شبیه‌سازی عددی شعله‌های پیش‌مخلوط مغشوش

ارائه شده برای دریافت درجه کارشناسی ارشد

توسط:
سید کیوان عباسي

استاد راهنما:
دکتر بامداد لسانی

دانشکده مهندسی مکانیک
1386

شماره :
تاریخ :

فرم اطلاعات پایان‌نامه
کارشناسی ارشد

دانشگاه صنعتی امیرکبیر
(پلی تکنیک تهران)

مشخصات دانشجو

نام و نام خانوادگی : سید کیوان عباسی **دانشجونوبت دوم**

شماره دانشجویی : 84126081 **دانشکده :** مهندسی مکانیک **رشته تحصیلی : تبدیل انرژی**

نام و نام خانوادگی استاد راهنما / استادان راهنما: دکتربامداد لسانی

عنوان به فارسی : **شبیه سازی عددی شعله های پیش مخلوط مغشوش**

عنوان به انگلیسی : **Numerical simulation of turbulent premixed flames**

نوع پروژه : کارشناسی ارشد **کاربردی** **☐ بنیادی** **☐ توسعه‌ای** **☐ نظری**

تاریخ شروع : 85/11/1 **تاریخ خاتمه : 86/12/26** **تعداد واحد : 6**

سازمان تأمین کننده اعتبار : معاونت پژوهشی دانشگاه صنعتی امیرکبر

واژه های کلیدی به فارسی : ابر مغشوش ایزوتروپ – شعله پیش مخلوط مغشوش

واژه های کلیدی به انگلیسی : Turbulent premixed flames – Isotropic turbulent

---

نظرها و پیشنهادها به منظور بهبود فعالیت‌های پژوهشی دانشگاه :

استاد راهنما / استادان راهنما : دکتربامداد لسانی

دانشجو : سید کیوان عباسی **امضا استاد راهنما :** **تاریخ :**

نسخه 1) معاونت پژوهشی
نسخه 2) کتابخانه و به انضمام دو جلد پایان نامه به منظور تصفیه حساب با کتابخانه و مرکز اسناد و مدارک علمی

چکیده

یک حل‌گر عددی طیفی سه بعدی ساخته شده است. گسسته سازی زمانی در این حلگر، توسط روش شبه ضمنی کرنک–نیکلسون، و گسسته سازی عبارات غیر خطی، با بهره گیری از روش مرتبه دوم ادامز–بشفورث صورت گرفته است. درستی حل‌گر توسط یک نمونه حل در جریان آرام، آزمایش گردیده است.

برای ایجاد قابلیت تحلیل رژیم جریان به حالت مغشوش، از مدل طیفی که توسط کرایچنان برای عدد موجهای زیرشبکه ارائه شده است، استفاده شده است.

به این ترتیب میتوان یک ابر مغشوش پریودیک ایزوتروپ را تولید کرد. شرط اولیه برای ساخت این ابر از توزیع انرژی کلموگروف برگرفته شده است. میدان سرعت چندین بار درحلگر حل، و سپس مقیاس می‌گردد تا سرعت‌ها مقادیر فیزیکی‌تری پیدا کنند. با داشتن توزیع سرعت در هر لحظه، می-توان توزیع انرژی بر حسب عدد موج را محاسبه ویادداشت نمود. با مقیاس و تکرار پروسه حل، از توزیع انرژی بر حسب عدد موج در دو زمان 0.28 ثانیه و 0.65 ثانیه میانگین‌گیری شده است و با نتایج آزمایش تجربی کومت بلوت مقایسه گردیده است.همچنین افت انرژی بر حسب زمان نیز با آزمایش تجربی کومت بلوت مقایسه شده است .نتایج عددی حاصل توافق خوبی با نتایج تجربی نشان می‌دهند.

پس از ساخت ابر مغشوش ایزوتروپ، یک جبهه شعله پیش‌مخلوط آرام یک بعدی ساخته شده است. پارامترهای شعله بدست آمده از روش عددی، با نتایج تحلیلی مقایسه گردیده است. این نتایج نیز از توافق خوبی برخوردارند.

تشکر و قدردانی

بر خود واجب می‌دانم از زحمات بی‌دریغ آقای دکتر بامداد لسانی، که در دورهٔ انجام این پروژه، بسیار از ایشان آموختم، سپاس‌گزاری و قدردانی کنم.

همچنین از دوستان گرامی‌ام، آقایان بهروز اباذری و فرید بهزاد که در انجام این پروژه به من کمک کردند، نهایت سپاس‌گزاری و امتنان را داشته باشم.

اهدانامه

این اثر ناچیز را به مادر عزیزم تقدیم می‌کنم؛ امیدوارم توانسته باشم با به‌پایان رساندن این پروژه، ذره‌ای از محبت‌های بی‌پایان او را پاسخ گفته باشم. او بهترین مادر دنیاست...

فهرست مطالب

فهرست اشکال

فصل 5

فصل 6

فهرست علایم اختصاری

κ	عدد موج
ε	اتلاف انرژی
ϕ	فشار تصحیح شده
P	فشار
U	مولفه سرعت در راستای محور x
V	مولفه سرعت در راستای محور y
W	مولفه سرعت در راستای محور z
$\hat{U}$	تبدیل فوریه U
$\hat{V}$	تبدیل فوریه V
$\hat{W}$	تبدیل فوریه W
Φ_{ij}	تانسور طیف سرعت
L_{11}	طول مشخصه کلی
R_{11}	همبستگی دونقطه‌ای سرعت
R_{λ}	رینولدز تیلور
T_a	دمای اکتیواسیون
s_L^0	سرعت شعله آرام
δ_L^0	ضخامت شعله

فصل 1

مقدمه

1-1. معرفی

در سال 1941، کلموگرف[1] [1] برای نخستین بار تابع توزیع انرژی برحسب عدد موج را معرفی کرد. ابتکار او توابع ساختاریی[2] بود که وی معرفی کرد و نهایتاً به رابطه معروف $k^{-5/3}$ در ناحیه اینرسی[3] رسید. تلاش‌های بسیاری در سال‌های بعد در جهت افزایش معلومات توربولانس ایزوتروپ صورت گرفت ولی از آنجا که در دهه‌های ابتدایی مطالعه برروی جریان توربولانس، اطلاعات ناقصی در مورد این رژیم وجود داشت، استخراج داده‌های تجربی برای به‌دست آوردن دیدگاه بهتری نسبت به توربولانس ایزوتروپ اجتناب‌ناپذیر بود. بررسی جریان توربولانس ایزوتروپ همگن به‌بصورت تجربی نخستین بار توسط کرسین[4] و کومت بلوت[5] (1970) [2] انجام شد. در این آزمایش همبستگی‌های طولی[6] و عرضی[7]، تابع طیف کلموگرف و طول‌های مشخصه کلی[8] برای توربولانس ایزوتروپ تولید شده توسط توری[9]، اندازه‌گیری و محاسبه شد. با پیشرفت رایانه‌ها در دو دهه اخیر توانایی تولید جریان ایزوتروپ با انرژی رو به کاهش[10] و قیاس آن با تابع طیف انرژی کلموگرف امکان‌پذیر شده است.

---

[1] Kolmogrove
[2] Structure function
[3] Inertial Subrange
[4] Corrsin
[5] Comte-bellot
[6] Longitudinal Correlation
[7] Lateral Correlation
[8] Integral Length Scale
[9] Grid turbulence
[10] Free decaying isotropic turbulence

به عنوان مثال، در سال 1987 لوسیور[1] [3] و همکاران، با تقویت یک بازهٔ کوچک انرژی از طیف کلموگرف، توانستند طیف‌های عددی، در بازه وسیعی از اعداد موج را بدست آورند.

در روش دیگر برای تولید ابر مغشوش ایزوتروپ، با استفاده از طیف کلموگروف، یک شرط اولیه تولید می‌شود. میدان سرعت بدست آمده با فاز تصادفی، در یک حل‌گر[2] رها می‌شود. سپس سرعت‌ها بوسیله مقیاس کردن تصحیح می‌شوند. این فرایند چندین بار تکرار می‌گردد تا فاز سرعت‌ها فیزیکی گردد. شارلت[3] و همکاران (2002) [4] و پوانسوت[4] و همکاران (1994) [5] از روش مذکور به عنوان یک ابزار استفاده کرده و جبهه شعله آرام را با این ابر مغشوش پیش‌مخلوط[5] برخورد دادند. مشایخ [6] در سال 2001 و سامرفلد [7] در سال 1999 نیز، حرکت ذره در ابر مغشوش ایزوتروپ را بررسی کردند.

در پروژه حاضر، ابتدا سعی بر آن است که یک ابر مغشوش هموژن ایزوتروپ در فضای فوریه ساخته شود؛ و پس از آن یک جبهه شعله آرام پیش‌مخلوط ساخته خواهد شد.

فصل دوم به مبانی فضای فوریه و کاربردهای آن در پروژه حاضر می‌پردازد. در فصل سوم در مورد بخش توربولانس پروژه و توزیع انرژی کلموگرف صحبت خواهد شد. فصل چهارم در مورد حل‌گر جریان مغشوش ایزوتروپ و نحوه گسسته کردن زمانی و گسسته کردن معادلات در فضای فوریه خواهد بود. در فصل پنجم نتایج این حل‌گر نمایش داده می‌شوند. نهایتاً در فصل ششم شعله آرام پیش‌مخلوط همراه با معادلات حاکم بر آن نشان داده می‌شود.

---

[1] Lesieur
[2] Solver
[3] Charlotte
[4] Poinsot
[5] Premixed laminar flame

فصل 2

تبدیل فوریه

2-1. مقدمه

در جاهایی که دقت بالا مورد نیاز است، روش‌های تبدیلی[1] را می‌توان به‌عنوان روش‌های جایگزین شبه‌تحلیلی به‌جای روش تفاضل محدود به‌کار گرفت [8]. در این فصل، روش تبدیل فوریه– که نوعی روش طیفی است– به اختصار مرور می‌شود. از تبدیل فوریهٔ گسسته، تا حد زیادی در پردازش سیگنال استفاده می‌شود. در این فصل، از این روش برای دیفرانسیل‌گیری عددی از داده‌های پریودیک و حل معادلات پاره‌ای بیضوی در هندسه‌های مستطیلی استفاده شده است. پس از شرح روش دیفرانسیل‌گیری عددی با روش‌های تبدیلی، دیده خواهد شد که استفاده از آنها تا حد زیادی به حل معادلات دیفرانسیلی پاره‌ای، سهولت می‌بخشد.

2-2. تبدیل فوریه

فرض کنید نمایش یک تابع پریودیک پیوستهٔ f ، به صورت ترکیبی از هارمونیک‌های محض زیر باشد:

$$f(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} \hat{f}_k e^{ikx} \tag{1-2}$$

که در آن $\hat{f}_k$ ، ضریب فوریه متناظر با عدد موج k است. در اینجا مقادیر k اعداد صحیح هستند؛ زیرا دوره تناوب 2π است. در تحلیل فوریه، سوال این است که کدام هارمونیک‌ها و تا چه حد در سری

[1] Transform methods

گفته شده سهیم هستند. این داده‌ها در $\hat{f}_k$ نهفته هستند. سری فوریه برای مشق $f(x)$، به‌سادگی با مشتق گرفتن از رابطهٔ (1–2) به صورت زیر نمایش داده می‌شود:

$$f'(x) = \sum_{k=-\infty}^{+\infty} ik\ \hat{f}_k e^{ikx} \qquad (2\text{-}2)$$

با قیاس با تبدیل فوریهٔ f در رابطهٔ (1–2)، نتیجه می‌شود که ضرایب فوریهٔ f' برابر با $ik\ \hat{f}_k$ هستند. در این بخش، ابزار برای محاسبهٔ $\hat{f}_k$ برای داده‌های گسسته، شرح داده خواهد شد. وقتی $\hat{f}_k$ به دست آمد، می‌توان به راحتی آن را در ik ضرب کرد تا ضرایب مشتق (f') به دست آیند.

3–2. سری فوریهٔ گسسته[1]

اگر تابع پریودیک f تنها روی N نقطهٔ شبکه به صورت گسسته روی نقاط $x_0, x_1, \ldots, x_{N-1}$ تعریف شده باشد، در این صورت می‌توان f را با یک تبدیل فوریهٔ گسسته نمایش داد. تبدیل فوریهٔ گسستهٔ دنبالهٔ N عدد $f_0, f_1, \ldots, f_{N-1}$ به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$f(x) = \sum_{k=N/2}^{N/2-1} \hat{f}_k e^{ikx_j}, \qquad j = 0,1,\ldots N-1 \qquad (3\text{-}2)$$

[1] Discrete Fourier Transform

که در آن، $\hat{f}_{-\frac{N}{2}}, \hat{f}_{-\frac{N}{2}+1}, \ldots, \hat{f}_0, \ldots, \hat{f}_{\frac{N}{2}-1}$ ضرایب فوریهٔ گسستهٔ تابع f هستند. در اینجا N زوج و دورهٔ تناوب تابع f، 2π درنظر گرفته می‌شود. یکی از فواید دورهٔ تناوب 2π این است که اعداد موج، اعدادی صحیح می‌شوند. دنبالهٔ f_j شامل مقادیر f محاسبه شده در نقاط متساوی‌الفاصله در طول محور $x_j = jh$ است که در آن فاصله شبکه‌ای برابر است با $h = 2\pi / N$. البته فرض بر آن است که f تابعی پریودیک بوده و $f_0 = f_N$، و در نتیجه، سری $f_0, f_1, \ldots, f_{N-1}$ شامل هیچ اضافاتی نیست. در حالتی که دورهٔ تناوب به صورت کلی‌تر L باشد، اعداد موج ظاهر شده در آرگومان نمایی به جای k، به شکل $(2\pi / L)k$ و فواصل شبکه برابر با $h = L / N$ خواهند بود. به این ترتیب، می‌توان به عباراتی مشابه برای آرگومان‌های نمایی (مانند آنچه که در حالت دورهٔ تناوب 2π مشاهده گشت) دست یافت. بنابراین، پریود واقعی در عبارت بیان شده در تبدیل فوریهٔ گسستهٔ f ظاهر نمی‌شود، اما در عبارت بیان شده برای مشتق آن ظاهر می‌گردد.

بنابر خاصیت تعامد، رابطهٔ زیر حاصل می‌شود:

$$\hat{f}_k = \frac{1}{N}\sum_{j=0}^{N-1} f_j e^{-ikx_j} \qquad k = -\frac{N}{2}, -\frac{N}{2}+1, \ldots, \frac{N}{2}-1 \tag{4-2}$$

روابط (1-3) و (1-4)، زوج تبدیل‌های فوریهٔ گسسته را برای داده‌های گسسته فراهم می‌کنند. به رابطهٔ (1-4)، تبدیل مستقیم (از فضای فیزیکی x به فضای فوریه k) و به رابطهٔ (2-3)، تبدیل وارون (از فضای فوریه k به فضای فیزیکی x) گفته می‌شود.

4-2. تبدیل فوریهٔ سریع[1]

برای داده‌های مختلط، تبدیل برای هر شمارنده (در رابطهٔ (2-3) یا (2-4))، در حدود $4N^2$ است. البته یک الگوریتم ساده در دههٔ 60 میلادی نوشته شد که می‌توانست مرتبهٔ محاسبات را به

$O(N\ log_2N)$ برساند. این روش، روش تبدیل فوریهٔ سریع نام گرفت. این ابتکار، موجب کاهش زیاد میزان محاسبات برای Nهای بزرگ گردید. با این که الگوریتم اصلی برای $N=2^m$ نوشته شده بود، اما امروزه الگوریتم‌هایی نیز برای مقادیر کلی N (و نه لزوماً برای توان‌های 2) نوشته شده‌اند.

الگوریتم تبدیل فوریهٔ سریع، موضوع بسیاری از مقالات و کتاب‌ها بوده که در اینجا بدان پرداخته نمی‌شود. تقریباً برای تمام پلتفرم‌های کامپیوتری، برنامه‌های تبدیل فوریهٔ سریع بسیار کارآمدی نوشته شده‌اند. برای مثال، در وب‌سایت مرجع [9] برنامه‌هایی برای الگوریتم کلی تبدیل فوریهٔ سریع و همچنین گونه‌های مشابه و مفید آن در مورد توابع حقیقی و تبدیل‌های سینوسی و کسینوسی وجود دارند.

خواه f مختلط باشد یا حقیقی، ضرایب فوریهٔ f در حالت کلی، مختلط خواهند بود. اما وقتی f حقیقی باشد، رابطه‌ای مفیدی میان ضرایب فوریهٔ متناظر با اعداد موج مثبت و منفی وجود دارد. این خاصیت، باعث کاهش در فضای مورد نیاز برای انجام محاسبات می‌شود، به این صورت که حالت متناظر با N نقطهٔ داده حقیقی f_j، $N/2$ ضریب فوریهٔ مختلط خواهد بود.

[1] Fast Fourier Transform (FFT)