

بررسی تولید انتروپی ایرفویل در زاویه‌های حمله بزرگ با استفاده از شبیه‌سازی عددی

سیدشهاب الدین صادقی^۱، آرمان محسنی^۲

^۱ دانشجوی کارشناسی ارشد، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، seyeds.sadeghi@mail.sbu.ac.ir

^۲ استادیار، دانشگاه شهید بهشتی، تهران، ar_mohseni@sbu.ac.ir

چکیده

در پژوهش حاضر انتروپی تولید شده توسط ایرفویل متقارن NACA 0012 و تغییرات آن با استفاده از شبیه‌سازی عددی گذرا بررسی می‌شود و با تمرکز بر انتروپی تولید شده در زاویه‌های حمله بزرگ به بررسی تاثیر نوسانات آشفتگی در کنار تاثیر جریان متوسط بر تولید انتروپی پرداخته می‌شود. با افزایش زاویه حمله، میزان انتروپی تولید شده افزایش می‌یابد و این افزایش در شروع واماندگی قابل توجه است. در زاویه‌های حمله کوچک سهم آشفتگی و جریان متوسط بر تولید انتروپی تقریباً یکسان است. اما در زاویه‌های حمله بزرگ تولید انتروپی کل به شکل قابل ملاحظه ناشی از نوسانات آشفتگی است و سهم جریان متوسط در تولید انتروپی کل قابل صرف نظر کردن است. همچنین بیشترین سهم در انتروپی تولید شده مربوط به لایه‌های برشی در ناحیه دنباله جریان است، به طوری که با تشکیل شرایط واماندگی و افزایش ضخامت لایه برشی، تولید انتروپی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. بررسی میزان انتروپی تولید شده نشان می‌دهد که هم زمان با جاری شدن گردابه‌ها در ابتدای زاویه واماندگی، پارامتر تولید انتروپی تا ۱۰ برابر نسبت به زاویه پیش از واماندگی افزایش می‌یابد.

واژه‌های کلیدی

تولید انتروپی، واماندگی، دینامیک سیالات محاسباتی، ضریب پسا

مقدمه

بهره‌وری انرژی در سیستم‌های مهندسی تنها در صورتی میسر خواهد بود که قانون دوم ترمودینامیک در نظر گرفته شود، زیرا مقدار کار در دسترس که انرژی نامیده می‌شود با مقدار انتروپی تولید شده در ارتباط است. مقدار انتروپی تولید شده در یک سیستم مهندسی می‌تواند مستقیماً به عنوان پارامتری برای ارزیابی کارایی آن سیستم مورد استفاده قرار گیرد. در این خصوص مفهوم تخریب انرژی با مفهوم تولید انتروپی همراه است که در فرآیندهای برگشت ناپذیر رخ می‌دهد [۱]. در یک جریان سیال زیر صوت، دو مکانیسم تولید

انتروپی شار گرما و اثر گرانروی است که دو ویژگی مهم در هر سیستم جریان سیال می‌باشند. گرانروی عامل ایجاد لایه‌مرزی بر روی سطح جسم است و لایه‌مرزی از شار گرمایی و گرانروی جریان تاثیر می‌پذیرد. به عبارت دیگر مکانیسم‌های تولید انتروپی بیشترین تأثیر را در تشکیل لایه‌مرزی دارند [۲].

برای ارزیابی کمی تولید انتروپی در یک سیستم مهندسی از رویکردهای مختلف تحلیلی، شبیه‌سازی عددی و اندازه‌گیری تجربی استفاده می‌شود. بسیاری از بررسی‌های تحلیلی نیاز به ساده‌سازی قابل توجه مساله دارند و به این دلیل، استفاده از روش‌های تحلیلی در مطالعات تولید انتروپی اغلب به جریان آرام و پایا محدود است. همچنین در مطالعات تحلیلی فقط مکانیسم‌های جریان و شار گرمای متوسط برای محاسبه تولید انتروپی در نظر گرفته می‌شود و آشفتگی لحظه‌ای جریان به سادگی قابل محاسبه نیست. اندازه‌گیری تجربی در هر زمینه از علوم و مهندسی برای شناخت پدیده‌ها انجام می‌شود و به همین ترتیب در مطالعه تولید انتروپی اهمیت بسیاری دارند. با این حال، در مورد مطالعات مرتبط با جریان آشفته که بطور ذاتی گذرا هستند، تعیین تجربی میزان تولید انتروپی در اندازه‌گیری تجربی با محدودیت‌هایی همراه است. آداینکا در یک اندازه‌گیری تجربی، با بهره‌گیری از سرعت سنجی تصویری ذرات^۱ به بررسی تولید انتروپی در جریان آشفته درون کانال پرداخت. مقایسه نتایج با شبیه‌سازی مستقیم^۲ نشان داد که تولید انتروپی در جریان آشفته به درستی اندازه‌گیری شده است [۳]. استفاده از شبیه‌سازی عددی و دینامیک سیالات محاسباتی، جدای از امکان ارزیابی سریع و اقتصادی بسیاری از فرایندها، می‌تواند درک بهتر و دقیق‌تری از پدیده‌ها همراه با ثبت جزئیات را ارائه دهد که شناسایی آنها در آزمایش‌های تجربی به سادگی امکان‌پذیر نیست. از این رو روش‌های دینامیک سیالات محاسباتی می‌تواند برای ارزیابی برگشت‌ناپذیری در یک سیستم مهندسی استفاده شود.

¹ Particle Image Velocimetry (P.I.V.)

² Direct Numerical Simulation (D.N.S.)

ساده‌سازی برای توربین‌های ولز [۸] و جریان‌های لوله [۹] اتخاذ شده است.

در مطالعه‌ی فعلی با بهره‌گیری از رویکرد عددی رنز گذرا و با توجه به خلاءهای موجود در این زمینه، انترویی تولید شده در جریان هوای عبوری از روی ایرفویل در زاویه‌های حمله 0° تا 26.5° در رینولدز $2/66 \times 10^6$ به صورت عددی مورد بررسی قرار گرفته است.

معادلات حاکم بر جریان سیال

معادلات پیوستگی، اندازه حرکت و انرژی حاکم بر جریان گذرا و تراکم پذیر برای رژیم جریان آشفته به روش متوسط‌گیری رینولدز عبارت است از:

$$\partial_t \rho + (\rho u_i)_{,i} = 0 \quad (1)$$

$$\partial_t (\rho u_i) + (\rho u_i u_j)_{,j} = -p_{,i} + \tau_{ij,j} + (-\overline{\rho u'_i u'_j})_{,j} \quad (2)$$

$$(\rho C_p T u_i)_{,i} = (k T_{,i})_{,i} + \mu \Phi \quad (3)$$

در معادلات فوق قرارداد جمع تانسوری معتبر است و ρ چگالی، p فشار استاتیکی، C_p ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت، T دمای سیال، τ_{ij} تانسور تنش برشی، Φ تابع اتلاف گرانشی، k ضریب هدایت حرارتی و u_i مولفه سرعت سیال می‌باشد. معادله تانسور تنش برشی مطابق با رابطه‌ی (۴) بیان می‌شود. در این رابطه، δ_{ij} معرف دلتای کرونکر و μ لزجت دینامیکی می‌باشد. همچنین شکل تراکم‌پذیر تابع اتلاف در غیاب واکنش‌های شیمیایی و تغییر فاز در رابطه‌ی (۵) نشان داده شده است [۱۰].

$$\tau_{ij} = \mu \left(u_{i,j} + u_{j,i} - \frac{2}{3} u_{k,k} \delta_{ij} \right) \quad (4)$$

$$\Phi = \mu \left(u_{i,j} + u_{j,i} \right) u_{j,i} - \frac{2}{3} \left(u_{k,k} \right)^2 \quad (5)$$

همانطور که اشاره شد، برای حل عددی از معادلات رنز استفاده می‌شود، در این روش عبارت تنش رینولدز بر اساس فرضیه بوزینسک مطابق با رابطه‌ی (۶) محاسبه می‌گردد. در این مطالعه برای محاسبه‌ی لزجت گردابی از مدل آشفتگی $k - \omega SST$ که قادر به شبیه‌سازی جریان با گرادیان فشار معکوس و جدایش جریان است، استفاده می‌شود.

$$-\overline{\rho u'_i u'_j} = \mu_t \left(u_{i,j} + u_{j,i} \right) - \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (6)$$

معادلات حاکم بر تولید انترویی

معادله‌ی انتقال انترویی در یک جریان آشفته همراه با انتقال حرارت با فرضیات جریان تک فاز و برقراری هدایت حرارتی فوری در مختصات کارتزین مطابق با رابطه‌ی (۷) بیان می‌شود:

$$\partial_t (\rho s) + (\rho u_j s)_{,j} + \left(\frac{q_j}{T} \right)_{,j} = -\frac{q_k}{T^2} T_{,k} + \frac{1}{T} \tau_{ij} u_{i,j} \geq 0 \quad (7)$$

تولید انترویی توسط منابع حرارتی و گرانشی را می‌توان بطور مستقیم با پردازش متغیرهای ترمودینامیکی و سیالاتی در شبیه‌سازی عددی محاسبه کرد [۴]. در یک جریان آرام، پایا و بدون انتقال حرارت، اثرات شار حرارتی وجود ندارد و نوسانات آشفتگی^۳ در اثر گرانشی نیز صفر است. بنابراین، تولید انترویی تنها ناشی از اتلاف گرانشی مرتبط با گرادیان‌های سرعت متوسط در لایه مرزی است. در این حالت تمام محاسبات تولید انترویی بطور مستقیم با شبیه‌سازی عددی تعیین می‌شود. این رویکرد محاسباتی برای جریان‌های آشفته و انتقالی بسیار پرهزینه است و در بسیاری از موارد به خصوص برای اعداد رینولدز به نسبت بزرگ، انجام آن با رایانه‌های امروزی امکان‌پذیر نیست. بنابراین برای محاسبه تولید انترویی در یک جریان آشفته از دو رهیافت معادلات ناویر-استوکس متوسط‌گیری شده رنز^۴ و شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ^۵ استفاده می‌شود. مور، روشی را برای محاسبه تولید انترویی در جریان‌های آشفته و لزج با استفاده از معادلات رنز ارائه داد [۲]. وی تولید انترویی در یک جریان آشفته را ناشی از دو عامل جریان متوسط و نوسانات آشفتگی می‌دانست. از آنجایی که در شبیه‌سازی رنز پارامترهای متوسط جریان محاسبه می‌شود، تولید انترویی ناشی از آشفتگی مدل‌سازی می‌گردد. اعتبارسنجی این مدل‌سازی توسط داده‌های تجربی و شبیه‌سازی مستقیم تأیید شده است. به لطف مدل‌سازی‌های انجام شده، در ادامه به مطالعات صورت گرفته در این راستا پرداخته می‌شود. تاثیر جریان لزج و غیر لزج در تولید انترویی توسط الای در یک شبیه‌سازی رنز صورت گرفت [۵]. وی به بررسی تولید انترویی روی بدنه و بال هواپیما پرداخت. نتایج وی نشان داد که سهم تولید انترویی در جریان غیر لزج ۱۰۰۰ برابر کمتر از تولید انترویی در جریان لزج است که محدود به شوک در نقاط سکون و اطراف دنباله جریان بود. پیش‌بینی ضریب پسا ی ایرفویل در زاویه‌های حمله قبل از واماندگی از دیدگاه تولید انترویی توسط وانگ به صورت عددی و با رویکرد مبتنی بر رنز بررسی شد [۶]. بر طبق نتایج، پارامتر تولید انترویی با ضریب پسا به صورت خطی در ارتباط است و می‌توان با دقت مناسبی مقدار ضریب پسا را براساس آن تعیین کرد. در تحقیقی دیگر، شهابا با روش شبیه‌سازی گردابه‌های بزرگ و با بهره‌گیری از کنترل غیر فعال جریان، تولید انترویی و نویز منتشر شده از ایرفویل را بررسی کرد و در نتیجه بهینه‌ترین زاویه شکاف قبل و بعد از واماندگی از جهت بیشترین کاهش در تولید انترویی و انتشار نویز مشخص گردید [۷]. این مطالعات به اهمیت تولید انترویی ناشی از نوسانات آشفتگی در جریان آشفته تاکید کرده‌اند. حتی در اعداد رینولدز متوسط، انترویی تولید شده توسط نوسانات آشفتگی قابل توجه است. با این وجود در حجم وسیعی از مقالات، تولید انترویی در حضور جریان‌های آشفته تنها با در نظر گرفتن سهم جریان متوسط محاسبه شده است. این

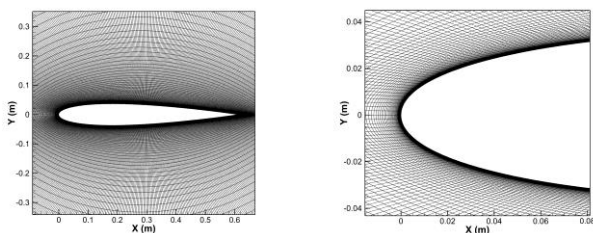
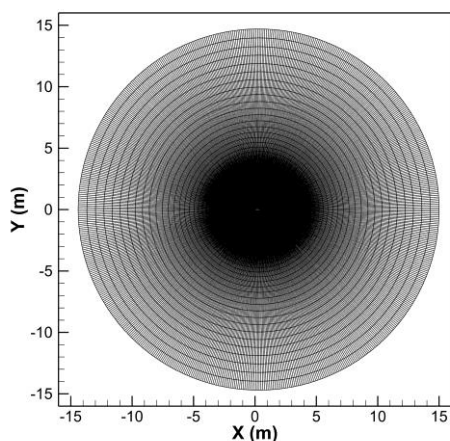
³ Turbulent Fluctuations

⁴ Reynolds-Averaged Navier-Stokes (R.A.N.S.)

⁵ Large Eddy Simulation (L.E.S.)

استقلال از شبکه و گام زمانی

در این شبیه‌سازی از یک دامنه محاسباتی دایره‌ای شکل به شعاع ۲۵ برابر وتر ایرفویل استفاده شد. انتخاب دامنه محاسباتی به نحوی است که حداقل تاثیر را بر نتایج داشته باشد. در شکل ۲، شبکه با سازمان چند بلوکی اطراف ایرفویل نشان داده شده است. به دلیل وجود گرادیان‌های شدید در نزدیکی سطح ایرفویل، میزان تراکم شبکه در آن نواحی افزایش یافته است و با دور شدن از سطح ایرفویل این تراکم کاهش می‌یابد. مطابق با جدول ۲، برای انتخاب شبکه مناسب چندین شبکه با تراکم مختلف بررسی و استقلال از شبکه نسبت به متغیرهای بدون بعد ضریب برآ، پسا و مقدار تولید انرژی اتروپی بررسی شده است. با توجه به نوع مدل آشفتگی، جهت دستیابی به نتایجی دقیق لازم است اولین سلول لایه مرزی در ناحیه خطی زیر لایه لزج قرار داشته باشد. بدین منظور از $y^+ \leq 1$ در نزدیکی دیواره ایرفویل استفاده شد. در نهایت با توجه به روند همگرایی، شبکه دوم با تعداد ۱۹۲۰۰۰ المان به منظور شبیه‌سازی انتخاب شد. همچنین عدد $0/0001s$ به عنوان گام زمانی برای این مطالعه در نظر گرفته شد.



شکل ۲: شبکه سازمان یافته چند بلوکی اطراف ایرفویل. تصویر بالا: نمای کامل از دامنه محاسباتی، تصاویر پایین: نمای بزرگ‌نمایی شده.

جدول ۱: نتایج استقلال از شبکه در شرایط واماندگی

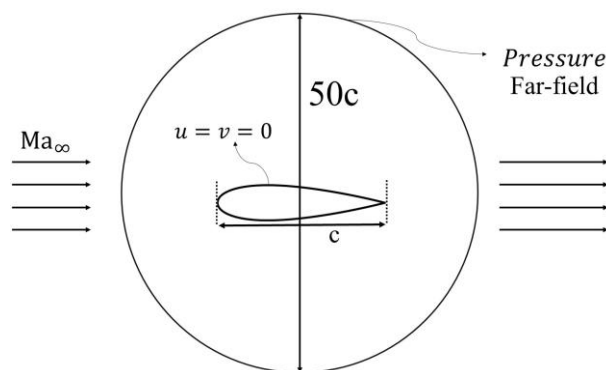
شبکه	ابتدایی	اول	دوم	سوم
تعداد سلول	۲۰×۸۰	۴۵×۱۵۰	۶۰×۳۳۰	۹۰×۴۸۰
ارتفاع اولین سلول (m)	1×10^{-5}	4×10^{-6}	4×10^{-6}	2×10^{-6}
ضریب رشد شبکه	۱/۱۵	۱/۰۵	۱/۰۵	۱/۰۵
y^+	< ۵	< ۱	< ۱	< ۱
\bar{C}_d	۰/۴۷۲	۰/۲۹۸	۰/۲۹۵	۰/۲۹۴
\bar{C}_l	۱/۶۷۲	۱/۰۵۶	۱/۰۳۴	۱/۰۳۳
S_{gen} (w/k)	۶۳/۰۸۱	۷۲/۳۸۰	۷۶/۷۱۷	۷۶/۷۱۹

در این معادله، دو عبارت سمت راست بیانگر چشمه‌های تولید انرژی اتروپی در یک جریان سیال هستند. عبارت اول از سمت راست، تولید انرژی اتروپی ناشی از گرادیان‌های دما را نشان می‌دهد و عبارت دوم، بیانگر تولید انرژی اتروپی به واسطه‌ی اتلاف ناشی از گرانش است. این دو عبارت همواره مثبت هستند.

مور برای محاسبه‌ی تولید انرژی اتروپی ناشی از جریان متوسط و نوسانات آشفتگی در یک جریان آشفتنه از رابطه (۸) استفاده کرد [۲]. صحت این روابط از طریق شبیه‌سازی‌های دی.ان.اس. تایید شده است.

$$\dot{S}_{gen} = \frac{\mu_{eff}}{T} \left(\bar{u}_{i,j} + \bar{u}_{j,i} - \frac{2}{3} \bar{u}_{k,k} \delta_{ij} \right) \bar{u}_{i,j} + \frac{k_{eff}}{T^2} (\bar{T}_{,k})^2 \quad (8)$$

در رابطه فوق $k_{eff} = k + k_t$ و $\mu_{eff} = \mu + \mu_t$ می‌باشد، که در آن k_t و μ_t به ترتیب گرانشی آشفتگی و ضریب هدایت حرارتی آشفتگی است.



شکل ۱: ابعاد هندسی و شرایط مرزی

شرایط مرزی

این مطالعه عددی به شکل گذرا و فشار مینا و به روش حجم محدود انجام شده است. مطابق با شکل ۱، شرط مرزی آیرودینامیکی فشار در بینهایت برای مرزهای دامنه محاسباتی و شرط مرزی آدیاباتیک و عدم لغزش برای دیواره ایرفویل در نظر گرفته شد. با توجه به شرط مرزی استفاده شده، چگالی به صورت تراکم پذیر و از قانون گاز ایده‌آل محاسبه می‌گردد. در این شبیه‌سازی برای مقاردهی اولیه از روش ترکیبی استفاده شده است. در این روش معادله لاپلاس برای ایجاد یک میدان سرعت و فشار اولیه در دامنه محاسباتی حل می‌شود. همچنین از الگوریتم عددی کوپل برای حل معادلات اندازه حرکت و فشار استفاده گردید. در این مطالعه از گسسته‌سازی مرتبه دوم بالادستی برای عبارات جابجایی^۶، گسسته‌سازی مرتبه دوم مرکزی برای عبارت فشار و گسسته‌سازی مرتبه دوم ضمنی^۷ برای عبارت گذرا استفاده شده است. در نهایت، شرط همگرایی 10^8 برای باقیمانده معادلات اندازه حرکت به کار رفت.

⁶ Convective Term

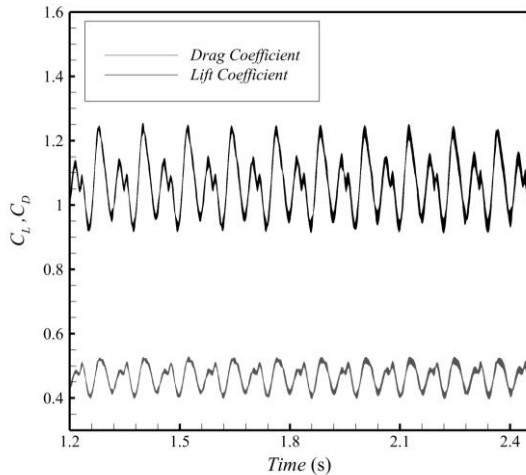
⁷ Second-Order Centered

⁸ Second-Order Implicit

ارائه نتایج و اعتبارسنجی

به منظور کسب اطمینان از نتایج شبیه‌سازی، اعتبارسنجی ضرایب برا و پسای ایرفویل با نتایج تجربی ناسا [۱۱] مورد بررسی قرار گرفت و مطابق با شکل ۳ نتایج شبیه‌سازی از تطابق بالایی برخوردار است.

با عبور جریان سیال از روی ایرفویل دو رژیم متفاوت جریان در پایین‌دست ایجاد می‌گردد که متناسب با زاویه حمله و عدد رینولدز است. در شکل ۴- الف، جریان عبوری به سطح ایرفویل متصل است و پدیده جدایش مشاهده نمی‌شود، این درحالی است که با افزایش زاویه حمله به $18/16^\circ$ در شکل ۴- ب، یک گردابه قوی روی لبه حمله ایجاد می‌گردد و جدایش جریان اتفاق می‌افتد. در این حالت گردابه‌ها از لایه مرزی جدا شده و بر روی سطح بالایی ایرفویل و به سمت پایین‌دست حرکت می‌کنند. در نهایت مطابق با شکل ۵، جدا شدن تناوبی لایه‌های برشی از سطح ایرفویل باعث جاری شدن گردابه‌ها و ایجاد یک نیروی برا و پسای متناوب می‌شود. همچنین مطابق با شکل ۳، در شرایط واماندگی ایرفویل همزمان با رشد سریع ضخامت لایه مرزی و پدیدار شدن یک جدایش بزرگ، ضریب پسای با شدت بیشتری افزایش یافته است.

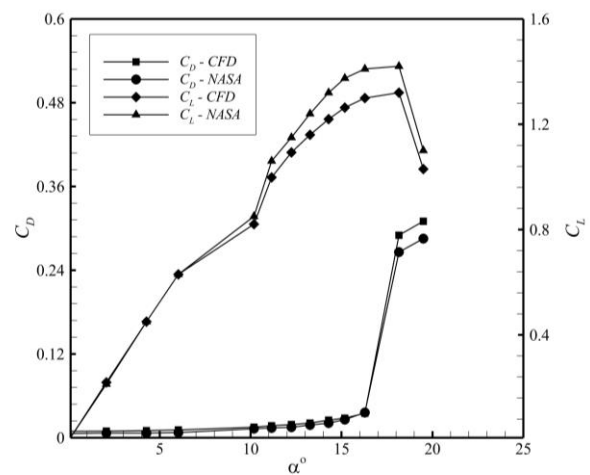


شکل ۵: ضرایب برا و پسای لحظه‌ای در شرایط واماندگی

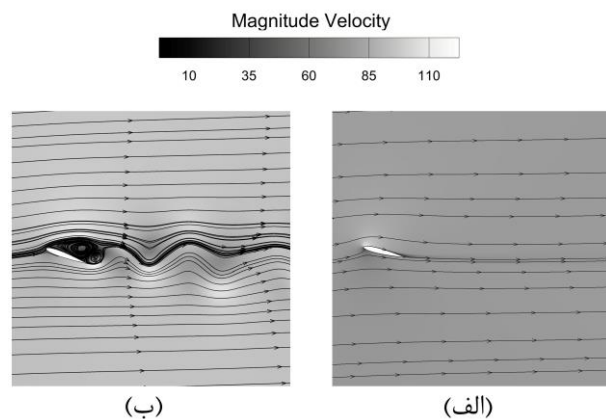
روند تغییرات تولید انترویی تا حد زیادی از روند تغییرات ضریب پسای پیروی می‌کند که ارتباط بین اتلاف انرژی جنبشی آشفتگی با افزایش ضریب پسای و انترویی تولید شده را نشان می‌دهد.

در شکل ۶، تولید انترویی به ۲ سهم ناشی از جریان متوسط و نوسانات آشفتگی تقسیم شده است. نتایج به عنوان تابعی از زاویه حمله در عدد رینولدز ثابت گزارش شده است. مطابق با این شکل، با افزایش زاویه حمله تا پیش از واماندگی، سهم نوسانات آشفتگی و جریان متوسط در تولید انترویی تقریباً یکسان است. با افزایش زاویه حمله، نواحی شامل آشفتگی و دامنه مناطق جدا شدگی جریان افزایش می‌یابند که منجر به افزایش چشم‌گیر تولید انترویی در شروع وضعیت واماندگی می‌گردد بطوری که تولید انترویی در شروع واماندگی تا ۱۰ برابر افزایش یافته است. این افزایش ویژه در تولید انترویی را نمی‌توان تنها با در نظر گرفتن سهم جریان متوسط پیشبینی کرد. هرچند که در زاویه‌های حمله بالا، انترویی تولیدی کل با تقریب ناشی از نوسانات آشفتگی بوده و سهم جریان متوسط قابل صرف نظر کردن است.

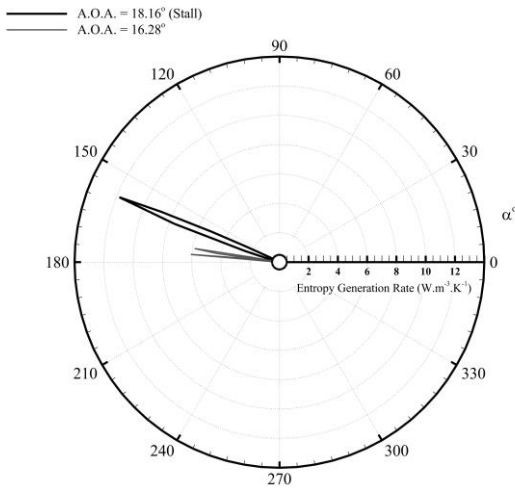
در شکل ۷ خطوط تولید انترویی محلی در دو زاویه حمله $16/28^\circ$ و $18/16^\circ$ نشان داده شده است. مطابق با شکل، لایه برشی تشکیل شده در ناحیه دنباله جریان در هر دو زاویه حمله، مهمترین منبع تولید انترویی است. مطابق با شکل ۷- الف، در زاویه حمله $16/28^\circ$ که جریان سیال به سطح ایرفویل متصل است، لایه برشی باریک و تولید انترویی محلی محدود است. با این حال در شکل ۷- ب، با افزایش زاویه حمله و جدا شدن جریان سیال از سطح مکش، افزایش قابل توجهی در تولید انترویی ایجاد می‌گردد. همچنین خطوط تولید انترویی در شکل ۷، به‌دست می‌آید که سهم سطح مکش ایرفویل در تولید انترویی بسیار بیشتر از سطح فشار است. در این خصوص، با توجه به اینکه جریان از سطح مکش شتاب می‌گیرد و جدایش جریان نیز از این سطح رخ می‌دهد، انتظار می‌رود سهم این



شکل ۳: اعتبارسنجی داده‌ها با نتایج [۱۱] در $Re = 2/88 \times 10^6$



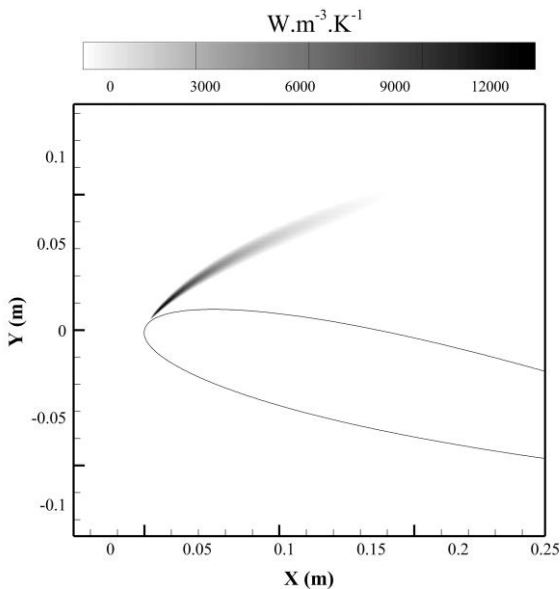
شکل ۴: خطوط هم‌تراز سرعت پیرامون ایرفویل. تصاویر الف و ب به ترتیب، وضعیت‌های قبل و بعد از واماندگی را نشان می‌دهد.



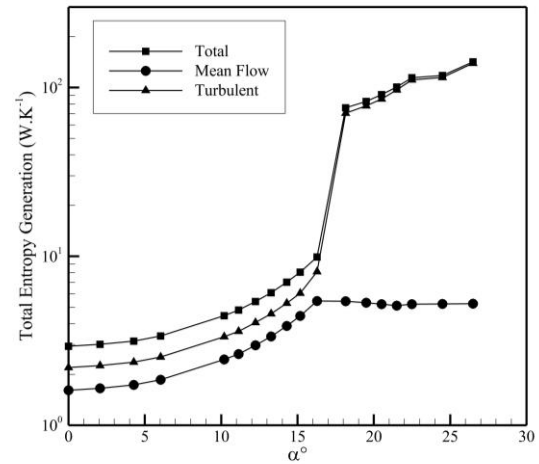
شکل ۸: تغییرات نرخ تولید انتروپی در شرایط قبل و بعد از واماندگی در $Re = 2/66 \times 10^6$

ناحیه در تولید انتروپی بسیار بیشتر از سطح فشار باشد. به منظور بررسی تغییرات نرخ تولید انتروپی محلی در شرایط ورود به واماندگی، در شکل ۸ نمودار قطبی روی یک دایره به شعاع $10d$ از مرکز ایرفویل رسم شده است. مطابق با شکل در شرایط واماندگی همزمان با افزایش زاویه حمله و ضخیم شدن دنباله جریان، نرخ تولید انتروپی محلی پیرامون ایرفویل افزایش می‌یابد. همچنین مطابق با خطوط تولید انتروپی در شکل ۹، حداکثر میزان تولید انتروپی در ناحیه لبه حمله که ضخامت لایه مرزی کم است اتفاق می‌افتد. دلیل اصلی افزایش تولید انتروپی در این ناحیه، مقدار بالای نرخ کرنش در کنار تسریع جریان سیال و کاهش ضخامت لایه مرزی است.

به طور کلی با عبور جریان از روی ایرفویل بیشترین تولید انتروپی مربوط به نواحی نزدیک به دیوار، دنباله جریان و گردابه‌های جاری شده در شرایط واماندگی است. در نواحی نزدیک به دیوار گردان‌های شدید سرعت و در نواحی آشفتگی، لزجت گردابی و نرخ کرنش نقش موثری در تولید انتروپی دارند.



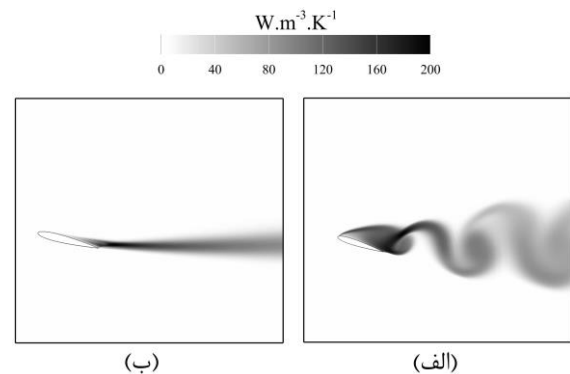
شکل ۹: خطوط تولید انتروپی در شرایط واماندگی



شکل ۶: تولید انتروپی از جریان متوسط و آشفتگی در $Re = 2/66 \times 10^6$

فهرست علائم

C_D	ضریب پسا
C_L	ضریب برا
C_p	ظرفیت گرمایی ویژه در فشار ثابت،
$m^2 \cdot s^{-2} \cdot K^{-1}$	
k	ضریب هدایت حرارتی
\dot{S}_{gen}	نرخ تولید انتروپی، $W \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}$
S_{gen}	تولید انتروپی، $W \cdot K^{-1}$
t	زمان، s
T	دما، K
u	مولفه‌ی افقی سرعت، $m \cdot s^{-1}$
v	مولفه‌ی قائم سرعت، $m \cdot s^{-1}$
Re	عدد رینولدز



شکل ۷: خطوط هم‌تراز شده‌ی تولید انتروپی. تصاویر الف و ب به ترتیب، وضعیت‌های قبل و بعد از واماندگی را نشان می‌دهد

procedure,” in Collection of Technical Papers - 44th AIAA Aerospace Sciences Meeting, 2006, vol. 10, pp. 7036–7054. doi: 10.2514/6.2006-587.

- [6] W. Wang, J. Wang, H. Liu, and B. Y. Jiang, “CFD Prediction of Airfoil Drag in Viscous Flow Using the Entropy Generation Method,” *Math. Probl. Eng.*, vol. 2018, 2018, doi: 10.1155/2018/4347650.
- [7] A. S. Shehata, Q. Xiao, M. A. Kotb, M. M. Selim, A. H. Elbatran, and D. Alexander, “Effect of passive flow control on the aerodynamic performance, entropy generation and aeroacoustic noise of axial turbines for wave energy extractor,” *Ocean Eng.*, vol. 157, no. December 2017, pp. 262–300, 2018, doi: 10.1016/j.oceaneng.2018.03.053.
- [8] A. S. Shehata, Q. Xiao, M. M. Selim, A. H. Elbatran, and D. Alexander, “Enhancement of performance of wave turbine during stall using passive flow control: First and second law analysis,” *Renew. Energy*, vol. 113, pp. 369–392, 2017, doi: 10.1016/j.renene.2017.06.008.
- [9] E. Lakzian, M. Hajian, and A. Farahmand, “The entropy generation rate minimization for a proposed air ejector for the carpet industry,” *Meccanica*, vol. 53, no. 1–2, pp. 145–159, 2018, doi: 10.1007/s11012-017-0706-1.
- [10] I. G. Currie, *Fundamental mechanics of fluids: Fourth edition*. 2016.
- [11] C. L. Ladson, “Effects of independent variation of Mach and Reynolds numbers on the low-speed aerodynamic characteristics of the NACA 0012 airfoil section,” 1988.

علائم یونانی

α	زاویه حمله، °
Φ	تابع اتلاف، s^{-2}
μ	لزجت دینامیکی، $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$
μ_t	لزجت آشفتگی دینامیکی، $kg \cdot s^{-1} \cdot m^{-1}$
ρ	چگالی، $kg \cdot m^{-3}$

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مطالعه تولید انتروپی ایرفویل در شرایط جریان تراکم پذیر و در زاویه‌های حمله بالا به شکل گذرا مورد بررسی قرار گرفته است. روند تغییرات تولید انتروپی ناشی از جریان متوسط با افزایش زاویه حمله محسوس نیست و مقدار آن در شرایط زاویه‌های حمله بالا اندکی کاهش می‌یابد. این درحالی است که در شرایط واماندگی و در زاویه‌های حمله بالا تولید انتروپی کل تقریباً ناشی از نوسانات آشفتگی است و سهم جریان متوسط ناچیز است. همچنین بیشترین سهم در انتروپی تولید شده مربوط به لایه‌های برشی در ناحیه دنباله جریان است. بطوری با ورود به شرایط واماندگی و افزایش ضخامت لایه برشی در کنار جهش بزرگ در ضریب پسا، پارامتر تولید انتروپی افزایش قابل ملاحظه‌ای می‌یابد. بررسی کمی مقدار تولید انتروپی کل در ابتدای شرایط واماندگی، افزایش بیش از ۱۰ برابری تولید انتروپی در مقابل مقدار پیش از واماندگی را نشان می‌دهد که این تفاوت چشم‌گیر با افزایش اتلاف انرژی جنبشی و جاری شدن گردابه‌ها توجیح می‌شود.

مراجع و منابع

- [1] A. Bejan and J. Kestin, “Entropy Generation Through Heat and Fluid Flow,” *J. Appl. Mech.*, vol. 50, no. 2, pp. 475–475, 1983, doi: 10.1115/1.3167072.
- [2] J. Moore and J. C. Moore, “Entropy production rates from viscous flow calculations part II - flow in a rectangular elbow,” 1983. doi: 10.1115/83-gt-71.
- [3] O. B. Adeyinka and G. F. Naterer, “Experimental uncertainty of measured entropy production with pulsed laser PIV and planar laser induced fluorescence,” *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 48, no. 8, pp. 1450–1461, 2005, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2004.10.021.
- [4] A. Bejan, “The thermodynamic design of heat and mass transfer processes and devices,” *Int. J. Heat Fluid Flow*, vol. 8, no. 4, pp. 258–276, 1987, doi: 10.1016/0142-727X(87)90062-2.
- [5] K. Alabi, F. Ladeinde, M. Von Spakovsky, D. Moorhouse, and J. Camberos, “Assessing CFD modeling of entropy generation for the air frame subsystem in an integrated aircraft design/synthesis