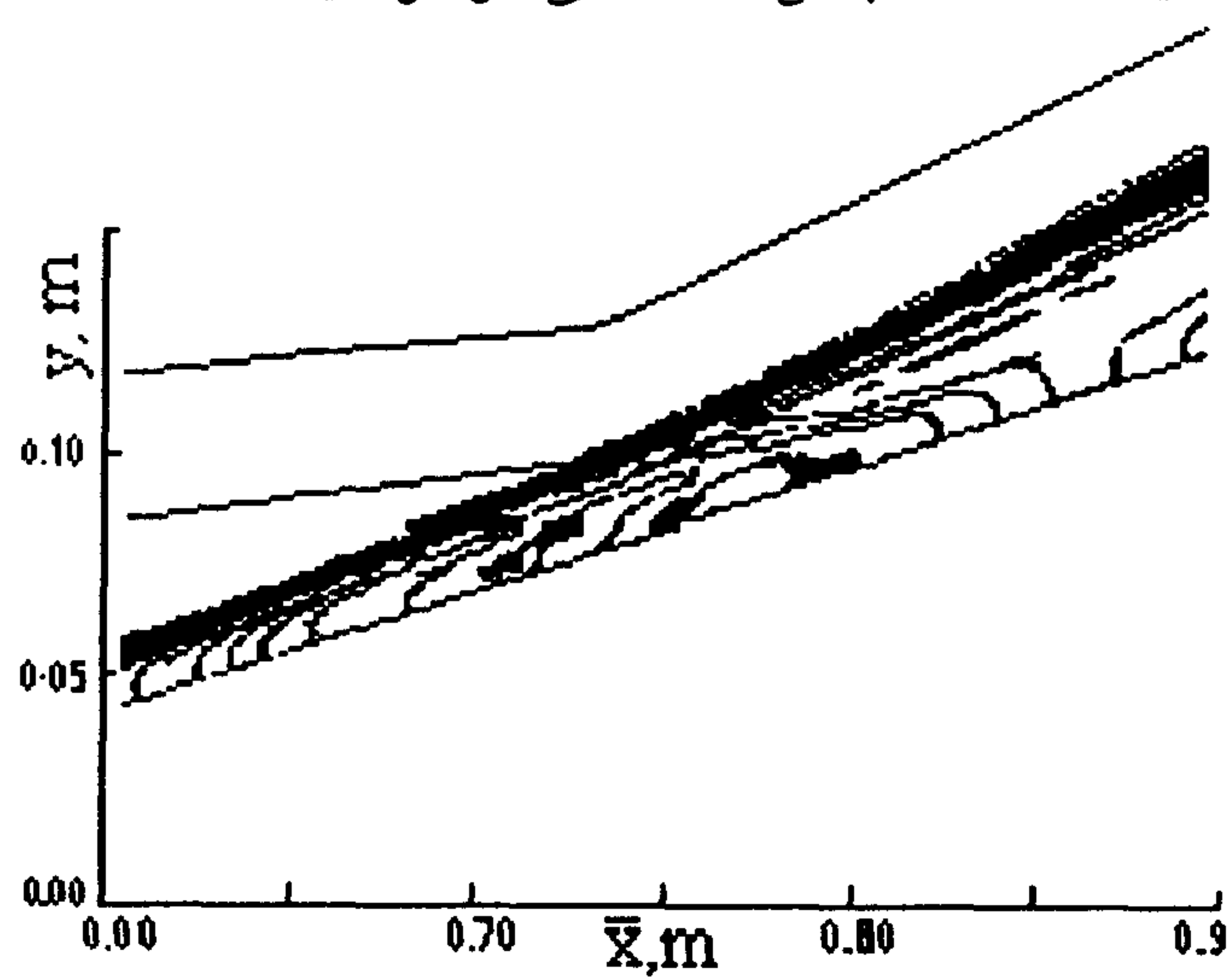


## بحث در مقاله:

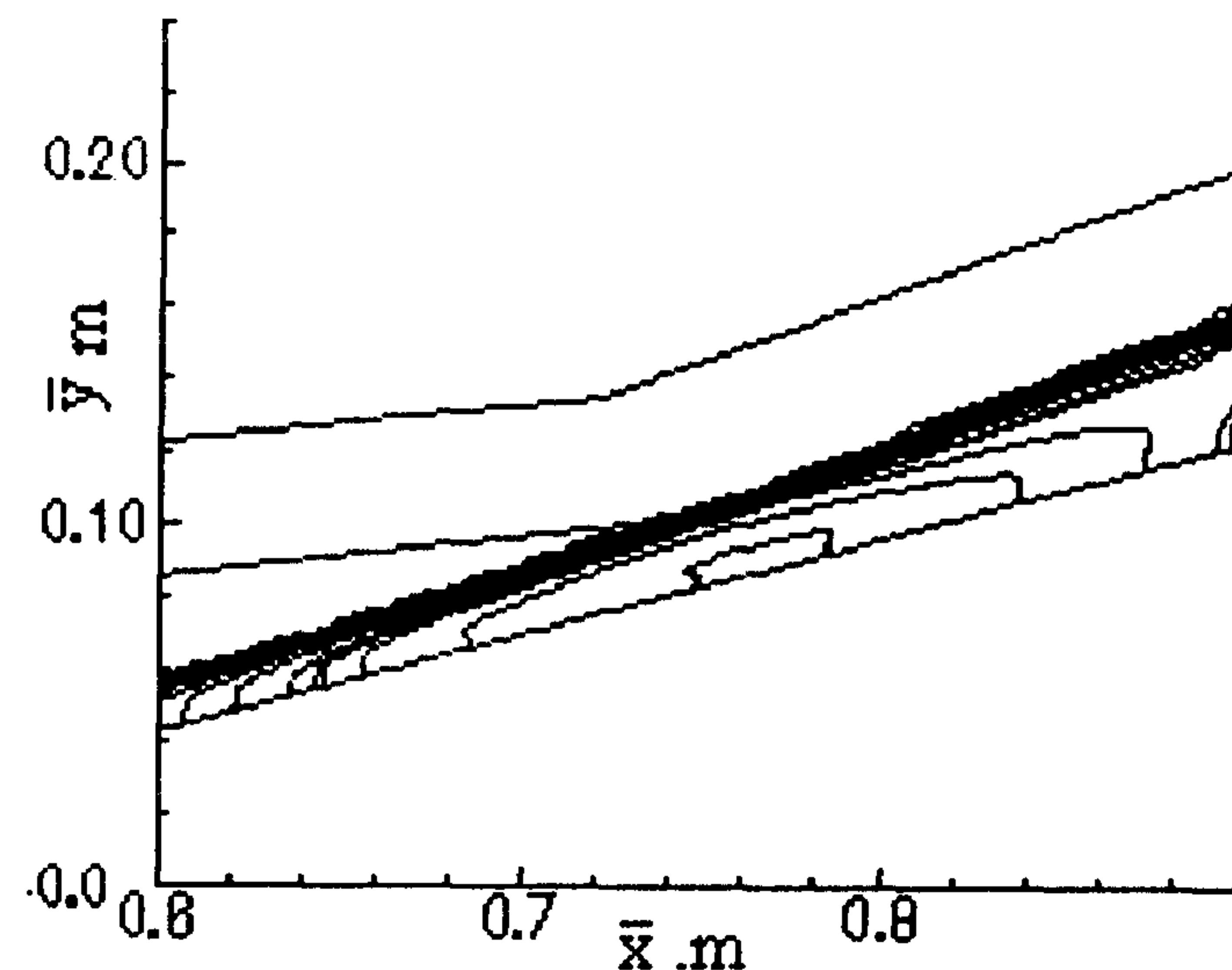
منتشر گردید.

- ۴ - در سال ۱۹۷۸ Vignerone تقریبی برای در نظر گرفتن فشار ارائه داد. این مطلب به نام خود وی در ادبیات حل معادلات PNS ثبت است.
- ۵ - در سال ۱۹۸۰ Lewif B و همکاران جریان سه بعدی را با استفاده از روش Beam and Warming با بکار بردن گاز ایده آل حل نمودند. و نتایج را در مجله AIAA J. Vol. 18 No. 12 ارائه نمودند.
- ۶ - در سال ۱۹۸۵ Dinesh و همکاران جریان حول یک شاتل را با استفاده از روش Beam and Warming و در نظر گرفتن گاز ایده آل حل نمودند. و نتایج در مجله J. Space craft Vol. 23 منتشر گردید. تا قبل از این کلیه کارها با گاز ایده آل حل می شد.
- ۷ - در سال ۱۹۸۸ جریان سه بعدی غیرتعدادی در زاویه حمله بالا توسط Bilal و همکاران حل شد و در J. Space Craft Vol. 26. No. 3 منتشر گردید.

۸ - باتوجه به اینکه در روش Beam and Warming از تفاضل مرکزی استفاده شده است، و این نوع تفاضل موجب ایجاد نوساناتی در نتایج می گردد لذا Tannehil و همکاران در سال ۱۹۸۹ میدان جریان سه بعدی را با استفاده از روش Upwind حل نمودند. این کار در ایران نیز توسط میرزائی و همکاران انجام شده و در مجموعه مقالات کنفرانس دینامیک شاره ها در سال ۱۳۷۷ چاپ شده است. در این مقاله نتایج حاصل از دو روش مقایسه شده است. شکل ۱ نشان دهنده خطوط عدد ماخ ثابت در دو روش Beam and Warming و Upwind است. همانگونه که ملاحظه می گردد در روش Beam and Warming نوسانات زیادی در خطوط ماخ ثابت وجود دارد. از طرف دیگر به دلیل وجود نوسانات شدید این روش نیاز به استفاده از ترم پخش مصنوعی (Damping Term) دارد که برای استفاده کننده مشکلات زیادی را ایجاد می کند. در حالی که در روشهای جدید Upwind چنین مشکلاتی موجود نیست.



(ب)



(الف)

شکل ۱: مقایسه دو روش حل (الف) روش Upwind (ب) روش Beam and Warming Upwind [۲].

شبهه سازی عددی جریان تقارن محوری، دائم، لزج و مافوق صوت با استفاده از معادلات ناویر-استوکس سهموی شده (PNS)

وحید اصفهانیان - کاظم هجران فر، نشریه دانشکده فنی، جلد ۳۱، شماره ۱، خرداد ماه ۱۳۷۷ صفحات ۸۳ الی ۱۰۰

دکتر محمدحسن رحیمیان - عضو هیات علمی گروه مهندسی مکانیک - دانشکده فنی - دانشگاه تهران:

در جلد ۳۱، شماره ۱، خرداد ماه ۱۳۷۷ آن نشریه مقاله ای تحت عنوان "شبهه سازی عددی جریان تقارن محوری، دائم، لزج و مافوق صوت با استفاده از معادلات سهموی شده نویراستوکس PNS" با شماره مرجع ۱۱۵۷ از استاد گرامی جناب آقای دکتر اصفهانیان به چاپ رسیده بود، که جهت تکمیل آن تاریخچه ای از حل معادلات سهموی شده نویراستوکس (PNS) به استحضار خوانندگان محترم می رسد:

۱ - در سال ۱۹۶۸ Rudman & Rabin از جمله اولین افرادی بودند که این معادلات را بدون در نظر گرفتن گرادیان فشار بر روی صفحه صاف حل و نتایج را در AIAA J. Vol.6 PP. 1883-1889 منتشر نمودند.

۲ - در سال ۱۹۷۰ Cheng و همکاران همان کار را با در نظر گرفتن گرادیان فشار در جهت جریان مطالعه و در The Rand Corporation, RM-6193-PR, Santa Monica, California منتشر نمودند.

۳ - در سال ۱۹۷۱ Rubin & Lin روش دیگری را برای بکار بردن تقریب فشار ابداع کردند. روش آنان در Polytechnic Institute of Brooklin, PIBAL Report 71-8 Farmingdel New York



**(پاسخ نویسنده):**

در رابطه با توضیح بیان شده توسط یکی از اعضای محترم هیات علمی به مقاله اینجانب تحت عنوان "شبیه سازی عددی جریان تقارن محوری، دائم، لزج و مافوق صوت با استفاده از معادلات ناویر-استوکس سهموی شده (PNS)" که در شماره ۶۱ این نشریه در خرداد ماه ۱۳۷۷ به چاپ رسیده لازم است مطالبی را بیان کنم. در ابتدا، لازم می دانم از توجه و حسن نیت عضو هیات علمی محترم و توضیح ایشان در رابطه با مقاله اینجانب تقدیر و تشکر نمایم. از اینکه این مقاله نظر ایشان را به خود جلب نموده خوشحال هستم. به ظاهر این اولین بحثی است که نسبت به مقالات چاپ شده در این نشریه می شود و از این نظر که بابی است در جهت تبادل آراء و نظرات علمی و رفع ابهامات ایجاد شده، همچنین بالا بردن سطح کیفی نشریه و مقالات چاپ شده در آن، به فال نیک گرفته می شود.

مقاله چاپ شده در نشریه، قسمتی از پایان نامه دانشجوی دکتری اینجانب، کاظم هجران فر می باشد. در رابطه با ماهیت کار انجام شده باید گفت هدف اصلی از مقاله تهیه یک نرم افزار محاسباتی سریع و دقیق جهت حل میدان جریان تقارن محوری دائم و مافوق صوت / ماوراء صوت توسط معادلات PNS بوده است تا در ادامه، نتایج حاصل بعنوان یک جریان پایه موثر در تحلیل پایداری و پیدایش انتقال جریان (Transition) و پارادکس گذرش جریان بر روی مخروط سرپخ در جریان ماوراء صوت مورد استفاده واقع شود. در حقیقت، باید گفت که یکی از بزرگترین مشکلات تئوری پایداری و محاسبات انتقال جریان، عدم دسترسی به یک برنامه دقیق و سریع CFD برای محاسبه جریان پایه است.

امروزه، اگرچه کدهای CFD توزیع فشار و درجه حرارت روی سطح را جهت محاسبات مهندسی بطور مناسب تعیین می کنند، با این وجود هنوز کمتر کدی است که قادر باشد پروفیل ها و مشتقات آن را (تا مشتق دوم برای همه متغیرها و مشتق اول برای فشار) بطور دقیق تعیین نماید. این مطلب یکی از مهم ترین مباحثی بود که در AIAA Transition Meeting در Reno در سال ۱۹۹۱ مطرح شد. بنابراین، محققینی که زمینه پژوهش آنها موضوعات دیگر بوده ممکن است اهمیت کار برای آنها مشخص نباشد. امروزه، بسیاری از کدهای موجود نظیر FLUENT، PHOENICS، FLOW3D و STAR-CD جریانها را با تخمین خوب مهندسی محاسبه می کنند ولی جهت کارهای پژوهشی دقیق نظیر پایداری و انتقال جریان مناسب نمی باشند. به همین جهت تا قبل از دهه اخیر محققین پدیده انتقال جریان همه از حل لایه مرزی به عنوان جریان پایه استفاده می کردند. ولی متأسفانه برای مخروط سرپخ در جریان ماوراء صوت، لایه مرزی به علت وجود لایه آنتروپی (به علت انحناء شوک) یک لایه مرزی کلاسیک نمی باشد و باید از لایه مرزی مرتبه دوم استفاده شود که

مشکلات بسیاری دارد. به همین علت در دهه اخیر محققین علاقمند به موضوع پدیده انتقال جریان شروع به استفاده از معادلات ناویر-استوکس برای حل جریان پایه کردند. با این وجود بزودی مشخص شد که کدهای تهیه شده برای محاسبات مهندسی، جهت استفاده در تحلیل پایداری خیلی مناسب نمی باشند. نه تنها دقت آنها مورد سوال بود بلکه درست استفاده کردن از این کدها برای گرفتن نتایج دقیق تر مدنظر قرار گرفت.

یکی از روش های دقیق محاسبه بر روی مخروط سرپخ استفاده از معادلات TLNS می باشد [۱،۲]. از آنجا که دقت جریان پایه موردنظر می باشد باید از روش برازش شوک استفاده شود. روش تسخیر شوک نه تنها ممکن است پرش متغیرها را دقیق (از دید تئوری پایداری) محاسبه نکند بلکه پیدا کردن جای دقیق شوک خیلی راحت نبوده و تا حدودی غیرممکن می باشد. در تئوری پایداری مکان شوک بسیار مهم است و معادلات رانگین - هاگونیت در آنجا خطی شده و به عنوان شرط مرزی در محاسبات پایداری استفاده می شود. در روش برازش شوک از آنجا که شوک به عنوان یک مرز محاسباتی تعیین می شود مکان هندسی آن کاملاً مشخص می باشد. ولی در روش تسخیر شوک با انتخاب هر متغیری (نظیر فشار و یا سرعت) جهت یافتن جایگاه شوک (بوسیله پرش آن متغیر)، موقعیت شوک متفاوت خواهد بود. بالاخص در روش عددی Upwind که پرش شوک را تا حدودی هموار می کند.

از طرفی، محاسبه عددی میدانهای جریان لزج و ماوراء صوت با استفاده از معادلات TLNS با وجود دقت مناسب، پرهزینه و زمان بر است [۱،۲]. بنابراین، برای پیش بینی موقعیت پدیده انتقال جریان باید از روشهای سریع حل میدان جریان پایه استفاده شود. این واقعیت موجب شد تا تهیه یک کد دقیق و سریع که بتواند جریان پایه را محاسبه کند موردنظر قرار گیرد. اولین روش مناسب که هم فیزیک جریان ماوراء صوت را دربرداشته و هم سریع و دقیق باشد استفاده از معادلات PNS است. در جستجوی انجام شده در مقالات، مرجع [۳] اشاره کرده که نتایج جریان پایه حاصل از حل معادلات PNS توسط روش عددی Upwind مرجع [۴]، دارای نوسانات پروفیل های فشار در مجاورت دیواره است. از آنجا که تجربه اینجانب [۱،۵] در مورد حل معادلات TLNS به روش بیم - وارمینگ متفاوت بود؛ حل عددی معادلات PNS به روش بیم - وارمینگ با حداکثر سعی ممکن در خطی سازی صحیح ترها و استفاده از برازش شوک و همچنین استفاده از حداقل مقادیر ممکن عبارات میرایی مدنظر قرار گرفت که در نهایت با نتایج جریان پایه حاصل از آن، پایداری جریان مورد بررسی قرار گیرد که قسمت اول این تحقیق (حل جریان پایه) در نشریه دانشکده فنی ارائه شد.

در رابطه با مقایسه انجام شده دو روش بیم - وارمینگ و Upwind برای جریان ماوراء صوت روی یک شیب (Ramp) که در نامه همکار



مقایسه با نتایج معادلات TLNS از دقت مناسب برخوردار بوده و نوسانی در پروفیل‌ها مشاهده نمی‌شود. لازم به ذکر است که شرح کامل مقایسه نتایج معادلات PNS با نتایج معادلات TLNS و نتایج تجربی در مقاله چاپ شده در نشریه ارائه شده است. در این مقاله، تاثیر وجود عبارات میرایی و میزان آنها در نتایج مهم فیزیکی حاصل از حل معادلات PNS بخصوص درجه حرارت و ضریب اصطکاک پوسته ای سطح بررسی شده است. مطابق با نتایج حاصل، در روش بیم - وارمینگ، انتخاب حداقل مقادیر ممکن عبارات میرایی صریح و ضمنی جهت پایداری حل عددی و جلوگیری از کاهش دقت حل امکان پذیر بوده و دارای پیچیدگی خاصی نمی باشد.

باتوجه به دقت نرم افزار نوشته شده PNSAX، نتایج آن بعنوان یک جریان پایه در تحلیل پایداری خطی جریان ماوراء صوت روی یک مخروط سرخ مورد استفاده واقع شد که در این راستا، مقاله ای در کنفرانس کانادا (CFD ۹۸) [۷] به چاپ رسیده است. در این مقاله، نشان داده شده است که نتایج معادلات PNS جهت تحلیل پایداری و انتقال جریان آرام بسیار مناسب و موثر می باشد.

با تشکر از ذکر تاریخچه نسبتاً کوتاه از فعالیتهای انجام شده در زمینه معادلات PNS و روشهای حل عددی آن که توسط ایشان ارائه شده است باید گفت بدلیل ارائه کامل مشخصات جریان و مقایسه آن با سایر نتایج معتبر جهت اثبات دقت حل و شرح نسبتاً کامل معادلات و روش حل عددی، برای اختصار از دادن بعضی از مشخصات نظیر مشتقات پروفیل‌ها همچنین تاریخچه که در اکثر کتابهای کلاسیک نظیر Anderson, D. A. [۸] (که در مراجع مقاله به آن اشاره شده) یافت می شود خودداری شده است.

در خاتمه لازم می دانم از مسئولین محترم نشریه بدلیل تلاش در بالابردن سطح کیفی مقالات چاپ شده تشکر و قدردانی نمایم.

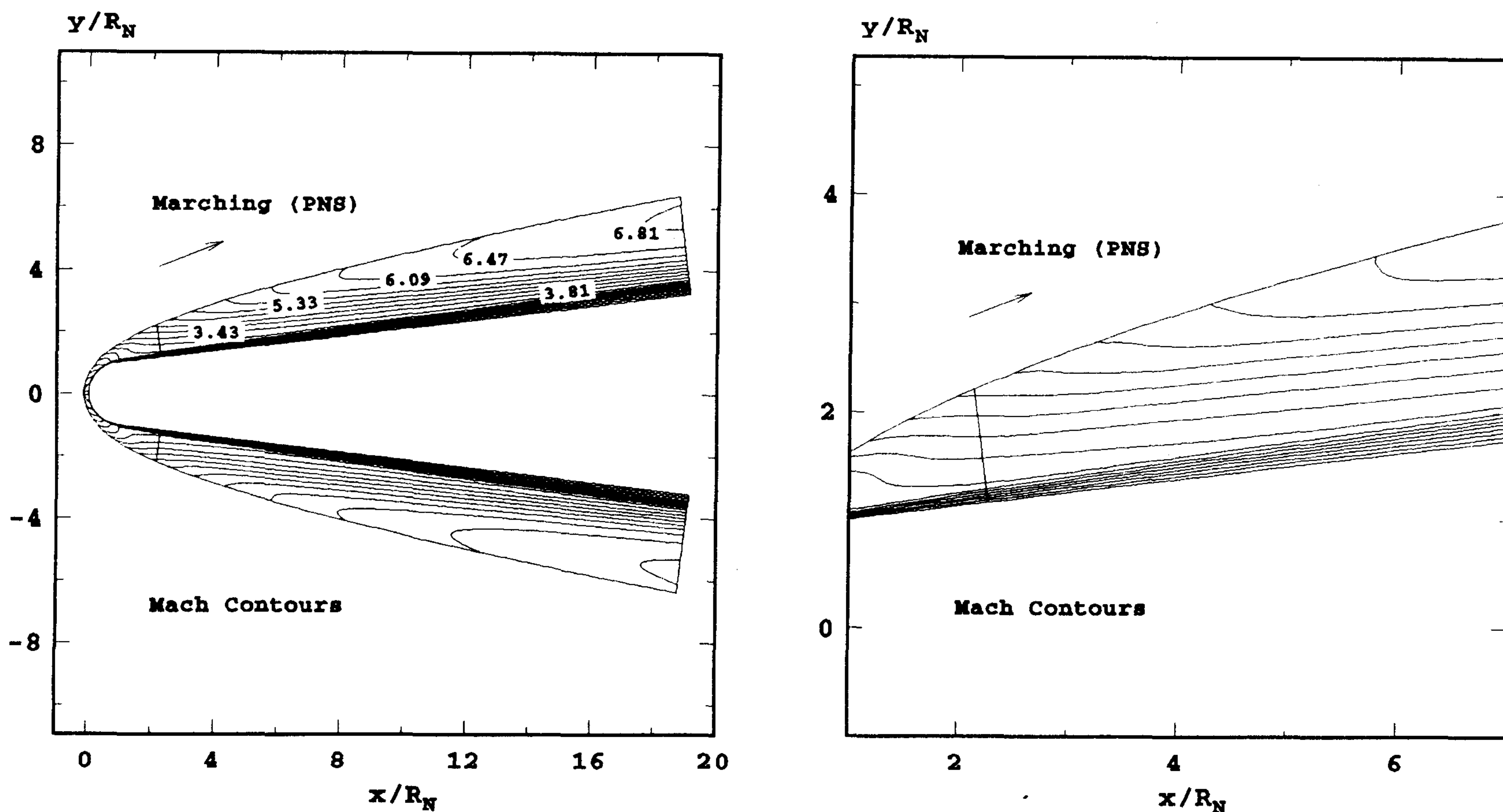
محترم به آن اشاره شده است روش بیم - وارمینگ نسبت به روش Upwind دارای نوسان بیشتری در مجاورت شوک ایجاد می‌کند. در پاسخ به این مطلب باید گفت وجود نوسانات ناخواسته در مجاورت شوک در روش بیم - وارمینگ بدلیل استفاده از روش تسخیر شوک می باشد. در حقیقت از آنجا که روش بیم - وارمینگ یک روش تفاضل مرکزی است، اگر جهت حل میدان جریان از روش برآزش شوک استفاده شود در صورت عدم وجود شوکهای داخلی، نتایج روش بیم - وارمینگ دارای نوسان نبوده و از دقت بالاتری برخوردار است. از همه مهمتر پولیام [۶] نشان داد که یک روش Upwind، با یک روش تفاضل مرکزی باضافه یک ترم اتلاف مصنوعی معادل است. به عبارت دیگر تمام روشهای Upwind دارای اتلاف مصنوعی می باشند و متأسفانه مقدار آن مستقیماً در دست کاربر نمی باشد. بنابراین، عدم وجود نوسان در نتایج حاصل از روش Upwind نشان دهنده دقت بالای روش حل نمی باشد. البته این مطلب از جهت استفاده کد مفید بوده ولی از جهت کنترل دقت حل مناسب نیست مخصوصاً در لایه مرزی که اتلاف مصنوعی ذاتی روش Upwind می تواند تاثیر بسزایی داشته باشد و می تواند پروفیل متغیرها را هموار کند. بنابراین، در صورت عدم وجود شوکهای داخلی در میدان جریان، روش بیم - وارمینگ نسبت به روش Upwind دارای دقت بیشتر در تعیین یک جریان پایه می باشد.

برای روشن شدن این مطلب، در شکل‌های ۱ و ۲ نتایج حاصل از حل عددی معادلات PNS به روش بیم - وارمینگ برای جریان ماوراء صوت روی مخروط سرخ توسط روش برآزش شوک ارائه شده است. مطابق با شکل ۱، خطوط همتراز عدد ماخ دارای هیچ نوسانی نبوده و تطابق خوب نتایج معادلات PNS با نتایج معادلات TLNS در مجاورت مرز شروع پیشروی مشهود است. مطابق با شکل ۲، نتایج حاصل از معادلات PNS برای پروفیل‌های فشار و مشتق اول فشار در

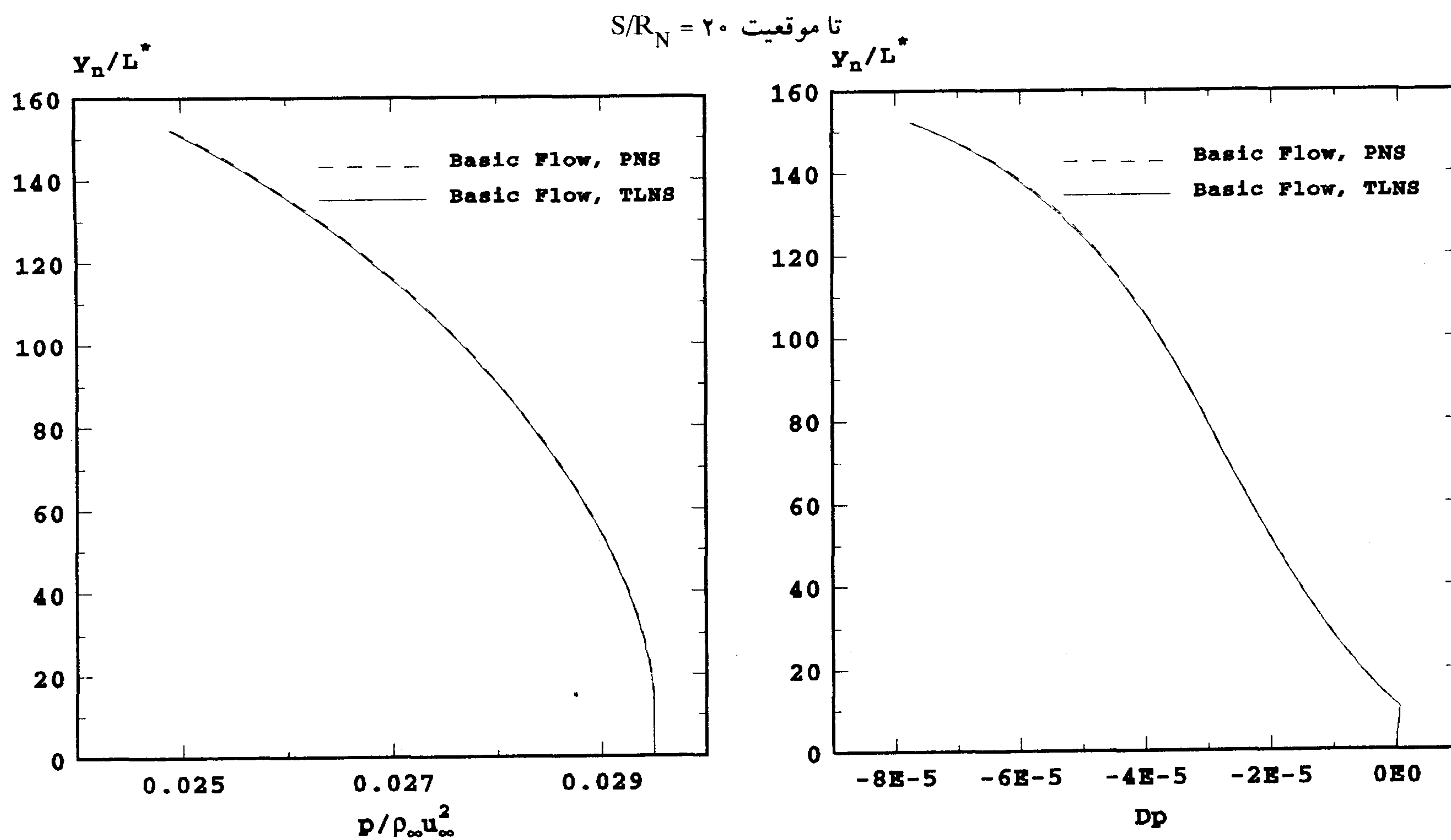
- 1 - Esfahanian, V., Herbert, Th., and Burggraf, O. R. (1992). "Computation of Laminar Flow Over a Long Slender Axisymmetric Blunted Cone in Hypersonic Flow." *AIAA Paper No. 92-0756*.
- 2 - Kufner, E., Dallmann, U., and Stilla, J. (1993). "Instability of Hypersonic Flow past Blunt Cones-Effects of Mean Flow Variations." *AIAA Paper 93-2983*.
- 3 - Malik, M. R., Spall, R. E., and Chang, C. L. (1990). "Effect of Nose Bluntness on Boundary Layer Stability and Transition." *AIAA Paper No. 90-0112*.
- 4 - Lawrence, S. L., Tannehill, J. C., and Chaussee, D. S. (1986). "An Upwind Algorithm for the Parabolized Navier-Stokes Equations." *AIAA Paper 86-1117*.
- 5 - Herbert, Th., and Esfahanian, V. (1992). "Stability of Hypersonic Flow Over a Blunt Body." *AGARD-CP-514*, Italy.
- 6 - Pulliam, T. H. (1986). "Artificial Dissipation Models for the Euler Equations." *AIAA Journal*, 24(12), 1931-1940.
- 7 - Esfahanian, V. and Hejranfar, K. (1998). "The Accuracy of PNS Equations as a Basic Flow for Stability Analysis of Laminar Flow Over a Blunt Cone." *Proceedings of the Sixth Computational Fluid Dynamics Conference, Canada*.



8 - Anderson, D. A., Tannehill, J. C., and Pletcher, R. H. (1984). "Computational Fluid Mechanics and Heat Transfer, McGraw-Hill Book Company, New York.



شکل ۱: خطوط همتراز عدد ماخ برای جریان ماوراءصوت روی مخروط سرخ  $7^\circ$  با دیواره آدیاباتیک،  $M_\infty = 8$  و  $Re_\infty = 31250$



شکل ۲: مقایسه پروفیل های فشار و مشتق اول فشار برای جریان ماوراءصوت روی مخروط سرخ  $7^\circ$  با دیواره آدیاباتیک،  $M_\infty = 8$

$Re_\infty = 31250$  در موقعیت  $S/R_N = 175$