربروانی با استفاده از تانسور تنش غیر نیوتنی درنظر گرفته شده است. تانسور تنش غیرنیوتنی تابعی از توزیع جهت گیری فضایی فیبرهاست که توسط تابع توزیع احتمال (معادله فوکر-پلانک) بیان میشود. مدلهای جبری موجب کاهش چشمگیر حجم محاسبات میشوند[20]. به مدلهای جبری پیشین، مدل جدید محققان قرار گرفتهاند. برای رفع مشکلات مدلهای جبری پیشین، مدل جدید VAFC پیشنهاد شده است. نتایج حاصل مدلهای جبری پیشین، مدل جدید VAFC پیشنهاد شده است. نتایج حاصل مدل های جبری پیشین، مدل جدید کاکرلو[16] بیانگر پیشبینی دقیق از این مدل در قسمت نتایج بحث و بررسی شدهاند. مطابقت مطلوب نتایج مدل پیشنهادی با حل مستقیم مونت-کارلو[16] بیانگر پیشبینی دقیق

#### 9- مراجع

P. H. Alfredsson, A. V. Johansson, On the detection of turbulencegenerating events, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 139, pp. 325-345, 1984.

- [14] J. J. J. Gillissen, B. J. Boersma, P. H. Mortensen, H. I. Andersson, On the performance of the moment approximation for the numerical computation of fiber stress in turbulent channel flow, *Physics of Fluids*, Vol. 19, pp. 035102, 2007.
- [15] J. J. J. Gillissen, B. J. Boersma, P. H. Mortensen, H. I. Andersson, The stress generated by non-Brownian fibers in turbulent channel flow simulations, *Physics of Fluids*, Vol. 19, pp. 115107, 2007.
- [16] A. Moosaie, Direct Numerical Simulation of Turbulent Drag Reduction by Rigid Fiber Additives, PhD Thesis, Mechanical Engineering, Technical University of Munich, Munich, 2011.
- [17] A. Moosaie, M. Manhart, Direct Monte-Carlo simulation of turbulent drag reduction by rigid fibers in a channel flow, *Acta Mechanica*, Vol. 224, pp. 2385-2413, 2013.
- [18] A. Moosaie, Development of stochastic field method for DNS of drag reduction by microfibers in turbulent channel flow, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 14, No. 4, pp. 75-82, 2014. (In Persian)
- [19] A. Moosaie, M. Manhart, An algebraic closure for the DNS of fiberinduced turbulent drag reduction in a channel flow, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 166, pp. 1190-1197, 2011.
- [20] A. Moosaie, DNS of turbulent drag reduction in a horizontal channel by microfibers at high Reynolds numbers using an algebraic closure model, *Modares Mechanical Engineering*, Vol. 13, No. 4, pp. 117-127, 2013, (In Persian).
- [21] H. Brenner, Rheology of a dilute suspension of axisymmetric Brownian particles, *International Journal of Multiphase Flow*, Vol. 1, pp. 195–341, 1974.
- [22] G. G. Lipscomb, M. M. Denn, D. U. Hur, D. V. Boger, The flow of fiber suspensions in complex geometries, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 26, pp. 297-325, 1988.
- [23] A. Hokpunna, M. Manhart, Compact fourth-order finitevolume method for numerical solutions of Navier–Stokes equations on staggered grids, *Journal of Computational Physics*, Vol. 229, pp. 7545-7570, 2010.

- [2] C. M. White, M. G. Mungal, Mechanics and prediction of turbulent drag reduction with polymer additives, *Annal Review of Fluid Mechanics*, Vol. 40, pp. 235-256, 2008.
- [3] J. L. Lumley, Drag reduction by additives, Annual Review of Fluid Mechanics, Vol. 1, pp. 367-384, 1969.
- [4] J. Xu, M. R. Maxey, G. E. Karniadakis, Numerical simulation of turbulent drag reduction using micro-bubbles, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 468, pp. 271-281, 2002.
- [5] H. Choi, P. Moin, J. Kim, Direct numerical simulation of turbulent flow over riblets, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 255, pp. 503-539, 1993.
- [6] P. Orlandi, A tentative approach to the direct simulation of drag reduction by polymers, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 60, pp. 277-301, 1995.
- [7] J. M. J. Den Toonder, M. A. Hulsen, G. D. C. Kuiken, F. T. M. Nieuwstadt , Drag reduction by polymer additives in a turbulent pipe flow, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 337, pp. 193-231, 1997.
- [8] M. Manhart, R. Friedrich, Direct numerical simulation of turbulent channel flow of a viscous anisotropic fluid, *Springer*, Vol. 1, pp. 277–296, 1999.
- [9] M. Tabor, P. de Gennes, A cascade theory of drag reduction, *Europhysics*, Vol. 2, pp. 519–522, 1986.
- [10] J. J. J. Gillissen, Polymer flexibility and turbulent drag reduction, *Physical Review E*, Vol. 78, pp. 046311, 2008.
- [11] M. Manhart, Rheology of suspensions of rigid-rod like particles in turbulentchannel flow, *Journal of Non-Newtonian Fluid Mechanics*, Vol. 112, pp. 269–293, 2003.
- [12] J. S. Paschkewitz, Y. Dubief, C. D. Dimitropoulos, E. S. G. Shaqfeh, P. Moin, Numerical simulation of turbulent drag reduction using rigid fibres, *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 518, pp. 281–317, 2004.
- [13] J. S. Paschkewitz, Y. Dubief, E. S. G. Shaqfeh, The dynamic mechanism for turbulent drag reduction using rigid fibers based on Lagrangian condition alstatistics, *Physics of Fluids*, Vol. 17, pp. 063102, 2005.