

تجزیه و تحلیل تولید آنتروپی در فرآیند انتقال حرارت به جریان توسعه یافته آرام با سیال لزج تراکم ناپذیر درون لوله با دیواره دما ثابت*
(یادداشت پژوهشی)

جواد ابوالفضللی اصفهانی^(۱) فرشاد باغدار^(۲)

چکیده اکثر فرایندهایی که به نحوی با انتقال حرارت جابجایی سروکار دارند، در معرض دو افت اجتناب ناپذیر اصطکاکی و حرارتی می باشند. با بکارگیری قانون دوم ترمودینامیک می توان میزان تولید آنتروپی و این افت های اجتناب ناپذیر را کمینه کرد. در این مقاله با انتخاب پارامتر تولید آنتروپی بدون بعد به عنوان معیار ارزیابی و با دیدی کاربردی میزان تولید آنتروپی مورد بررسی قرار گرفته است. تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد گرمایی و اصطکاکی و همچنین تولید آنتروپی بدون بعد کل بر حسب طول لوله در قطرهای و سرعت های مختلف برای سیالی با لزجت بالا (گلیسرین) مورد بررسی قرار گرفته است. همچنین میزان تولید آنتروپی در دبی ثابت بازای سرعت ها و قطرهای مختلف ارائه شده است و ارتباط بهینه ای بین طول، قطر لوله و سرعت سیال بدست آمده است. **واژه های کلیدی** انتقال حرارت، تولید آنتروپی، طول بهینه، افت اصطکاکی، افت حرارتی

Entropy Generation Analysis of Convective Heat Transfer
Through Fully Developed, Laminar, Viscous Flow With a Duct
Subjected to Constant Wall Temperature

J. Abolfazli Esfahani

Farshad Baghdar

Abstract Most convective heat transfer process are characterized by two types of losses, namely: Losses due to fluid friction and those due to heat transfer across a finite temperature difference. Second law analysis seeks to minimize this loss by keeping the entropy generated to the minimum. A dimensionless entropy generation is used to evaluate this. The variation of entropy generation due to friction and heat transfer, and those of total entropy generation are studied along the duct as well as varying the diameter of pipe and velocity of fluid. The fluid under consideration has high viscosity (glycerol). Also, the variation of entropy generation, for fixed mass flux, due to velocity of fluid and diameter of pipe is studied, and optimum relation among length, diameter, and velocity are obtained.
Key Words Heat Transfer, Entropy Generation, Optimum Length, Friction Loss, Heat Loss.

* نسخه اولیه مقاله در تاریخ ۸۰/۳/۵ و نسخه نهایی آن در تاریخ ۸۰/۹/۱۱ به دفتر نشریه رسیده است.

۱ - استادیار گروه مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

۲ - کارشناس ارشد مکانیک، دانشکده مهندسی، دانشگاه فردوسی مشهد

مقدمه

امروزه با افزایش آگاهی از محدودیت منابع انرژی و همچنین افزایش تقاضای مصرف انرژی از یک طرف و وجود اتلاف انرژی قابل ملاحظه در سیستم‌های حرارتی از طرف دیگر، جوامع علمی را بر آن داشته است تا با بررسی سیستم‌های انرژی، در پی راهکاری برای کاهش اتلاف انرژی از این سیستم‌ها باشند. یکی از روشهایی که در مورد سیستم‌های انرژی به طور گسترده بکار برده می‌شود، بررسی سیستم‌ها از دیدگاه قانون دوم ترمودینامیک و سعی بر کاهش میزان بازگشت‌ناپذیری آنها می‌باشد. بازگشت‌ناپذیری عاملی است که باعث افزایش کار هدر رفته (work loss) و کاهش کار مفید (useful work) و پتانسیل انجام کار سیستم می‌شود. از آنجا که میزان تولید آنتروپی بیانگر میزان بازگشت‌ناپذیری سیستم می‌باشد، بوسیله اعمال قانون دوم ترمودینامیک بر روی سیستم‌ها می‌توان با کمینه کردن تولید آنتروپی، افت‌های اصطکاکی و حرارتی را به حداقل رساند [1]. اکثر فرآیندهای انتقال حرارت جابجایی شامل دو نوع بازگشت‌ناپذیری می‌شوند [2]، یکی در ارتباط با ترم اصطکاکی و تلفات لزجی سیال و دیگری متناسب با میزان انتقال حرارت بواسطه یک اختلاف دمایی محدود می‌باشد.

بیجان (A. Bejan)، خط‌مشی آنالیز قانون دوم ترمودینامیک را در طراحی سیستم‌های حرارتی به طور دقیق بیان کرده [3-6] و گام‌های اصلی در زمینه بررسی تولید آنتروپی در سیستم‌های عملی را نیز بطور واضح مدون نموده است. او در یکی از آخرین آثارش بطور اجمالی بر کارهای انجام شده در زمینه تولید آنتروپی در سیستم‌های انرژی مروری کرده است و می‌توان آن را دائرةالمعارفی در این زمینه دانست [7].

انتقال حرارت از لوله دما ثابت را می‌توان در شرایط

تغییر فاز جریان در اطراف لوله یک مبدل حرارتی مشاهده کرد. تجزیه و تحلیل انتقال حرارتی ترمودینامیکی داخل لوله دما ثابت را ننگ و ماخرجی (Nag, Makherjee) [8] در سال ۱۹۸۷ به صورت تحلیلی انجام دادند. آنها با فرض اختلاف دمایی ناچیز بین دیواره و ورودی لوله، پارامتر بدون بعدی از اختلاف دمایی ورودی سیال و دمایی دیواره لوله به نام عبارت وظیفه (duty parameter) تعریف کردند. ضمناً تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد، بخش بر عبارت وظیفه را بر حسب تغییرات پارامتر بدون بعد دمایی نمایش دادند و کمینه‌هایی بر حسب دمایی ورودی ارائه کردند. همچنین میزان انتقال حرارت به توان پمپی را برحسب پارامتر وظیفه رسم کردند و به نقاط بهینه‌ای دست یافتند. چون مخرج کسر تابع مورد بررسی آنها یعنی عبارت وظیفه، خود تابعی از پارامتر بدون بعد دمایی می‌باشد، نقاط بهینه که در نمودارهای آنها بدست آمده نمی‌تواند بیانگر نقطه بهینه طرح باشد.

سahin (Sahin) تولید آنتروپی در جریان لزج آرام داخل یک لوله دما ثابت را مجدداً مورد بررسی قرار داده است [9]. او نشان داده که یک اندازه بهینه مبدل و یا دمایی ورودی سیال وجود دارد که نسبت تولید آنتروپی بدون بعد، میزان کمتری نسبت به حالت لزجت ثابت پیدا خواهد کرد. ساهین در ادامه کارش [10]، اثرات وابستگی لزجت با دما بر تولید آنتروپی را در فرآیند گرمایش جریان مغشوش با دیواره دما ثابت نشان داده است. در این مقاله بیشتر بر روی پارامتر بدون بعد نسبت تولید آنتروپی به انتقال حرارت تکیه گردیده و نشان داده شده است که این پارامتر بدون بعد نسبت به پارامتر بدون بعد $St1/D$ کمینه دارد. St بیانگر عدد استنتون می‌باشد.

در کار حاضر، میزان تولید آنتروپی بدون بعد (نسبت تولید آنتروپی به انتقال حرارت) بر حسب طول لوله برای قطرهای و سرعت‌های مختلف مورد بررسی قرار

دمای شدیدتری وجود دارد.

میزان تولید آنتروپی در داخل حجم کنترل شکل (۱)

را می توان به صورت زیر نوشت [1,2].

$$d\dot{S}_{gen} = \dot{m}ds - \frac{\delta Q}{T_w} \quad (4)$$

برای سیال تراکم ناپذیر تعریف آنتروپی به صورت زیر

است [1,2]:

$$ds = \frac{C_p dT}{T} - \frac{dp}{\rho T} \quad (5)$$

از جایگذاری تعریف آنتروپی معادله (۵) و میزان تبادل

حرارت معادله (۱) در میزان تولید آنتروپی معادله (۴)،

رابطه زیر نتیجه خواهد شد:

$$d\dot{S}_{gen} = \dot{m}C_p \left(\frac{T_w - T}{TT_w} dT - \frac{1}{\rho C_p T} dp \right) \quad (6)$$

که افت فشار در معادله (۶) بوسیله رابطه زیر بیان

می شود [12]:

$$dp = - \frac{f \bar{U}^2}{\gamma D} dx \quad (7)$$

که f شاخص اصطکاکی می باشد.

با جایگذاری معادلات (۷) و (۳) در معادله (۶) و

انتگرال گیری در طول لوله، آنتروپی تولیدی کل به

صورت زیر بدست می آید:

$$\dot{S}_{gen} = \dot{m}C_p \left\{ \ln \left(\frac{1 - \tau e^{f_{al}}}{1 - \tau} \right) - \tau (1 - e^{f_{al}}) + \frac{1}{\lambda} \frac{f \bar{U}^2}{h T_w} \right. \\ \left. \ln \left(\frac{e^{f_{al}} - \tau}{1 - \tau} \right) \right\} \quad (8)$$

گرفته و ارتباط بهینه بین طول، قطر و سرعت لوله تجزیه و تحلیل شده است.

تولید آنتروپی

یک کانال با مقطع ثابت به قطر D ، طول L و دمای ثابت T_w را در نظر بگیرید. سیال با دبی جرمی \dot{m} و دمای ورودی T_i وارد لوله می شود. انتقال حرارت به توده سیال با ضریب انتقال حرارت جابجایی h صورت می گیرد. با توجه به فرض توسعه یافته بودن جریان و ثابت بودن کلیه خواص در طول لوله، مقدار h ثابت است. بنا بر قانون بقای انرژی [11]، نرخ انتقال حرارت به سیال داخل حجم کنترل در دو جهت شعاعی و طولی باید برابر باشند.

$$\delta Q = \dot{m} C_p dT = \bar{h} \pi D (T_w - T) dx \quad (1)$$

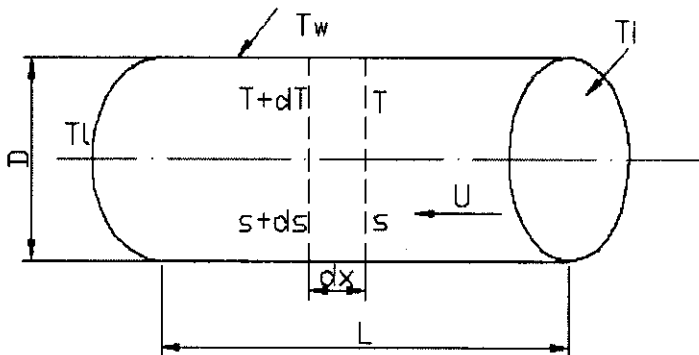
که

$$\dot{m} = \rho \bar{U} \frac{\pi D^2}{4} \quad (2)$$

با انتگرال گیری از معادله (۱)، تغییرات دمای توده سیال در طول لوله به صورت زیر بدست می آید:

$$T = T_w - (T_w - T_i) \exp \left(- \frac{4 \bar{h} L}{\rho U D C_p} \right) \quad (3)$$

که نشان می دهد تغییرات دما در طول لوله به طور نمایی به دمای دیواره نزدیک می شود و در ابتدای لوله تغییرات



شکل ۱ نمای کلی انتقال حرارت در لوله دما ثابت

جریان آرام کاملاً توسعه یافته در طول یک لوله با فرض

خواص ثابت به صورت زیر می‌باشد:

$$f = \frac{64}{Re}, \quad Re = \frac{\rho \bar{U} D}{\mu}, \quad Nu = 3/66 \quad (16)$$

بحث و نتیجه‌گیری

بررسی‌هایی که در ادامه آمده برای داده‌های جدول (۱) می‌باشد که خواص فیزیکی گلیسرین است. در این بررسی مقادیر سرعت و قطر ارائه شده در جدول (۱) به عنوان مبنای مقایسه انتخاب شده و تغییرات آنها مورد تجزیه و تحلیل قرار خواهند گرفت. شکل (۲) تغییرات Ψ را برحسب طول نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود Ψ_{total} کمینه دارد و این بدان معناست که برای جریانی با دبی مشخص (قطر و سرعت مشخص)، دمای ورودی مشخص T_i و دمای دیواره مشخص T_w یک طول بهینه وجود دارد که در آن نسبت تولید آنتروپی کل به انتقال حرارت کمینه می‌باشد. در شرایط مشخص شکل (۲)، این طول بهینه ۴۰متر می‌باشد.

جدول ۱ شرایط فیزیکی مبنای مقایسه [9]

C_p	(J/kg k)	۲۴۲۸/۰۰۰۰
K	(w/m k)	۰/۲۶۴۰
P	(kg/m ^۳)	۱۲۶۰/۰۰۰۰
μ	(Ns/m)	۱/۴۸۰۰
T_i	(k)	۲۹۳/۰۰۰۰
T_w	(k)	۳۷۳/۰۰۰۰
U	(m/s)	۰/۵۰۰۰
D	(m)	۰/۰۲۵۴

همانطور که مشاهده می‌شود Ψ_{Fr} و Ψ_{th} در نقطه‌ای با یکدیگر تلاقی می‌کنند. این موضوع بیانگر این مطلب است که میزان Ψ_{Fr} و Ψ_{th} در این نقطه برابر می‌باشند. در سمت راست این نقطه تلاقی Ψ_{Fr} و در سمت چپ این

که

$$\tau = \frac{T_w - T_i}{T_w} \quad \& \quad a = \frac{\bar{h}}{\rho \bar{U} D C_p} \quad (9)$$

نرخ انتقال حرارت کل به سیال برابر است با

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_1 - T_i) \quad (10)$$

که با جایگذاری معادله (۳) در آن رابطه زیر بدست می‌آید:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p (T_1 - T_i) (1 - e^{-\tau a l}) \quad (11)$$

در اکثر کاربردها، میزان انتقال حرارت و افزایش آن به عنوان یک پارامتر هدف در طراحی سیستم‌های حرارتی مد نظر می‌باشد و از طرفی برای افزایش پتانسیل کارمید میزان تولید آنتروپی باید کاهش یابد. بدین ترتیب با تعریف پارامتر بدون بعد Ψ به صورت زیر [9]

$$\Psi = \frac{\dot{S}_{gen}}{\dot{Q} / (T_w - T_i)} \quad (12)$$

میزان پارامتر Ψ باید به کمترین مقدار خود برسد. در نتیجه پارامتر تولید آنتروپی بدون بعد اهمیت ویژه می‌یابد. معادله تولید آنتروپی کل را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد:

$$\Psi = (1 - e^{-\tau a l})^{-1} \left\{ \ln \left(\frac{1 - \tau e^{-\tau a l}}{1 - \tau} \right) - \tau (1 - e^{-\tau a l}) + \frac{1/2 \rho \bar{U}^3}{\lambda \bar{h} T_w} \ln \left(\frac{e^{-\tau a l} - \tau}{1 - \tau} \right) \right\} \quad (13)$$

میزان تولید آنتروپی بدون بعد را می‌توان به دو بخش آنتروپی حرارتی و اصطکاکی بیان کرد.

$$\Psi_{th} = (1 - e^{-\tau a l})^{-1} \times \ln \left(\frac{1 - \tau e^{-\tau a l}}{1 - \tau} \right) - \tau \quad (14)$$

$$\Psi_{Fr} = \frac{1/2 \rho \bar{U}^3}{\lambda \bar{h} T_w} \times (1 - e^{-\tau a l})^{-1} \times \ln \left(\frac{e^{-\tau a l} - \tau}{1 - \tau} \right) \quad (15)$$

مقدار ضریب اصطکاکی و ضریب انتقال حرارت برای

برای قطرهای مختلف را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش قطر، مقدار Ψ_{Fr} کاهش می‌یابد. علت آنرا با شرایط فیزیکی و معادلات حاکم اینگونه می‌توان توجیه کرد که تولید آنتروپی متناسب با افت فشار و افت فشار متناسب با سرعت و عکس مجذور قطر می‌باشد $(\dot{S}_{gen} \propto \frac{dP}{dx} \propto \frac{\bar{U}}{D^3})$. بنابراین در سرعت ثابت، با افزایش قطر، تولید آنتروپی (\dot{S}_{gen}) کاهش یافته که بالطبع مقدار Ψ_{Fr} کاهش خواهد یافت. از طرف دیگر، با افزایش قطر چون سطح انتقال حرارت افزایش یافته، میزان انتقال حرارت $(q=h \cdot A \cdot dT)$ افزایش می‌یابد یعنی مخرج کسر Ψ_{Fr} افزایش یافته که در نتیجه مجدداً کل کسر $\Psi = \frac{S}{Q/(T_w - T_i)}$ کاهش خواهد یافت.

نکته دیگری که در این نمودار مشاهده می‌شود این است که همه منحنی‌ها از یک نقطه ثابت خاص شروع می‌شوند. اگر عبارت Ψ_{Fr} به سمت طول صفر میل کند، مقدار آن برابر خواهد شد با:

$$\Psi_{Fr} \Big|_{l \rightarrow 0} = \frac{\lambda \mu \bar{U}^2}{NukT_i} \quad (21)$$

که هیچ وابستگی به قطر نداشته و عدد ثابتی را نمایش می‌دهد. همچنین با کمی دقت در منحنی‌ها دیده می‌شود که منحنی‌ها بعد از یک طول معینی دارای شیب ثابت هستند، که این موضوع از معادلات نیز قابل درک است.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial l} \Big|_{l \rightarrow \infty} = \frac{32\mu \bar{U}}{\rho C_p D^2 T_w} \quad (22)$$

بنابراین در یک سرعت ثابت، شیب منحنی‌ها متناسب با $1/D^2$ می‌باشد. ضمناً شیب نمودارها در محدوده $\frac{1}{D^2} \rightarrow \infty$ کم $\theta < \pi/2$ بوده، که در قطرهای خیلی کم $\frac{1}{D^2} \rightarrow 0$ مقدار شیب $\theta = \pi/2$ ، و در قطرهای خیلی زیاد $\frac{1}{D^2} \rightarrow 0$ مقدار شیب $\theta = 0$ می‌باشد. در نتیجه، در مسایل کاربردی مناسب است که حتی المقدور شیب منحنی کاهش داده

نقطه، Ψ_{th} غالب می‌باشد. نکته دیگری که در شکل (۲) مشاهده می‌شود این است که در طول‌های زیاد (تقریباً پس از نقطه تلاقی Ψ_{Fr} و Ψ_{th}) تغییرات Ψ_{total} برحسب طول به صورت خطی است. این شیب برابر شیب Ψ_{Fr} می‌باشد، زیرا که Ψ_{th} به مقدار ثابتی میل کرده است. این نکته از معادلات حاکم نیز قابل درک است، چون مقدار شیب Ψ_{total} در طول به سمت بینهایت خواهد شد که مستقل از طول بوده و بیانگر یک شیب ثابت است.

$$\frac{\partial \Psi}{\partial l} \Big|_{l \rightarrow \infty} = \frac{32\mu \bar{U}}{\rho C_p D^2 T_w} \quad (17)$$

اثر قطر در سرعت ثابت. شکل (۳)، تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد گرمایی، (Ψ_{th}) برحسب طول در یک سرعت ثابت و برای قطرهای مختلف را نمایش می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود در یک طول معین، مقادیر Ψ_{th} با افزایش قطر افزایش می‌یابند و در قطرهای کم، Ψ_{th} خیلی سریعتر به مقدار حدی خود میل می‌کند. از طرفی منحنی‌ها همه از یک نقطه در ابتدای لوله $l=0$ شروع می‌شوند. مقدار Ψ_{total} در حد طول به سمت صفر و به صورت زیر بدست می‌آید:

$$\Psi_{th} \Big|_{l \rightarrow 0} = \frac{\tau}{1-\tau^2} \quad (18)$$

که هیچ وابستگی به قطر ندارد. همچنین همه منحنی‌ها در طول بی‌نهایت به سمت یک مقدار ثابت میل می‌کنند این مقدار ثابت برابر است با:

$$\Psi_{th} \Big|_{l \rightarrow \infty} \quad (19)$$

ضمناً دیده می‌شود که اگر T_i به سمت T_w میل کند،

$$\Psi_{th, \infty} \tau \rightarrow 0 \quad (20)$$

این امر بخاطر از بین رفتن عامل بوجود آورنده تولید آنتروپی گرمایی (انتقال حرارت) می‌باشد.

شکل (۴)، تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد اصطکاکی (Ψ_{Fr}) برحسب طول در یک سرعت ثابت و

همانطور که در شکل مشاهده می شود کمینه مقدار تولید آنتروپی به قطر بستگی نداشته و مقدار آن حدود ۰/۰۵۱ است. همچنین میزان تولید آنتروپی منحنی ها تا نقطه کمینه محدود است، در صورتی که بعد از نقطه کمینه، منحنی ها حالت صعودی با شیب ثابت پیدا می کنند بنابراین نقطه طراحی باید حتی الامکان در همسایگی نقطه کمینه باشد.

اثر سرعت در قطر ثابت. شکل (۶) تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد حرارتی (Ψ_{th}) برحسب طول در قطر ثابت برای سرعت های مختلف را نمایش می دهد. همانطور که مشاهده می شود رفتار منحنی ها شبیه منحنی های نمودار (۳)، از یک نقطه ثابت شروع و به یک مقدار ثابت در بینهایت میل می کنند که مانند شکل (۳)، نقطه شروع در $\frac{\tau^2}{1-\tau^2}$ و مقداری که منحنی ها در طول های زیادتر به آن میل می کنند برابر $\ln(\frac{1}{1-\tau}) - \tau$ می باشد. با دقت در منحنی ها مشاهده می شود که با افزایش سرعت، میزان تولید آنتروپی بدون بعد حرارتی (Ψ_{th}) افزایش یافته و از شدت میل به مقدار حدی منحنی ها کاسته می شود. به عبارت دیگر با افزایش سرعت، جریان خود را دیرتر و در طول های بلندتر به حالت پایدار و یکنواخت می رساند.

شکل (۷)، تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد اصطکاکسی (Ψ_{Fr}) برحسب طول در قطر ثابت ($d=0/0254m$) و سرعت های مختلف را نمایش می دهد. همانطور که مشاهده می شود، با افزایش سرعت مقدار Ψ_{Fr} افزایش می یابد. علت آنرا می توان اینگونه توجیه کرد که چون تولید آنتروپی متناسب با افت فشار، و افت فشار متناسب با سرعت و عکس مجذور قطر می باشد ($\dot{S}_{gen} \propto \frac{dp}{dx} \propto \frac{U^3}{D^5}$)، بنابراین در قطر ثابت با افزایش سرعت تولید آنتروپی (\dot{S}_{gen}) افزایش می یابد،

شود و از قطرهای بزرگتر استفاده گردد.

شکل (۵)، تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد کل (Ψ_{total}) برحسب طول در سرعت ثابت ($u=0/5m/s$) و در قطرهای مختلف را نمایش می دهد. همانطور که در شکل مشاهده می شود، با افزایش قطر در سرعت ثابت، شیب منحنی ها کمتر می شود. این کاهش شیب بعد از نقطه بهینه متناسب با $1/D^2$ می باشد، زیرا که شیب منحنی اصطکاکسی برابر است. یعنی:

$$\left. \frac{\partial \Psi_{total}}{\partial l} \right|_{l \rightarrow \infty} = \frac{32\mu \bar{U}}{\rho C_p D^2 T_w} \quad (23)$$

نقاط کمینه منحنی ها به خاطر رفتار متفاوت Ψ_{Fr} و Ψ_{th} می باشد، Ψ_{th} رفتاری نزولی و Ψ_{Fr} رفتاری صعودی دارد. همانطور که دیده می شود منحنی ها در ابتدای لوله، $l=0$ ، همه از یک نقطه ثابت شروع می شوند. اگر عبارت Ψ_{total} به سمت صفر میل کند، عبارت زیر بدست می آید، که تابعی از قطر نمی باشد.

$$\Psi_{total} = \frac{\tau^2}{1-\tau^2} + \frac{\lambda \mu \bar{U}^2}{NukT_i} \quad (24)$$

طول های بهینه به ازاء قطرهای مختلف در جدول (۲) آورده شده است. نکته جالب توجه این است که نسبت قطر به طول بهینه، تقریباً مقدار ثابت $D^2/L_{opt} \approx 1/6 \mu m$ می باشد.

جدول ۲ طول بهینه به ازای قطرهای مختلف

L(m)	D(m)
۲۳۰	۰/۰۱۹۰۵
۴۰۸	۰/۰۲۵۴۰
۱۶۱۳	۰/۰۵۰۸۰
۳۵۹۴	۰/۰۷۶۲۰
۶۳۵۹	۰/۱۰۱۶۰

در طول‌های کوتاهتر و سرعت‌های پایین، اثر Ψ_{Fr} نسبت به Ψ_{th} ناچیز بوده و بنابراین Ψ_{total} همانند Ψ_{th} (شکل ۶) رفتار می‌کند. در نتیجه نقطه کمینه وجود دارد و به سمت طول‌های کمتر میل می‌کند. از طرف دیگر با افزایش سرعت، میزان Ψ_{Fr} و Ψ_{th} افزایش می‌یابد، ولی افزایش Ψ_{Fr} نسبت به Ψ_{th} چشمگیرتر است. یعنی رفتار Ψ_{total} همانند رفتار Ψ_{Fr} کاملاً صعودی است.

اثر قطر و سرعت در دبی جرمی ثابت. (شکل ۹)، تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد گرمایی و اصطکاکی (Ψ_{Fr} و Ψ_{th}) را برحسب طول و در دبی ثابت برای دو حالت نمایش می‌دهد.

حالت اول: $d = 0.0508 \text{ m}$, $u = 1 \text{ m/s}$

حالت دوم: $d = 0.0254 \text{ m}$, $u = 2 \text{ m/s}$

همانطور که ملاحظه می‌شود، در حالت (۲) مقدار سرعت دو برابر و قطر نصف شده است.

شکل (۸) تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد کل (Ψ_{total}) برحسب طول در قطر ثابت و سرعت‌های مختلف را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت، میزان تولید آنتروپی کل افزایش می‌یابد. چون سیال مورد نظر لزجت بالایی دارد، رفتارش بیشتر تابع تغییرات Ψ_{Fr} (شکل ۷) می‌باشد. همچنین در طول‌های زیادتر، با افزایش سرعت شیب منحنیها متناسب با سرعت سیال افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، مشاهده می‌شود که در نقاط ابتدایی لوله مقدار Ψ_{total} متناسب با توان دوم سرعت افزایش می‌یابد (معادله ۲۱).

شکل (۱۰) تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد کل (Ψ_{total}) برحسب طول در دبی ثابت را برای دو حالت مذکور ارائه می‌دهد. همانطور که مشاهده می‌شود، در دبی‌های یکسان، حالت سرعت کمتر و قطر بیشتر، تولید آنتروپی کمتری دارد بنابراین برای داشتن Ψ_{total} کمتر، یعنی انتقال حرارت بیشتر و تولید آنتروپی

یعنی صورت عبارت Ψ_{Fr} افزایش می‌یابد. از طرفی با افزایش سرعت، رژیم جریان تغییر نیافته است (جریان آرام فرض شده است)، بنابراین زمان عبور یک توده سیال از طول معین کاهش یافته و از میزان انتقال حرارت به توده سیال کاسته می‌شود. بنابراین صورت کسر افزایش و مخرج آن کاهش می‌یابد. در نتیجه Ψ_{Fr} افزایش خواهد یافت.

همانطور که مشاهده می‌شود با افزایش سرعت، شیب نمودارها افزایش می‌یابد ولی این تغییر شیب نسبت به نمودار (۴) که در آن قطر متغیر می‌باشد، شدت کمتری دارد که علت آن را می‌توان در $\frac{\partial \Psi_{Fr}}{\partial l} \Big|_{l \rightarrow \infty} = \frac{32\mu \bar{U}}{\rho C_p D^2 T_w}$ مشاهده کرد. شیب نمودارها متناسب با $\frac{\partial \Psi_{Fr}}{\partial l} \Big|_{l \rightarrow \infty} \propto \frac{\bar{U}}{D^2}$ بوده که تاثیر قطر، بیشتر از اثر سرعت می‌باشد. ضمناً دیده می‌شود هنگامی که طول به سمت صفر میل می‌کند مقدار Ψ_{Fr} وابسته به سرعت می‌باشد، این وابستگی متناسب با توان دوم سرعت است زیرا:

$$\Psi_{Fr} \Big|_{l \rightarrow 0} = \frac{\lambda \mu \bar{U}^2}{NukT_i}$$

در حالیکه هنگام بررسی اثر قطر، $\Psi_{Fr} \Big|_{l \rightarrow 0}$ به قطر بستگی ندارد (معادله ۲۱).

شکل (۸) تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد کل (Ψ_{total}) برحسب طول در قطر ثابت و سرعت‌های مختلف را نمایش می‌دهد. مشاهده می‌شود که با افزایش سرعت، میزان تولید آنتروپی کل افزایش می‌یابد. چون سیال مورد نظر لزجت بالایی دارد، رفتارش بیشتر تابع تغییرات Ψ_{Fr} (شکل ۷) می‌باشد. همچنین در طول‌های زیادتر، با افزایش سرعت شیب منحنیها متناسب با سرعت سیال افزایش می‌یابد. علاوه بر آن، مشاهده می‌شود که در نقاط ابتدایی لوله مقدار Ψ_{total} متناسب با توان دوم سرعت افزایش می‌یابد (معادله ۲۱).

نکته دیگری که در این منحنیها مشاهده می‌شود این است که موقعیت طول کمینه منحنیها متغیر می‌باشد.

در یک سرعت ثابت، نسبت قطر به طول بهینه تقریباً ثابت می ماند $\frac{D^2}{L_{opt}} \approx 1/6 \mu\text{m}$
 نمودار آنتروپی بدون بعد کل بر حسب طول در سرعت های پایین و قطرهای بالا یکنواخت تر می باشد، که در طول های بالا مطلوب می باشد.
 شیب نمودار آنتروپی بدون بعد کل در طول های بالا برابر است با:

$$\left. \frac{\partial \Psi}{\partial l} \right|_{l \rightarrow \infty} = \frac{32\mu \bar{U}}{\rho C_p D^2 T_w}$$

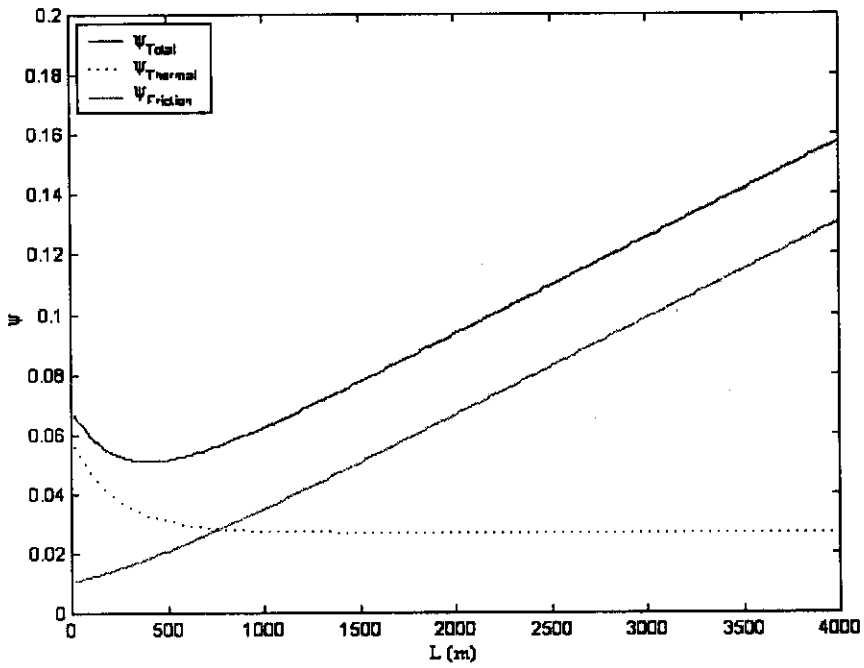
فهرست علائم

T_w	(k)	دمای دیواره لوله
T_l	(k)	دمای خروجی سیال
T_i	(k)	دمای ورودی سیال
U	(m/s)	سرعت متوسط سیال
D	(m)	قطر لوله
C_p	(J/kg k)	ظرفیت گرمای ویژه سیال
K	(w/mk)	ضریب هدایت حرارتی سیال
ρ	(kg/m ³)	چگالی سیال
μ	(N s/m)	لزجت سیال
h	(w/m ² k)	متوسط ضریب انتقال حرارت جابجایی
s	(J/kgk)	آنتروپی سیال
\dot{S}_{gen}	(w/k)	تولید آنتروپی
\dot{Q}	(w)	نرخ انتقال گرمای کل
f		شاخص (فاکتور) اصطکاک
Ψ_{Fr}		تولید آنتروپی بدون بعد اصطکاک
Ψ_{th}		تولید آنتروپی بدون بعد گرمایی
Ψ_{total}		تولید آنتروپی بدون بعد کل
St		عدد استنتون
Re		عدد رینولدز
$\tau = (T_w - T_i)/T_w$		پارامتر بدون بعد دمایی

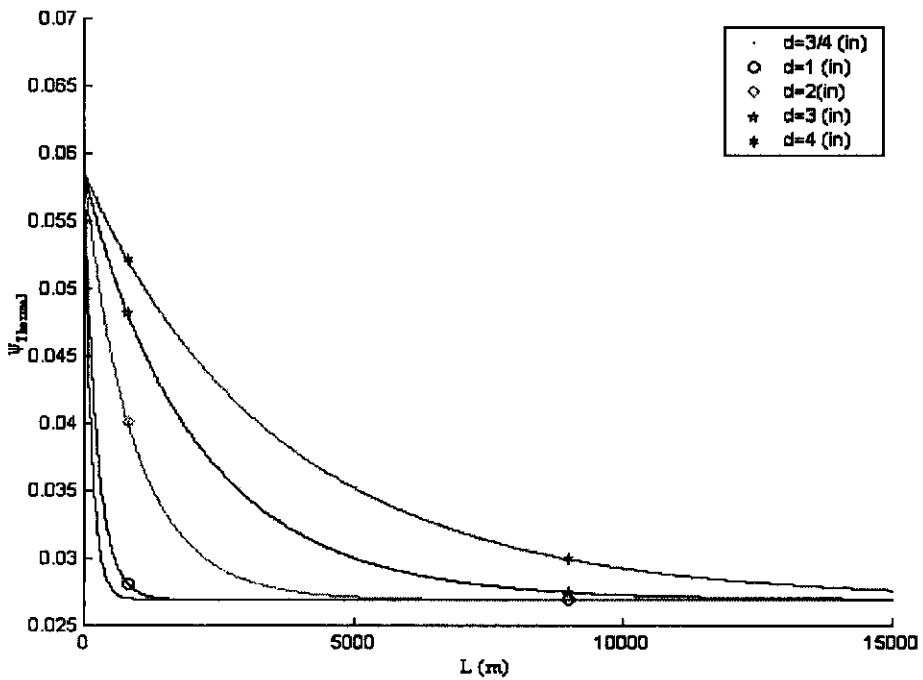
کمتر، لوله ای با قطر بزرگتر و سرعت سیال کمتر بهتر است. این عبارت را می توان اینگونه توجیه کرد که اولاً با افزایش قطر، سطح انتقال حرارت و در نتیجه میزان انتقال حرارت افزایش می یابد، از طرف دیگر با کاهش سرعت، چون رژیم جریان همچنان آرام می ماند (فرض مسئله)، یک توده جریان فرصت بیشتری برای انتقال حرارت دارد و میزان تبادل حرارت به توده سیال افزایش می یابد، بنابراین میزان انتقال حرارت کل افزایش می یابد. همچنین بر طبق رابطه $\dot{S}_{gen} \propto \frac{dp}{dx} \propto \frac{U}{D^2}$ دیده می شود که با افزایش قطر و کاهش سرعت، تولید آنتروپی اصطکاک سیال کاهش می یابد. در نتیجه تولید آنتروپی بدون بعد Ψ_{total} نیز در کل کاهش می یابد، زیرا که مخرج آن افزایش و صورت آن کاهش یافته است.

جمع بندی

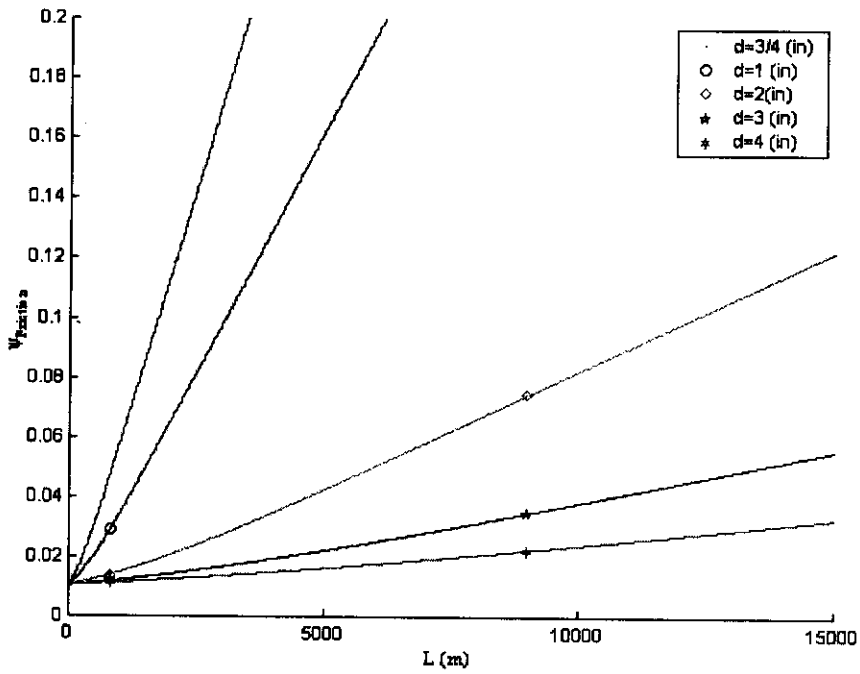
در کار حاضر تغییرات میزان پارامتر بدون بعد تولید آنتروپی به انتقال حرارت بر حسب طول لوله برای قطرهای و سرعت های مختلف مورد بررسی قرار گرفته و ارتباط بهینه بین سرعت سیال، طول و قطر لوله بدست آمده است. براساس این تحلیل، پیشنهاد می شود که جهت پایین نگهداشتن تولید آنتروپی و بازگشت ناپذیری، در سرعت ثابت، با افزایش طول لوله، قطر آن نیز افزایش یابد. همچنین برای داشتن تولید آنتروپی کمتر حتی الامکان سرعت در لوله پایین نگاه داشته شود و بطور کلی در یک دبی ثابت سعی شود از قطرهای بزرگتر و سرعت های کمتر استفاده شود. از تحلیل فوق نتایج مشخص زیر حاصل گردیده است:
 کمینه آنتروپی بدون بعد کل در سرعت ثابت و در قطرهای مختلف، مقدار تقریبی ۰/۰۵۱ می باشد.



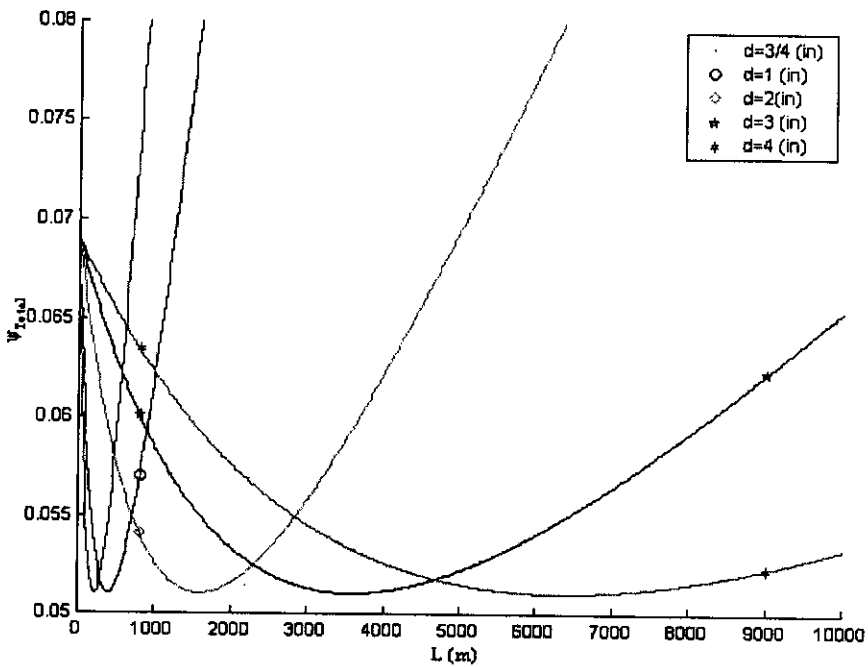
شکل ۲ تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد بر حسب طول لوله



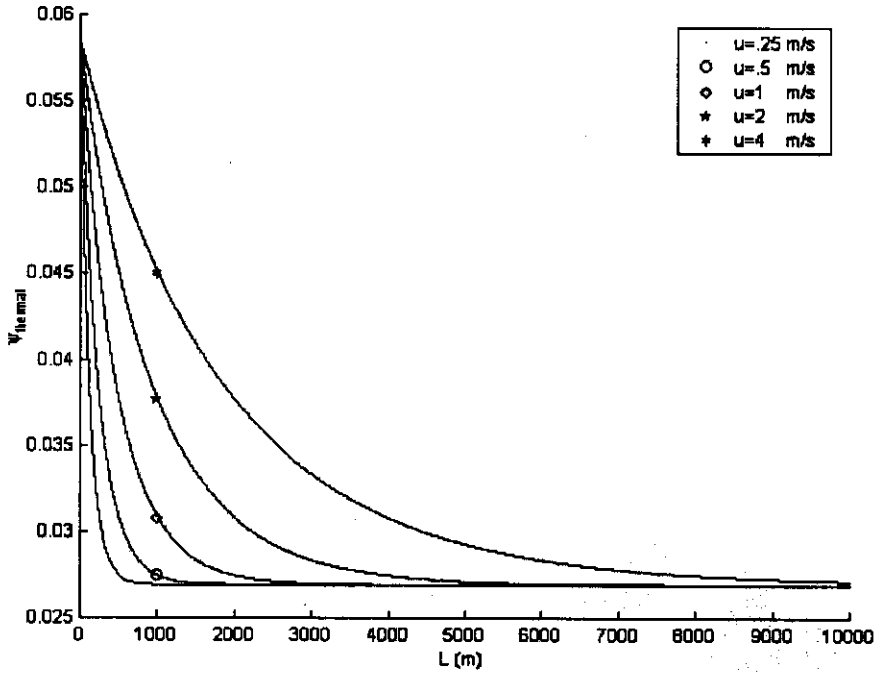
شکل ۳ تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد گرمایی بر حسب طول لوله در سرعت $(u=0.5\text{ m/s})$ و برای قطرهای مختلف



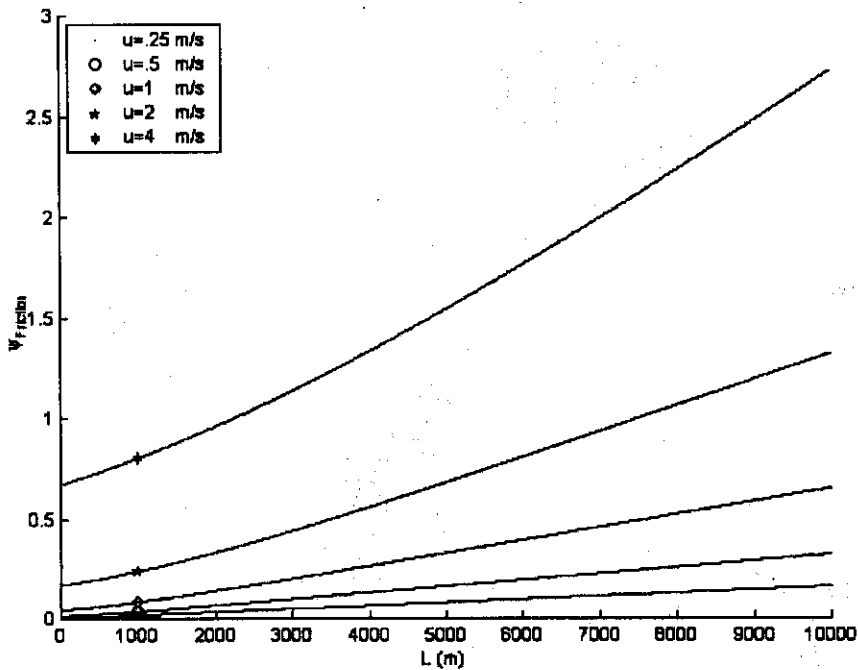
شکل ۴ تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد اصطکاکی برحسب طول لوله در سرعت $(u=0.5\text{m/s})$ و برای قطرهای مختلف



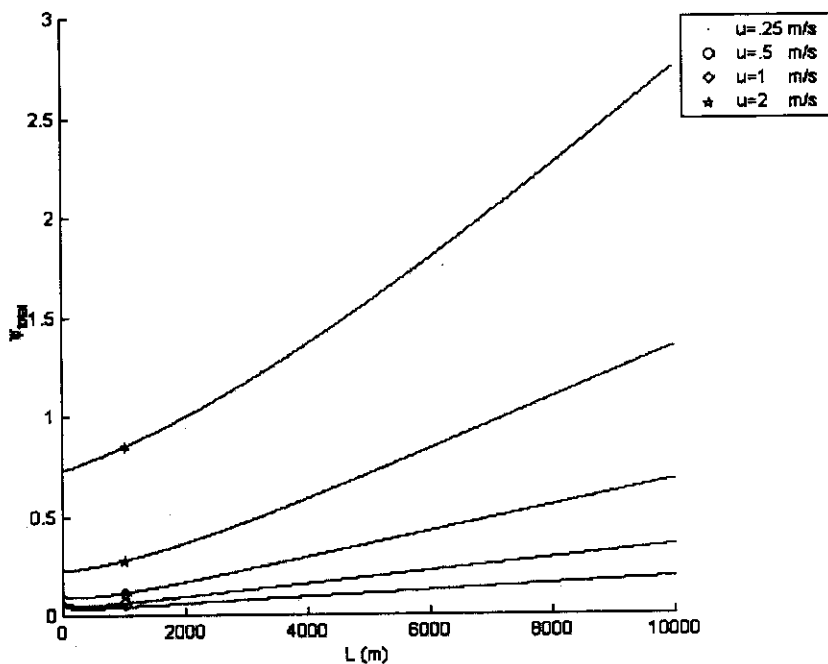
شکل ۵ تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد کل برحسب طول لوله در سرعت $(u=0.5\text{m/s})$ و برای قطرهای مختلف



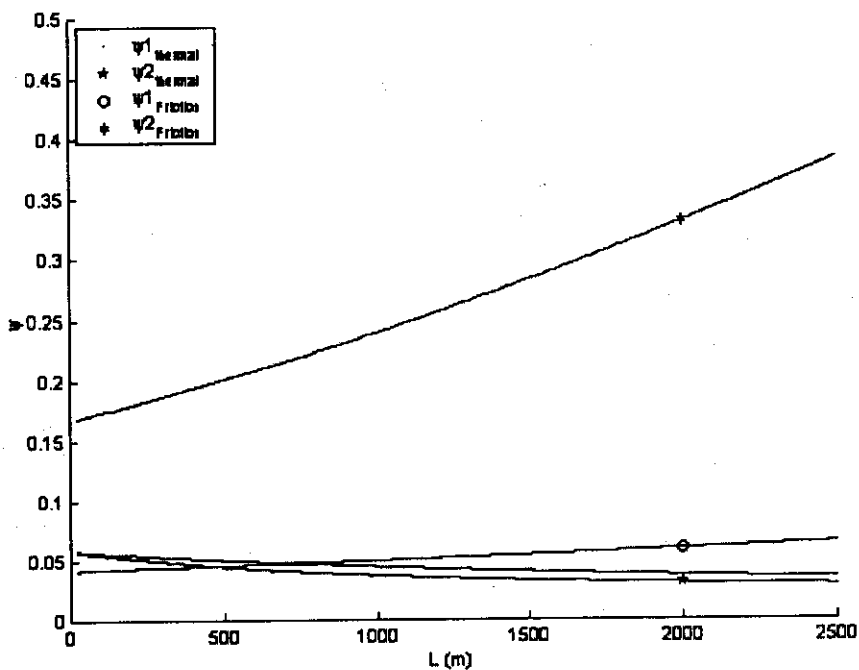
شکل ۶ تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد گرمایی برحسب طول لوله در قطر $(d=0.0254m)$ و برای سرعت‌های مختلف



شکل ۷ تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد اصطکاکی برحسب طول لوله در قطر $(d=0.0254m)$ و برای سرعت‌های مختلف

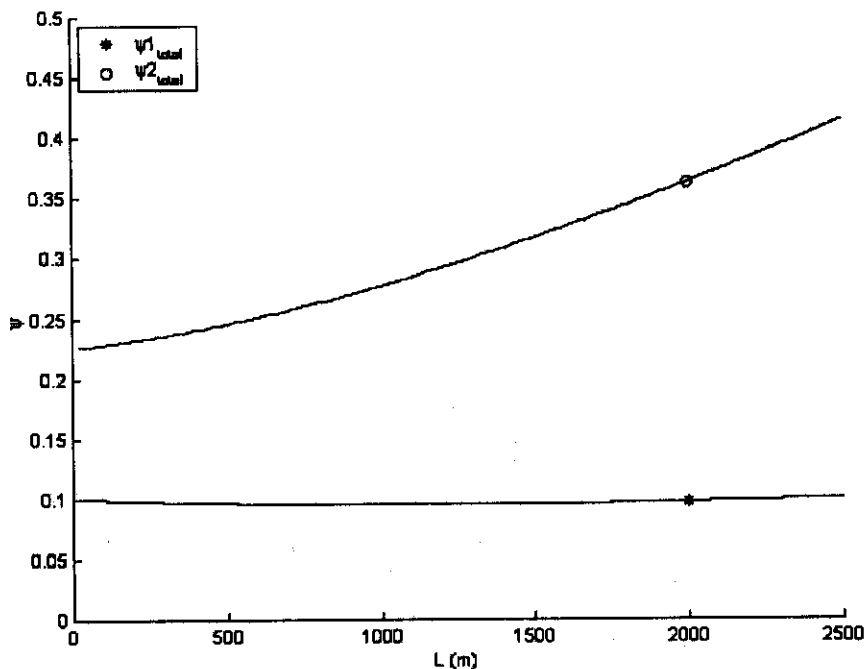


شکل ۸ تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد کل برحسب طول لوله در قطر $(d=0.0254m)$ و برای سرعت‌های مختلف



شکل ۹ تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد گرمایی و اصطکاکی، $(\Psi_{Fr}$ و $\Psi_{Th})$ برحسب طول لوله در دبی ثابت برای دو حالت

حالت اول: $d=0.0508m$, $u=1m/s$; حالت دوم: $d=0.0254m$, $u=2m/s$



شکل ۱۰ تغییرات تولید آنتروپی بدون بعد کل، Ψ_{total} ، برحسب طول و در دبی ثابت برای دو حالت

حالت اول: $d=0.0508m, u=1m/s$ ؛ حالت دوم: $d=0.0254m, u=2m/s$

مراجع

1. R. E. Sonntag, C. Borgnakke, G. J. Vanwaylen, "Fundamentals of Classical Thermodynamics", 5th ed. John Wiley & Sons, Ins. (1998).
2. M. J. Moran, H. N. Shapiro, "Fundamental of Engineering Thermodynamics", 3th ed. (1993).
3. A. Bejan, "The concept of irreversibility in heat exchanger design: counterflow heat exchanger for gas-to-gas application", *J. Heat Transfer* 99, 374, (1977).
4. A. Bejan, "A study of entropy generation in fundamental convective heat transfer", *J. Heat Transfer* 101, 718, (1979).
5. S. Bejan, "Second law analysis in heat transfer", *Energy* 5, 721-732, (1980).
6. A. Bejan, "Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow", John Wiley & Sons. (1982).

7. A. Bejan, "*Entropy Generation Minimization*", CRC press, New York, (1995).
8. P. K. Nag, P. Makherjee., "Thermodynamic optimization of convective heat transfer through a duct with constant wall temperature", *Int. J. Heat Mass Transfer*, 30,(2), 401 - 405, (1987).
9. A. S. Sahin., "Second law analysis of laminar viscous flow through a duct subjected to constant wall temperature", *ASME Journal of Heat Transfer*, 120, 76-83, (1998).
10. A. S. Sahin., "Entropy generation in turbulent liquid flow through a smooth duct subjected to constant wall temperature", *Int. J. Heat Mass transfer*, 43, 1469-1478, (2000).
11. F. Incropera, D. P. Dewith., "*Fundamental of Heat & Mass Transfer*", 4th ed., John wiley & Sons. (1996).
12. F. S Sherman., "*Viscous Flow*", McGraw-Hill Co., New York, (1990).