



خنک کاری دیسک های توربین با شبیه سازی تحلیلی و عددی سیال غیر نیوتنی

نوذر اکبری^۱، سهیل دباغیان^{۲*}، مسیب قلی نیا^۳، صابر قلی نیا^۴

۱- استادیار، مهندسی هوافضا، دانشگاه هوایی شهید ستاری، تهران

۲- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

۳- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه علوم و فنون مازندران، بابل

۴- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه صنعتی نوشیروانی، بابل

*engsoheildabbaghian@gmail.com

ارسال: آذر ماه ۹۶ پذیرش: بهمن ماه ۹۶

خلاصه

در پژوهش حاضر، جریان سیال غیرنیوتنی در کانال، با محور متقارن به همراه یک دیواره متخلخل بمنظور خنک کاری دیسک های توربین به صورت عددی و تحلیلی شبیه سازی شده است. روش تحلیلی بکار رفته برای حل معادلات بقای جرم، بقای مومنتم و بقای انرژی از جریان سیالات غیر نیوتنی در محیط متخلخل، توسط اکبری گنجی AGM می باشد. به منظور اعتبار سنجی نتایج حاصل از شبیه سازی، نتایج بدست آمده از روش تحلیلی AGM توسط نرم افزار دیگر به نام (Flex-PDE) که یک نرم افزار قدرتمند در زمینه شبیه سازی عددی می باشد، مقایسه شده که نشان دهنده دقت مطالعه حاضر می باشد. همچنین در این تحقیق تاثیر پارامترهای فعال نظیر عدد پرانتل (Pr)، متغیر ویسکوزیته متقابل (K_1)، شاخص قانون توان (n) و عدد رینولدز تزریق (Re) روی پروفیل سرعت $f(\eta)$ و دمای بی بعد $q_n(\eta)$ مورد بررسی قرار گرفتند. نتایج نشان می دهند که Re دارای یک رابطه مستقیم با پروفیل توزیع سرعت f و برخلاف آن دارای رابطه معکوس با پروفیل توزیع دما q_n می باشد. بعلاوه، شبیه سازی حاکی از آن است که AGM یک راه حل مناسب برای نتیجه گیری مسائل غیر خطی است.

کلمات کلیدی: سیال غیر نیوتنی، خنک کاری توربین دیسک، AGM، Flex-PDE

۱. مقدمه

همان گونه که می دانیم، سیال نیوتنی، ماده ای است که در آن تنش برشی بدون وجود تنش تسلیم (صفر بودن تنش برشی در نرخ برش صفر) فقط تابعی خطی از نرخ برش است. بر این اساس سیال غیر نیوتنی را می توان به سادگی به صورت سیالی که فاقد رفتار نیوتنی است، تعریف کرد. به طور کلی سیالات غیر نیوتنی به خانواده های متعددی دسته بندی می شوند. این خانواده ها عبارت اند از: ۱- سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان ۲- سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان ۳- سیالات ویسکوالاستیک. سیالات غیر نیوتنی مستقل از زمان سیالاتی هستند که در آن ها تنش برشی فقط تابعی غیر خطی از نرخ برش است. به عبارت دیگر در این سیالات لزجت تابعی از نرخ برش می باشد. اما سیالات غیر نیوتنی وابسته به زمان سیالاتی هستند که علاوه بر اینکه لزجت تابعی از شدت برش است، تابعی از زمان نیز است. به عبارت دیگر در این سیالات، در یک نرخ برش

ثابت، ساختمان ملکولی ماده به طور مداوم در حال تغییر می باشد و لذا مقدار لزجت و تنش برشی نیز تابعی از زمان خواهند بود. سیالات ویسکوالاستیک موادی هستند که به طور توأمان خواص ویسکوز و الاستیک را دارا هستند. از آنجا که در سیالات تنش تابعی از نرخ برش و در جامدات تابعی از خود برش است، لذا این مواد دارای خواص همزمان جامد و سیال هستند. در یک جامد الاستیک خالص تنش متناظر با کرنش داده شده مستقل از زمان است، درحالی که در مواد ویسکوالاستیک تنش به تدریج کاهش می یابد. برخلاف مایع لزج خالص، سیالات ویسکوالاستیک وقتی در معرض تنش قرار می گیرند بخشی از تغییر شکل آن‌ها به محض برداشتن تنش به حالت اول باز می گردد. مثال هایی از این نوع سیالات ویسکوالاستیک عبارت اند از: خمیرها، پلیمرها و مذاب پلیمرها مثل نایلون.

اما بطور کلی، باید متذکر شد که سیال های غیر نیوتنی راه به دنیای دیگری را در زمینه ی علم ماده و کاربردهای آن باز کردند. وقایع طبیعی فراوانی وجود دارند که ثابت می کنند چقدر سیال های غیر نیوتنی برای بشر مفید هستند. با الهام از این موضوع، محققان پژوهش های زیادی برای کشف کاربردهای سیال های غیر نیوتنی در زندگی، به کار گرفته اند. علاوه بر این، این سیال ها به علم کمک کرده اند تا برخی از بلايا و پدیده های خطرناک طبیعت را توضیح دهد و راه هایی برای مبارزه با آنها پیدا کند. برخی از این کاربردها عبارتند از: تهیه ی پایه و پی انعطاف پذیر و ساخت سازه در مناطقی که در معرض زلزله هستند تا اثر نوسانات را بر روی ساختمان در طول زلزله کاهش دهد.

برای توسعه ی لباس های به حد کافی انعطاف پذیر تا اجازه ی حرکت به بدن را بدهد اما پوشنده ی لباس را از تأثیر فیزیکی سریع تسلیحات حفظ کند. برای استفاده در مصارف سرگرمی و تحصیلی و آموزشی همچنین این مسائل سیالات می تواند در کاربردهای مختلف از جمله فرآوری سرامیک، بسته بندی الکترونیکی، فرآیند فیلتراسیون، فرآوری پلیمر، کاهش نیروی کشش و مسائل سرمایه ی و غیره مورد مطالعه قرار گیرد. هرچند، بطور خاص، توجه به مسئله انتقال حرارت مربوط به جریان سیالات غیرنیوتنی افزایش یافته است. جریان در ژورنال، نورد گرم، یاتاقان ها، روغن بهبود یافته، اکستروژن پلاستیک ها، بیومکانیک، جریان در جاذب شوک و روغن کاری برخی از نمونه هایی می باشد که می توان نام برد. فهم ماهیت مسئله انتقال حرارت مربوطه و جریان کانال سیال غیرنیوتنی از طریق مدل سازی با یک نگاه به پیش بینی رفتار مرتبط جریان سیال و توزیع دمایی بوسیله تعدادی از مقالات تحت فرضیات مختلف انجام شده است.

بطور مثال، دیبورگ و هان [۱] در ابتدا یک حالت برای کاربردهای سرمایه ی توربین در کانال ها با یک دیواره متخلخل و با مطالعه انتقال حرارت را ارائه کردند. بعلاوه، گلدشتاین [۲-۴] یک مطالعه مروری درباره انتقال حرارت با شامل کردن مفهوم جریانات سیال برای سیالات غیرنیوتنی معرفی کردند. وانگ و چن [۵] انتقال حرارت ترکیبی لایه مرزی همراه با اثر برای زاویه های مختلف سطوح (Magneto-Hydrodynamic) موجدار مطالعه کردند. آنها نشان دادند که در نمودارهای عدد ناسلت و ضریب اصطکاک دو هارمونیک وجود دارد که هارمونیک اول به خاطر گرادیان فشار و هارمونیک دوم به خاطر عبارت انتشار و نیروی گریز از مرکز است. همچنین آنها طی یک مطالعه دیگر، انتقال حرارت ترکیبی سیال های غیرنیوتنی بر روی سطوح موجدار را مورد مطالعه قرار دادند [۶]. آنها دریافتند که رفتار سیال های غیرنیوتنی نزدیک لبه حمله صفحه و پایین دست جریان تا حدی متفاوت است بطوریکه با افزایش شاخص غیرنیوتنی مقدار عدد نوسلت موضعی و نوسلت متوسط در نزدیکی لبه حمله صفحه افزایش میابد، ولی در پایین دست جریان کاهش میابد.

همین طور، بارس و کری [۷] برای بررسی عددی یک مسئله سه بعدی آزمایشگاهی از مدل غیرنیوتنی GNF استفاده کردند که مقدار ویسکوزیته را در نرخ های پایین و بالای نرخ برش، در یک محدوده حفظ میکند. در نهایت تطابق بالای نتایج عددی با نتایج آزمایشگاهی مشاهده شد. اله یاری و همکارانش [۸] با بکارگیری الگوریتم ژنتیک به بهینه سازی انتقال حرارت در داخل کانال دو بعدی شامل سه بلوک همراه با تولید کننده گردابه مثلثی جهت افزایش انتقال حرارت پرداختند. راجا و همکارانش [۹] تأثیر افزودن ملحقه فتر پیچ بر افزایش انتقال حرارت و کاهش افت فشار نانو سیال بصورت تجربی مورد بررسی

قرار دادند. همچنین تاثیر غلظت حجمی نانو سیال در افزایش انتقال حرارت مورد آزمایش قرار گرفت و دیده شد که اثر مثبتی بر افزایش انتقال حرارت دارد.

همچنین، پیا و سانا [۱۰] اثر حفره های میکروساختار را روی هدایت گرمایی در واسط متخلخل فراکتال مطالعه کردند. نتایج آنها نشان داد که حضور دیواره های متخلخل برای سرمایش صفحات توربین در یک کانال متقارن با یک دیواره اسفنجی از طریق یک جریان سیال غیرنیوتنی با استفاده از DRA، توسط دوگونی [۱۱] تحلیل شد. هدف اصلی این تحقیق بررسی جریان برای سیال ویسکوالاستیک غیرنیوتنی در کانال، با محور متقارن بهمراه یک دیواره متخلخل بمنظور خنک کاری صفحات توربین می باشد. در این مقاله، اثرات متغیرهای تعبیه شده مانند: عدد پرانتل (Pr)، عدد رینولدز تزریق (Re)، متغیر ویسکوزیته متقابل (K₁) و شاخص قانون توان (n) روی پروفیل های سرعت، و پروفیل های دما بی بعد مطالعه شدند. روش تحلیلی بکار رفته برای حل معادلات غیر خطی، توسط اکبری گنجی AGM در نرم افزار MAPLE-18 می باشد. همچنین، نقشه های برجسته متغیر های فوق الذکر برای یک درک بهتر از رفتار های سیالات ویسکوالاستیک غیرنیوتنی نشان داده شده اند.

۲. روش تحقیق

هدف این تحقیق گسترش همزمان انتقال حرارت و جریان برای سیال ویسکوالاستیک غیرنیوتنی روی صفحات توربین با هدف سرمایش می باشد. طرح و مختصات مسئله در شکل (۱) به منظور درک بهتر، نمایش داده شده است. همان طور که در این شکل مشاهده می شود، سیال غیر نیوتنی به صورت یکنواخت از سطح بالایی کانال تزریق می شود تا دیواره داغ پایینی را سرد کند. همچنین شماتیک مسئله نشان می دهد، مسئله خنک کاری دیسک های توربین می تواند به عنوان یک جریان نقطه ایستایی با تزریق در نظر گرفته شود. معادلات حاکم بر شرایط مرزی از مرجع [۱۲] به عنوان سیستم های معادلات دیفرانسیلی غیرخطی به دست آمده است. معادلات به صورت زیر تعریف می شود:

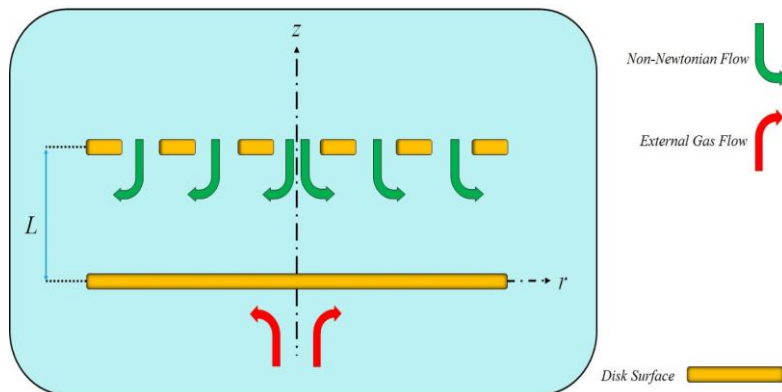
$$f^{IV} + 2\text{Re} ff''' - K_1 \text{Re}(4f'' f''' + 2f' f^{IV}) = 0, \quad (1)$$

$$nf'q_n - 2fq_n' = \frac{1}{\text{Pr} \cdot \text{Re}} q_n'', \quad (n = 0, 2, 3, 4, \dots) \quad (2)$$

شرایط مرزی به شرح زیر است:

$$\eta = 0: f = 0, \quad f' = 0, \quad \eta = 1: f = 1, \quad f' = 0 \quad (3)$$

$$\eta = 0: q_n = 1, \quad , \quad \eta = 1: q_n = 0. \quad (4)$$



شکل ۱- نمایی از هندسه مسئله [۱۲].

$$\begin{cases} f(0) = 0 \rightarrow a_0 = 0 \\ f'(0) = 0 \rightarrow a_1 = 0 \\ q_n(0) = 1 \rightarrow b_0 = 1 \\ f(1) = 1 \rightarrow a_7 + a_6 + a_5 + a_4 + a_3 + a_2 + a_1 + a_0 = 1 \\ f'(1) = 0 \rightarrow a_1 + 2a_2 + 3a_3 + 4a_4 + 5a_5 + 6a_6 + 7a_7 = 0 \\ q_n(1) = 0 \rightarrow b_5 + b_4 + b_3 + b_2 + b_1 + b_0 = 0 \end{cases} \quad (18)$$

(b) شرایط مرزی اعمال شده بر معادله ی (۱۴) که با $K(\eta)$ و $M(\eta)$ نشان داده شده اند و همچنین مشتقات آن به صورت زیر می باشد:

$$\begin{aligned} K(f(\eta)) \rightarrow K(f(BC)) = 0, K'(f(BC)) = 0, \dots \\ M(q_n(\eta)) \rightarrow M(q_n(BC)) = 0, M'(q_n(BC)) = 0, \dots \end{aligned} \quad (19)$$

معادله ی (۱۴) بدین معناست که توابع پاسخ به جای توابع وابسته f و q_n در معادله ی (۱۴) جاگذاری شده اند. بنابراین با اعمال شرایط مرزی بر آنها داریم:

$$K(f(0)) \rightarrow 24a_4 + 6.0a_0a_3 = 0, \quad (20)$$

$$\begin{aligned} K(f(1)) \rightarrow 840a_7 + 360a_6 + 120a_5 + 24a_4 + 1.0(a_7 + a_6 + a_5 + a_4 + a_3 + a_2 + a_1 + a_0) \\ (210a_7 + 120a_6 + 60a_5 + 24a_4 + 6a_3) = 0, \end{aligned} \quad (21)$$

$$M(q_n(0)) \rightarrow 2a_1b_0 - 2b_1a_0 - 20b_2 = 0, \quad (22)$$

$$\begin{aligned} M(q_n(1)) \rightarrow 2(a_1 + 2a_2 + 3a_3 + 4a_4 + 5a_5 + 6a_6 + 7a_7)(b_5 + b_4 + b_3 + b_2 + b_1 + b_0) \\ - 2(5c_5 + 4c_4 + 3c_3 + 2c_2 + c_1)(a_7 + a_6 + a_5 + a_4 + a_3 + a_2 + a_1 + a_0) \\ - 200b_5 - 120b_4 - 60b_3 - 20b_2 = 0, \end{aligned} \quad (23)$$

اعمال شرایط مرزی بر مشتقات مجموعه معادلات شرایط مرزی به صورت زیر می باشد:

$$K'(f(0)) \rightarrow 120a_5 + 6.0a_1a_3 + 24.0a_0a_4 = 0, \quad (24)$$

$$\begin{aligned} K'(f(1)) \rightarrow 2520a_7 + 720a_6 + 120a_5 + 1.0(a_1 + 2a_2 + 3a_3 + 4a_4 + 5a_5 + 6a_6 \\ + 7a_7)(210a_7 + 120a_6 + 60a_5 + 24a_4 + 6a_3) + 1.0(a_7 + a_6 + a_5 + a_4 + a_3 + a_2 \\ + a_1 + a_0)(24a_4 + 120a_5 + 360a_6 + 840a_7) = 0, \end{aligned} \quad (25)$$

$$M'(q_n(0)) \rightarrow 4a_2b_0 - 4b_2a_0 - 60b_3 = 0, \quad (26)$$

$$\begin{aligned} M'(q_n(1)) \rightarrow 2(2a_2 + 6a_3 + 12a_4 + 20a_5 + 30a_6 + 42a_7)(b_5 + b_4 + b_3 + b_2 + b_1 \\ + b_0) - 2(2b_2 + 6b_3 + 12b_4 + 20b_5)(a_7 + a_6 + a_5 + a_4 + a_3 + a_2 + a_1 + a_0) - 600b_5 \\ - 240b_4 - 60b_3 = 0, \end{aligned} \quad (27)$$

با حل مجموعه معادلات جبری که شامل چهارده معادله با چهارده مجهول از معادله ی (۱۸) و (۲۰) - (۲۶) می باشد، ضرایب ثابت معادلات (۱۵) و (۱۶) به راحتی بدست می آیند.

$$\begin{cases} a_0 = 0, a_1 = 0., a_2 = 3.16053, a_3 = -2.2240, a_4 = 0., a_5 = 0, \\ a_6 = 0.09364, a_7 = -0.03010, b_0 = 1., b_1 = -1.091207, \\ b_2 = 0., b_3 = 0.2107, b_4 = -0.16304, b_5 = 0.04355 \end{cases} \quad (28)$$

با جاگذاری ضرایب ثابت بدست آمده در معادلات (۱۵) و (۱۶)، حل مجموعه زوج معادله ی غیرخطی به صورت زیر می باشد:

$$f(\eta) = [-0.0301x^7 + 0.0936x^6 - 2.224x^3 + 3.1605x^2],$$

$$q_n(\eta) = [0.043x^5 - 0.163x^4 + 0.2107x^3 + 1. - 1.0912x].$$
(۲۹)

نرم افزار Flex-PDE

نرم افزار Flex-PDE یک نرم افزار مدل سازی ساده مبتنی بر روش المان محدود بصورت کد نویسی و یک حلگر عددی می باشد. این نرم افزار قابلیت تحلیل گستره وسیعی از مسائل مهندسی مانند سنتیک و اکشن های شیمیایی، تنش و مدل سازی ریاضی مسائل واقعی و کاربردی را داراست. این نرم افزار تاکنون کمتر در زمینه انتقال حرارت مورد استفاده قرار گرفته است اما به دلیل ظرفیت بالای آن در حل مسائل غیر خطی می تواند در سال های پیش رو یکی از نرم افزار های قدرت مند در حل مسائل انتقال حرارت باشد. مراحل حل در این نرم افزار به شرح زیر است:

۱- تحلیل اولیه معادلات

۲- تشکیل مشتقات، انتگرال ها و توابع روش اجزای محدود گلرکین

۳- ساختن ماتریکس کوپل و حل آن

۴- نمایش گرافیکی پاسخ

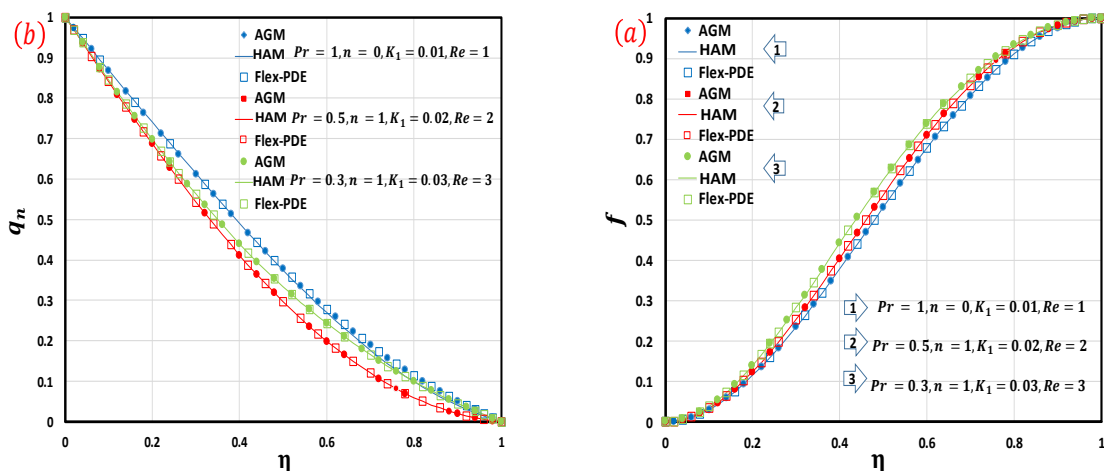
○ بخش کنترل دقت

تلرانس در این نرم افزار ERRLIM نامیده می شود که در بخش SELECT در متن تنظیم می شود. مقدار پیش فرض ERRLIM برابر ۰/۰۰۲ می باشد و بدسن معنی است که این نرم افزار ساده تازمانی که خطای تخمینی در هر متغیر کمتر از ۰.۲ درصد در هر سلول شود، شبکه را اصلاح می کند. در این تحقیق، ما نتایج بدست آمده از نرم افزار Flex-PDE را با نتایج بدست آمده از AGM بوسیله نوشتن کدهای نرم افزار Flex-PDE برای معادلات (۱) و (۴) مقایسه می کنیم.

۴. نتایج

مقایسه ی خروجی حل به روش AGM و Flex-PDE در شکل های زیر نشان داده شده است. این مقایسه نشان می دهد که روش AGM یک روش تحلیلی قدرتمند برای حل معادلات غیر خطی می باشند. که تطابق مناسبی با حل عددی دارد.

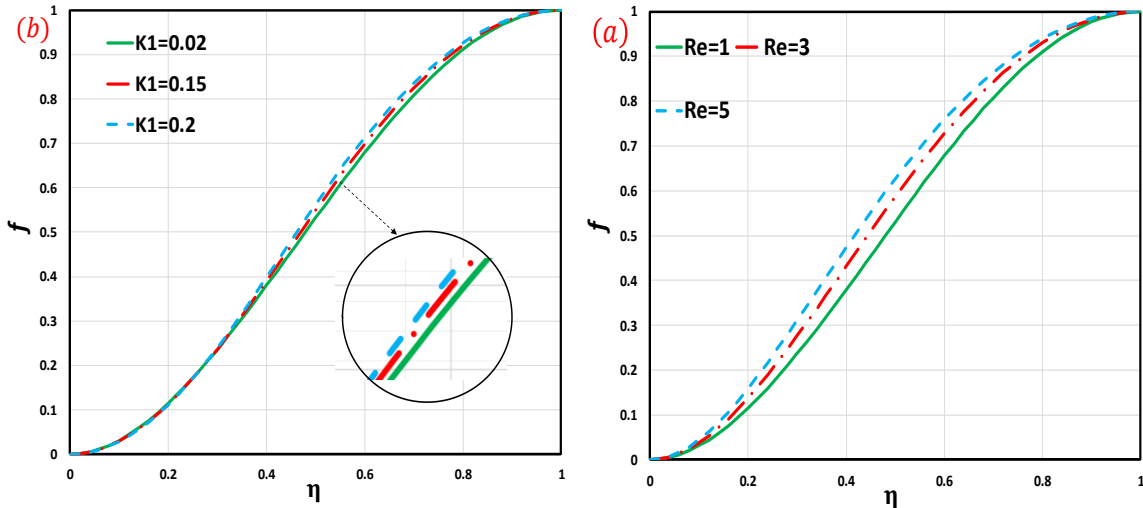
مقایسه ی بین روش های AGM و Flex-PDE



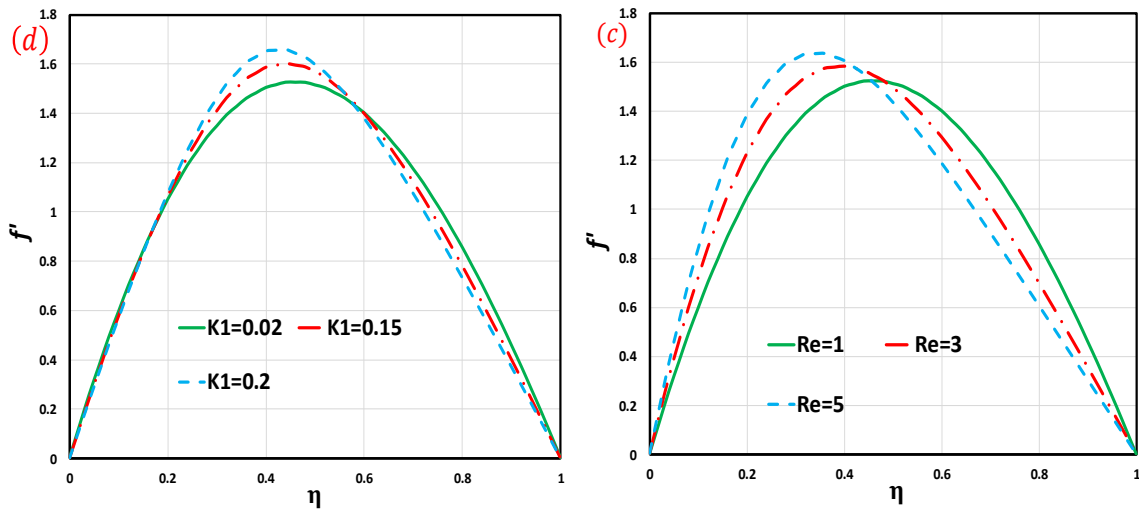
شکل ۲- مقایسه ی بین روش AGM، Flex-PDE و HAM [10] برای پروفیل سرعت $f(\eta)$ و پروفیل دما $q_n(\eta)$.

مقایسه ی خروجی حل به روش AGM، Flex-PDE، برای مقادیر مختلف از پارامترهای تاثیر گذار نظیر عدد پرانتل (Pr)، متغیر ویسکوزیته متقابل (K1)، شاخص قانون توان (n) و عدد رینولدز تزریق (Re) در شکل های زیر نشان داده شده است. هدف از این مقایسه بررسی کارایی روش جدید AGM در مقایسه با روش HAM و دقت آن در مقایسه با حل عددی می باشد. این مقایسه نشان می دهد که روش AGM یک روش تحلیلی قدرتمند برای حل معادلات غیرخطی است. که تطابق مناسبی با حل عددی دارد. بعلاوه مقایسه های شبیه این پژوهش فرصتی را فراهم می کند تا مطالعه بر روی روش های مختلف صورت گیرد تا روشی که کمترین زمان و بیشترین دقت را برای همگرایی لحاظ میکند انتخاب شود.

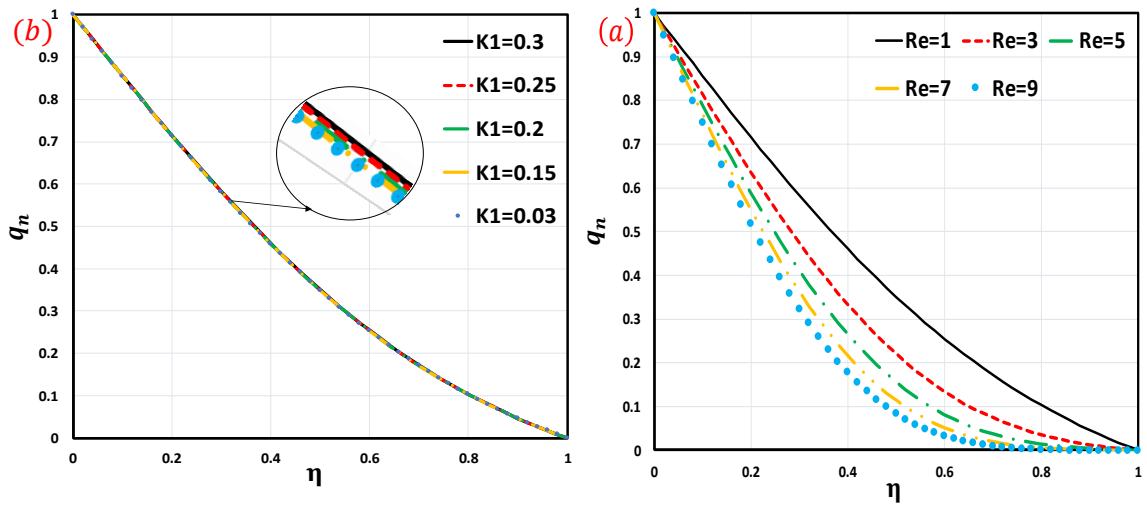
■ خروجی AGM



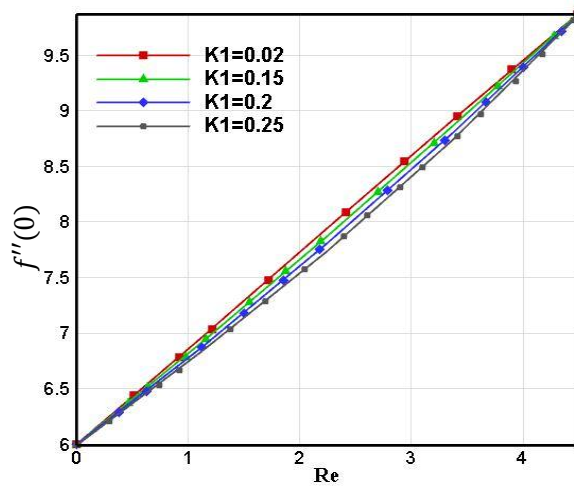
شکل ۳-پروفایل سرعت $f(\eta)$ برای مقادیر مختلف از Re و K_1



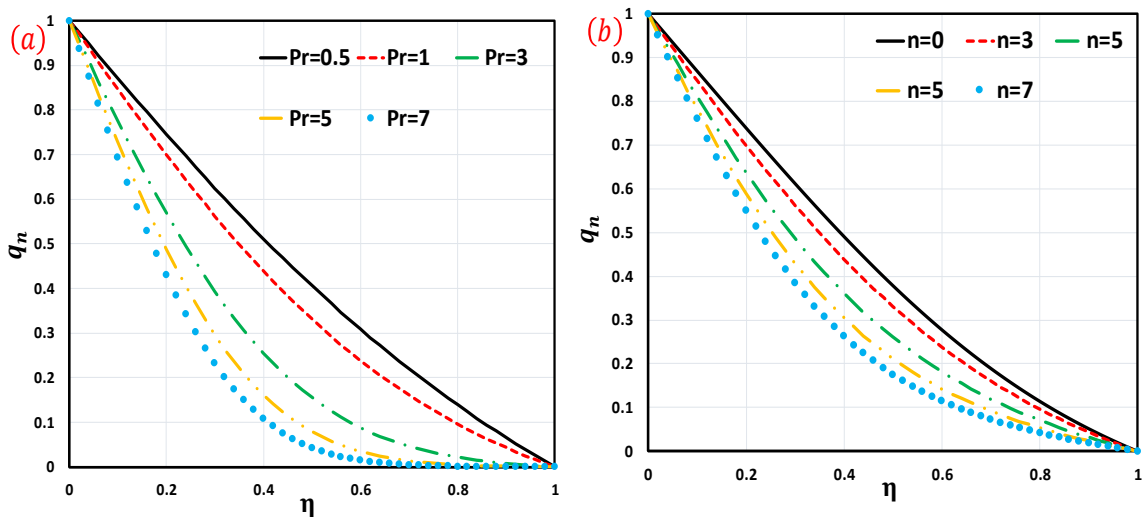
شکل ۴-پروفایل سرعت $f'(\eta)$ برای مقادیر مختلف از Re و K_1



شکل ۵- پروفایل سرعت $q_n(\eta)$ برای مقادیر مختلف از Re و K_1 .



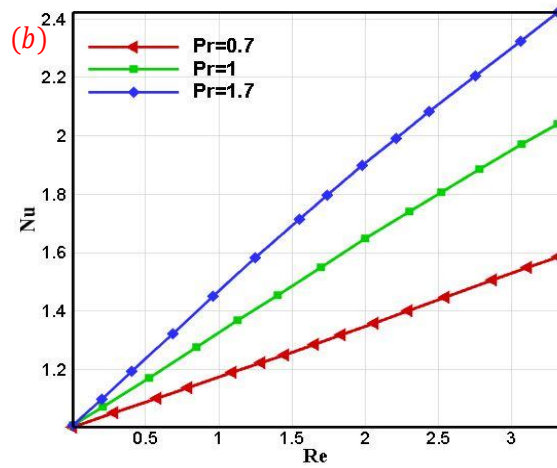
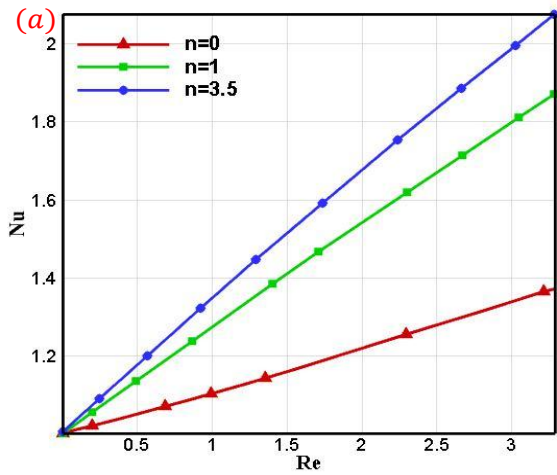
شکل ۶- تغییرات اصطکاک پوسته $f''(0)$ برای مقادیر متفاوتی از Re و K_1 .



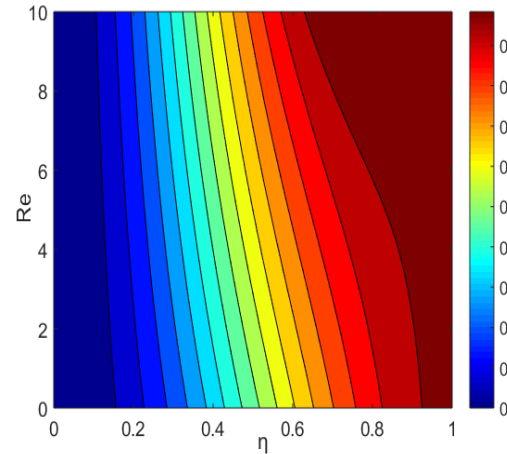
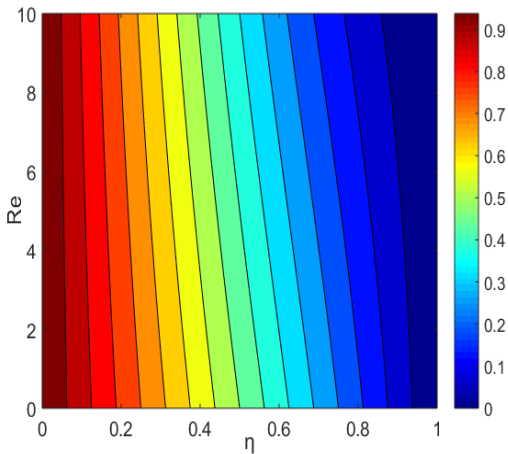
شکل ۷- پروفایل سرعت $q_n(\eta)$ برای مقادیر مختلف از Pr و n .

جدول ۱- مقایسه ی بین روش AGM و نرم افزار Flex-PDE برای $f(\eta)$ (سمت راست) و برای $q_n(\eta)$ (سمت چپ)

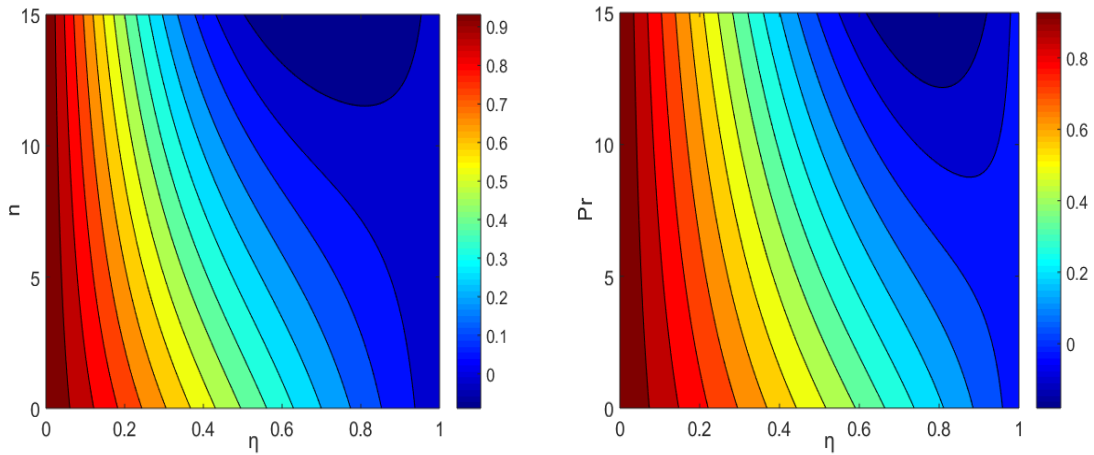
η	Pr= 0.1, Re= 1,n=0 ,K ₁ =0.01			Pr=1, Re= 1,n=1,K ₁ =0.06		
	NUM	AGM	Error	NUM	AGM	Error
0.0	0.000000	0.000000	0	1.000000	1.000000	0
0.2	0.136595	0.136143	0.000452	0.687232	0.688210	-0.000978
0.4	0.434695	0.435953	-0.001258	0.412224	0.417201	-0.004977
0.6	0.738155	0.741281	-0.003126	0.191976	0.192894	-0.000918
0.8	0.938104	0.940019	-0.001915	0.058968	0.059765	-0.000797
1	1.000000	1.000000	0	0.000000	0.000000	0



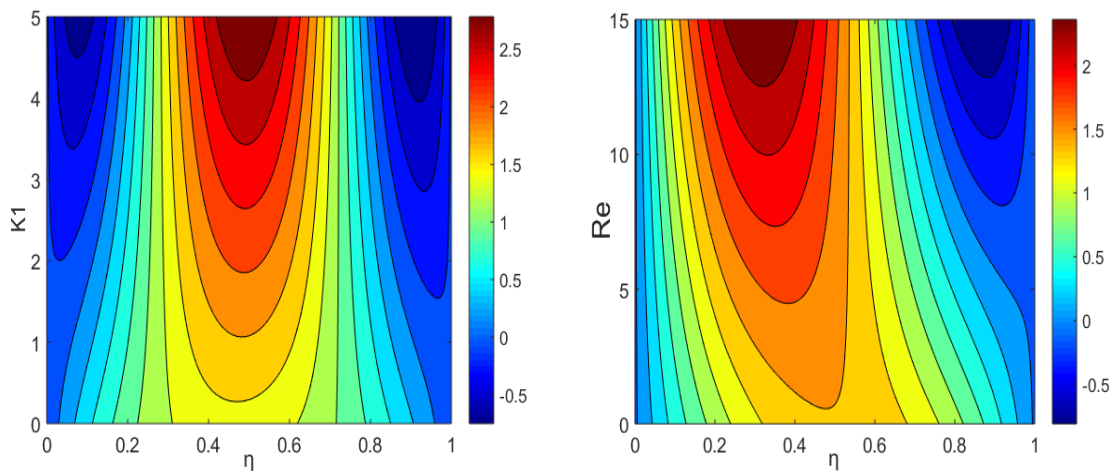
شکل ۸- تاثیر Re و Pr و n بر میزان انتقال حرارت بدون بعد (Nu)



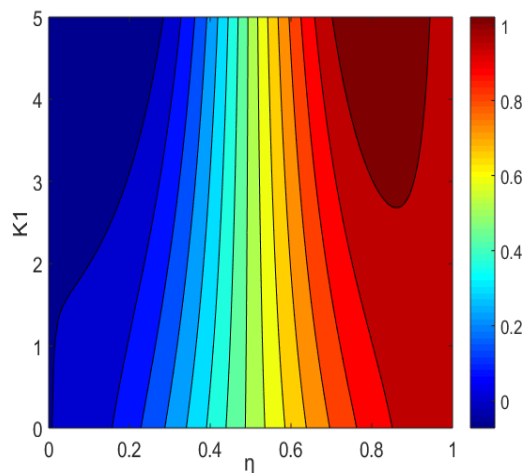
شکل ۹- کانتور f (چپ) و q_n (راست) برای حالت Pr=0.5, n=0, K₁=0.03



شکل ۱۰- کانتور $q_n(\eta)$ و برای مقادیر متفاوتی از Pr, n برای حالتیکه $Re=1, K_1=0.03$



شکل ۱۱- کانتور $f'(\eta)$ و برای مقادیر متفاوتی از K_1, Re برای حالتیکه $Pr=1, n=1$



شکل ۱۲- کانتور $f(\eta)$ و برای مقادیر متفاوتی از K_1 برای حالتیکه $Pr=1, n=1, Re=1$

در این مطالعه، از روش اکبری-گنجی (AGM) برای بدست آوردن راه حل تحلیلی صریح مسئله انتقال حرارت جریان سیال غیرنیوتنی در یک کانال با دیواره متخلخل بمنظور سرمایش دیسک های توربین بکار برده شده است (شکل ۱). به منظور بررسی دقت نتایج حاضر، ما نتایج AGM را با نتایج حاصل از نرم افزار Flex-PDE که یک نرم افزار قدرتمند در حل

مسائل غیر خطی است، مقایسه کردیم. جدول (۱) و اشکال (a-b) ۲ مقایسه بین AGM و راه حل عددی (Flex-PDE) برای مقادیر مختلف از پارامترهای فعال را نشان می دهد. بر اساس این مقایسه مشاهده می شود، نرخ خطا برای پروفیل های دما و سرعت از مقادیر مختلف (K_1, Re, n, Pr) بسیار پایین است، که نشان دهنده تطابق مناسب بین روش AGM و نرم افزار Flex-PDE می باشد. همچنین در این تحقیق اثر متغیرهای مختلف مانند عدد رینولدز تزریق (Re)، عدد پرانتدل (Pr)، شاخص قانون توان (n)، متغیر ویکوزیته متقابل (K_1) بر روی پروفیل های سرعت و دمای بی بعد بررسی شدند. اشکال (a-d) ۳ به ترتیب اثر عدد رینولدز تزریق (Re) و متغیر ویکوزیته متقابل (K_1) را روی پروفیل های سرعت $f(\eta)$ و $f'(\eta)$ (زمانی که $Re=1,3,5$ و $K_1=0.02, 0.15, 0.2$) نشان می دهند. همان طور که از شکل های (a-d) ۳ مشخص است با افزایش Re و K_1 ، پروفیل های سرعت $f(\eta)$ و $f'(\eta)$ افزایش می یابند. همچنین، شکل های (c-d) ۳ نشان می دهند، از صفحه پایینی تا صفحه بالایی، مقدار $f'(\eta)$ به یک نقطه حداکثر می رسد و بعد از آن شروع به کاهش می کند. در این مقاله، اثرات عدد رینولدز (Re) و متغیر ویکوزیته متقابل (K_1) روی پروفیل توزیع دما $q_n(\eta)$ (زمانی که $Re=1,3,\dots,9$) و $0.3, \dots, 0.15, 0.02$) به ترتیب در اشکال (a-b) ۴ نشان داده شده است. خروجی ها نشان می دهند که K_1 دارای رابطه مستقیم با پروفیل توزیع دما $q_n(\eta)$ می باشد، اما برخلاف آن عدد Re ، ارتباط معکوس با پروفیل دما دارد. شکل ۵ تغییرات اصطکاک پوسته $f''(\eta)$ از طریق عدد رینولدز (Re) برای مقادیر متغیر ویکوزیته متقابل (K_1) را نشان می دهد. متناسب با این شکل، می توان دید که با افزایش K_1 برای مقادیر ثابت عدد Re ، اصطکاک پوسته $f''(\eta)$ کاهش می یابد. به همین دلیل، از آنجایی که $f''(0)$ مقیاسی برای نیروی اصطکاک می باشد، پیشنهاد می شود که سیالات و اسکوالاستیک بعنوان سیال مبرد برای موتورهای توربین گاز صنعتی استفاده شوند. همچنین اشکال (a-b) ۶ به ترتیب پروفیل توزیع دما $q_n(\eta)$ را برای مقادیر مختلف شاخص قانون توان (n) و عدد پرانتل (Pr) نشان می دهد. با توجه به آنچه در شکل های ۶ نشان داده شده، با افزایش Pr و n ، پروفیل توزیع دما تنزل پیدا می کند. بعلاوه در این پژوهش، تغییرات نرخ انتقال حرارت بی بعد (عدد ناسلت (NU)) از طریق عدد رینولدز (Re) برای مقادیر متغیر شاخص قانون توان و عدد پرانتل در اشکال (a-b) ۷ نشان داده شده است. به طور کلی، برای مقدار مختلف Re مشاهده می شود که بدلیل افزایش Pr و n ، عدد ناسلت (NU) افزایش می یابد. همچنین، نقشه های برجسته، اثر عدد رینولدز (Re)، عدد پرانتدل (Pr) و شاخص قانون توان (n) در گستره وسیعی از داده ها بمنظور درک بهتر از تغییرات پارامترها در اشکال (۸-۱۱) نشان داده شده اند.

۵. نتیجه گیری

در این تحقیق، ما جریان سیال غیرنیوتنی را در یک کانال متقارن با یک دیواره متخلخل برای کاربردهای سرمایه گذاری توربین با استفاده از روش اکبری-گنجی (AGM) مطالعه کردیم. مقایسه نتایج AGM با نتایج روش عددی (Flex-PDE)، انجام شد. اشکال و جداول به وضوح نشان می دهند که نتایج بدست آمده از AGM دارای تطابق عالی با نتایج نرم افزار Flex-PDE می باشند. همچنین، در این مقاله، اثر متغیرهای تعبیه شده نظیر: عدد پرانتل، متغیر ویکوزیته متقابل، شاخص قانون توان و عدد رینولدز تزریق روی پروفیل های سرعت و دمای بی بعد تحلیل شدند. نتایج نشان دادند که عدد ناسلت دارای یک رابطه مستقیم با شاخص قانون توان، عدد پرانتل و عدد رینولدز می باشد. و نیز نتایج نشان می دهند با افزایش K_1 ، برای مقدار ثابت عدد Re ، اصطکاک پوسته کاهش می یابد. بعلاوه، این تحقیق نشان می دهد که AGM یک روش قدرتمند برای حل معادلات دیفرانسیلی غیرخطی می باشند.

۶. مراجع

1. Debruge, L. L., and Han, L. S., (1972), "Heat Transfer in a Channel with a Porous Wall for Turbine Cooling Application," ASME J. Heat Transfer, 11, pp. 385-390.

2. Goldstein R. J., Ibele W. E., Patankar S. V., Simon T. W., Kuehn T. H., Strykowski P. J., Tamma K. K., Heberlein J. V. R., Davidson J. H., Bischof J., Kulacki F. A., Kortshagen U., Garrick S. and Srinivasan V., E. Eckert R. G., (2003), "Heat Transfer-A Review of 2001 Literature," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 46, pp. 1887-1992.
3. Goldstein R. J., Ibele W. E., Patankar S. V., Simon T. W., Kuehn T. H., Strykowski P. J., Tamma K. K., Heberlein J. V. R., Davidson J. H., Bischof J., Kulacki F. A., Kortshagen U., Garrick S. and Srinivasan V., Bar-Cohen A., (2005), "Heat Transfer-A Review of 2002 Literature," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 48, pp. 819-927.
4. Goldstein R. J., Ibele W. E., Patankar S. V., Simon T. W., Kuehn T. H., Strykowski P. J., Tamma K. K., Heberlein J. V. R., Davidson J. H., Bischof J., Kulacki F. A., Kortshagen U., Garrick S. and Srinivasan V., (2006), "Heat Transfer-A Review of 2003 Literature," *Int. J. Heat Mass Transfer*, 49, pp. 451-534.
5. Wang, C. C. and Chen, C. K., "Mixed Convection Boundary Layer Flow on Inclined Wavy Plates Including the Magnetic Field Effect," *Int. J. of Thermal Science*, Vol. 44, pp 577-586, 2005.
6. Wang, C. C. and Chen, C. K., "Mixed Convection Boundary Layer Flow of Non-Newtonian Fluids along Vertical Wavy Plates", *Int. J. Heat and Fluid Flow*, Vol. 23, pp 831-839, 2002.
7. Barth, W.L. and G.F. Carey, on a natural-convection benchmark problem in nonNewtonian fluids. *Numerical Heat Transfer, Part B: Fundamentals*, 3004. 30(2): p. 112-314.
8. Alahyari Beig S., Mirzakhali E., and Kowsari F., "Investigation of optimal position of a vortex generator in a blocked channel for heat transfer enhancement of electronic chips", *International Journal of Heat and Mass Transfer*, Vol. 54, No. 19-20, 2011, pp. 4317-4324.
9. Raja M., Arunachalam R. M., Suresh S., "Experimental Studies on Heat Transfer of Alumina/Water Nanofluid in a shell and Tube Heat Exchanger with Wire Coil Insert", *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, Vol. 7, No. 1, 2012, pp. 16-23.
10. Pia G., Sanna U., "Case studies on the influence of microstructure voids on thermal conductivity in fractal porous media". *Case Study. Therm. Eng.* (2014); 2:8-13.
11. Dogonchi A.S., "Investigation of heat transfer for cooling turbine disks with a non-Newtonian fluid flow using DRA", *Case Studies in Thermal Engineering* 6 (2015) 40-51.
12. Khani F., Darvishi M. T., Rama Subba Reddy Gorla, "Analytical investigation for cooling turbine disks with a non-Newtonian viscoelastic fluid", *Computers and Mathematics with Applications* 61 (2011) 1728-1738.