به نام خداوند مهرپیشهٔ مهرگستر

دانشگاه تهران
پردیس دانشکده‌های فنی
دانشکده مهندسی مکانیک

طراحی آزمایش تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی در فرایند برخورد جت خطی با استفاده از کد هدایت حرارتی معکوس

نگارش: حسین ثاقبی

استاد راهنما: دکتر فرشاد کوثری

پایان‌نامه برای دریافت درجه کارشناسی ارشد
در رشته
مهندسی مکانیک - گرایش تبدیل انرژی

بهمن ۱۳۸۷

تعهدنامه اصالت اثر

اینجانب **سید حسین ثاقبی** تایید می‌کنم که مطالب مندرج در پایان‌نامه کارشناسی ارشد من تحت عنوان: **طراحی آزمایش تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی در فرایند برخورد جت خطی با استفاده از کد هدایت حرارتی معکوس** حاصل کار پژوهشی اینجانب است و به دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این نوشته از آنها استفاده شده است مطابق مقررات ارجاع گردیده است. این (پایان‌نامه / رساله) قبلا برای احراز هیچ مدرک هم سطح یا بالاتر ارائه نشده است.

کلیه حقوق مادی و معنوی این اثر متعلق به پردیس دانشکده‌های فنی دانشگاه تهران می‌باشد.

۱۳۸۷ / ۱۲ / ۵

سید حسین ثاقبی

تقدیم به پدر و مادرم به خاطر عشق بدون قید و شرطشان.

ح. ث.

با تشکر از دکتر فرشاد کوثری، استادی که انجام این پروژه بدون حمایت دائمی و راهنمایی‌های ایشان امکان‌پذیر نبود.

Far better an approximate answer to the right question,
which is often vague,
than an exact answer to the wrong question,
which can always be made precise.

John W. Tukey, 1962

جوابی تخمینی به سوالی درست،

که اغلب به صورت مبهم مطرح می‌شود،

بسیار بهتر است از جوابی دقیق به سوالی نادرست،

که همواره می‌توان آن را با جزئیات طرح کرد.

چکیده

برخورد جت سیال به علت نرخ بالای انتقال حرارتی که تولید می‌کند، کاربردهای فراوانی در صنعت دارد؛ که از آن جمله می‌توان به خنک‌کاری لبهٔ پره توربین و قطعات الکترونیکی یا یخ‌زدایی از بال هواپیما اشاره کرد. بهمین سبب است که تعیین میزان این انتقال حرارت همواره از اهمیت ویژه‌ای برخوردار بوده است. هدف در این پایان‌نامه تشریح روند و طراحی آزمایشی است که برای تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی محلی در مسئلهٔ برخورد جت سیال استفاده می‌شود. این کار به کمک روش هدایت حرارتی معکوس صورت می‌گیرد. ویژگی بسیار مطلوب روش‌های هدایت حرارتی معکوس آن است که آنها با استفاده از اندازه‌گیری‌های ساده و کم هزینه دما در محل‌هایی داخل جسم قادر به تخمین شرایط مرزی حاکم بر مسئله هستند. بعلاوه، این روش‌ها انجام آزمایش را در نزدیک‌ترین حالت به شرایط واقعی آن امکان‌پذیر می‌سازند. از پیش‌نیازهای انجام هر آزمایشی طراحی بهینه آن است. آزمایش‌های بهتر طراحی شده نتایج قابل اطمینان‌تر دارند و تاثیر خطای اندازه‌گیری در آنها حداقل شده است. روش بیان شده در این پروژه در یک سری آزمایش‌های شبیه‌سازی شده به کار گرفته می‌شود تا کارآیی آن بررسی شود و طراحی بهینه آزمایش بدست آید. نتایج نشان می‌دهند که روش استفاده شده در آزمایش بهینه به خوبی قادر به تعیین توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی روی سطح هدف در یک مسئله برخورد جت سیال می‌باشد.

فهرست مطالب

موضوع **صفحه**

چکیده چهار

فهرست مطالب پنج

فهرست شکل‌ها هشت

فهرست جدول‌ها ده

فهرست علائم و اختصارات یازده

فصل اول مقدمه ۱

۱-۱ اهمیت موضوع ۲

۱-۲ اهداف پایان‌نامه ۳

۱-۳ بخش‌های پایان‌نامه ۴

فصل دوم انتقال حرارت در برخورد جت سیال ۶

۲-۱ مقدمه و پیشینه ۷

۲-۲ دسته‌بندی انواع جریان برخورد جت ۱۴

۲-۲-۱ پارامترهای دسته‌بندی ۱۴

۲-۲-۲ تکنیک‌های افزایش نرخ انتقال حرارت ۱۵

۲-۳ شبیه‌سازی عددی ۱۸

۲-۳-۱ مقدمه ۱۸

۲-۳-۲ معادلات حاکم ۲۰

۲-۳-۳ مدلسازی آشفتگی ۲۰

۲-۳-۴ مدل کردن آشفتگی در نزدیکی دیواره ۲۱

۲-۳-۵ فضای محاسباتی ۲۲

۲-۳-۶ شرط‌های مرزی ۲۳

۲-۳-۷ ملاحظات تولید شبکه ۲۴

۲-۳-۸ پارامترهای حل و نتایج ۲۷

فصل سوم روش‌های معکوس در انتقال حرارت ۳۱

۳-۱ مقدمه ۳۲

۳-۲ دسته‌بندی مسائل معکوس حرارتی و روش‌های حل آنها ۳۸

۳-۳ چرا حل *IHCP* مشکل است؟ ۴۲

۳-۴ توصیف خطاهای اندازه‌گیری ۴۴

۳-۵ معیارهای ارزیابی در یک روش حل *IHCP* ۴۶

۳-۶ ضرایب حساسیت ۴۷

۳-۶-۱ تعریف، اهمیت و کاربرد ۴۷

۳-۶-۲ روش‌های بدست آوردن ضریب حساسیت ۵۱

۳-۶-۳ ضریب حساسیت بی بعد شده ۵۳

۳-۶-۴ ضریب حساسیت دو بعدی ۵۴

۳-۷ روش تخمین تابع متوالی دو بعدی (*2D SFS*) ۵۵

۳-۷-۱ مقدمه ۵۵

۳-۷-۲ فرمولبندی ۵۷

فصل چهارم روند حل و ملاحظات طراحی آزمایش ۶۳

۴-۱ حل مستقیم ۶۴

۴-۱-۱ مقدمه ۶۴

۴-۱-۲ معادلات حاکم ۶۴

۳-۱-۴ گسسته‌سازی معادلات حل مستقیم ۶۵

۲-۴ پارامترهای طراحی آزمایش ۶۸

۱-۲-۴ مقدمه ۶۸

۲-۲-۴ ماتریس کامل ضرایب حساسیت ۶۹

۳-۲-۴ تحلیل خطا در $IHCP$ (بایاس و واریانس) ۷۰

۳-۴ روش انجام آزمایش و روند تخمین ۷۱

فصل پنجم نتایج و بحث‌های مربوط به آن ۷۵

۱-۵ مقدمه ۷۶

۲-۵ بررسی استقلال از شبکه ۷۶

۳-۵ بررسی نویز تولید شده ۷۸

۴-۵ آزمون‌های اعمال شده به روش معکوس ۷۹

۵-۵ نتایج نهایی ۸۸

۱-۵-۵ ضرایب حساسیت ۸۹

۲-۵-۵ بررسی استقلال نتایج از Q_{subj} ۹۳

۳-۵-۵ طراحی بهینه ۹۴

۶-۵ نتیجه‌گیری و پیشنهاد برای آینده ۱۰۰

مراجع ۱۰۲

فهرست شکل‌ها

شکل **صفحه**

شکل ۲-۱. شماتیک جریان برخورد جت برای یک جت خطی (دو بعدی) مغشوش در هندسه بسته. ۹

شکل ۲-۲. شماتیک فضای محاسباتی استفاده شده در شبیه‌سازی عددی. ۲۳

شکل ۲-۳. نمایی از شبکه استفاده شده در نزدیکی محل سکون. ۲۵

شکل ۲-۴. مقدار y^+ در همسایگی دیواره برای شبکه‌بندی نهایی. ۲۷

شکل ۲-۵. شبیه‌سازی عددی برای جریان برخورد جت خطی آشفته؛ بردارهای سرعت. ۲۸

شکل ۲-۶. بردارهای سرعت؛ نمای نزدیک دیواره: لایه مرزی آشفته تشکیل شده. ۲۹

شکل ۲-۷. عدد ناسلت روی دیواره؛ مقایسه مقادیر حاصل از شبیه‌سازی عددی و مطالعه تجربی. ۲۹

شکل ۳-۱. شماتیک یک جسم وارد شونده به جو. ۳۶

شکل ۳-۲. نشانگر مقادیر اندازه‌گیری شده دما و تخمین شار روی سطح. ۳۶

شکل ۳-۳. مولفه mام شار حرارتی تخمین زده شده. ۴۸

شکل ۳-۴. نمونه‌ای از $IHCP$ دو بعدی. ۵۷

شکل ۳-۵. دو شار حرارتی مستقل متغیر در زمان همراه با فرض ثابت بودن شار برای r زمان بعدی. ۶۰

شکل ۴-۱. شبکه‌بندی استفاده شده در صفحه هدف. ۶۵

شکل ۴-۲. شماتیک طرح آزمایش. ۷۲

شکل ۵-۱. بررسی استقلال از شبکه برای اندازه گریدهای متفاوت. ۷۷

شکل ۵-۲. بررسی توزیع چگالی احتمال خطاهای تولید شده. ۷۹

شکل ۵-۳. تخمین شار حرارتی آزمون پله؛ مقایسه روش معکوس یک بعدی و دو بعدی. ۸۰

شکل ۵-۴. تخمین شار حرارتی آزمون پله؛ استفاده از دماهای آلوده به نویز؛ $\sigma = 0.04$. ۸۱

شکل ۵-۵. استفاده از دماهای بدون نویز و آلوده به نویز برای مقادیر زیاد r. ۸۱

شکل ۵-۶. تخمین شار حرارتی آزمون پله به ازای میزان نویز متفاوت در دماهای اندازه‌گیری شده. ۸۲

شکل ۵-۷. تخمین شار حرارتی آزمون پله به ازای فاصله زمانی اندازه‌گیری متفاوت $\sigma = 0.04,\ r = 3$. ۸۳

شکل ۵-۸. آزمون شار حرارتی مثلث برای حالت بدون نویز و دو حالت $r = 2,3$. ۸۴

شکل ۵-۹. آزمون شار حرارتی مثلث برای دو میزان نویز متفاوت $r = 3$ و $\Delta t_{meas} = 1.0(s)$. ۸۵

شکل ۵-۱۰. مقدار ضریب حرارت انتقال اعمال شده بصورت آزمایشی. ۸۶

شکل ۵-۱۱. ضرایب انتقال حرارت آزمایشی تخمین زده شده $\sigma = 0.01,\ \Delta t_{meas} = 1.0(s)$. ۸۷

شکل ۵-۱۲. ضرایب انتقال حرارت آزمایشی تخمین زده شده $\sigma = 0.05,\ \Delta t_{meas} = 1.0(s)$. ۸۷

شکل ۵-۱۳. ضرایب انتقال حرارت آزمایشی تخمین زده شده $\sigma = 0.05,\ \Delta t_{meas} = 0.5(s)$. ۸۸

شکل ۵-۱۴. ضریب حساسیت حسگر شماره ۴ نسبت به شارهای حرارتی روی سطح. ۸۹

شکل ۵-۱۵. ضریب حساسیت حسگر شماره ۴ نسبت به سه مولفه زمانی شار حرارتی بازه سوم. ۹۲

شکل ۵-۱۶. ضریب حساسیت حسگر شماره ۱ نسبت به شارهای حرارتی روی سطح. ۹۲

شکل ۵-۱۷. بررسی استقلال نتایج نهایی از مقدار شار حرارتی ثابت اعمال شده به سطح. ۹۳

شکل ۵-۱۸. تخمین شارهای حرارتی متغیر با زمان روی سطح. ۹۴

شکل ۵-۱۹. تغییرات دمای روی سطح برای بازه‌های ۱ و ۵. ۹۵

شکل ۵-۲۰. ضریب انتقال حرارت تخمین زده شده برای هر بازه در طول زمان. ۹۶

شکل ۵-۲۱. تاثیرات فاصله زمانی اندازه‌گیری بر روی دترمینان ماتریس ضرایب حساسیت. ۹۸

شکل ۵-۲۲. تاثیرات تعداد شارهای حرارتی بر روی دترمینان ماتریس ضرایب حساسیت. ۹۹

شکل ۵-۲۳. توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی تخمین زده شده با استفاده از $IHCP$ دو بعدی. ۱۰۰

شکل ۵-۲۴. شبیه‌سازی برخورد جت خطی به استوانه طویل (پیشنهاد برای مطالعات آینده). ۱۰۱

فهرست جدول‌ها

جدول **صفحه**

جدول ۲-۱. تعدادی از مطالعات تجربی انجام شده در زمینه برخورد جت خطی هوا به هوای مغشوش. ۱۱

جدول ۲-۲. خلاصه پارامترهای استفاده شده در طبقه‌بندی برخورد جت. ۱۴

جدول ۲-۳. روش‌های استفاده شده در افزایش نرخ انتقال حرارت در جریان برخورد جت. ۱۶

جدول ۲-۴. جزئیات آزمایش استقلال از شبکه برای شبکه موازی با دیواره. ۲۶

جدول ۲-۵. جزئیات آزمایش استقلال از شبکه برای شبکه‌بندی عمود بر دیواره. ۲۶

جدول ۵-۱. خطای روش معکوس برای تخمین شار حرارتی آزمون پله به ازای میزان نویز متفاوت. ۸۲

جدول ۵-۲. خطای روش معکوس برای تخمین شار حرارتی آزمون پله به ازای Δt_{meas} متفاوت. ۸۳

جدول ۵-۳. خطای روش معکوس برای تخمین شار حرارتی آزمون مثلث به ازای میزان نویز متفاوت. ۸۵

جدول ۵-۴. مقادیر خطای میانگین به ازای r متفاوت. ۹۷

فهرست علائم و اختصارات

c_p	ظرفیت حرارتی مخصوص، $J / kg.K$
D_H	قطر هیدرولیکی نازل، m
h	ضریب انتقال حرارت جابجایی، W/m^2K
H/D_h	فاصله بی بعد نازل تا سطح، m/m
$\mathbf{J}$	ماتریس کامل ضرایب حساسیت، K/W
k	ضریب هدایت حرارتی، W/mK
L	طول مشخصه، m
L_1	طول نیم صفحه، m
L_2	ضخامت صفحه، m
Nm	تعداد کل اندازه‌گیری‌ها در زمان
Np	تعداد پارامترهای تخمین زده شده
Ns	تعداد حسگرها
Q_{subj}	شار حراتی ثابت اعمال شده به سطح، W/m^2
$\mathbf{q}$	بردار شار حرارتی، W/m^2
r	تعداد فاصله زمانی آینده استفاده شده در تخمین
Re	رینولدز جریان
S	تابع مجموع مربعات، K^2
T	دما، K
$\mathbf{T}$	بردار دما استفاده شده در روش معکوس، K
$\mathbf{X}$	بردار ضرایب حساسیت، K/W
x, y	مختصات مکانی

Y	دماهای اندازه‌گیری شده، K
W	عرض نازل، m

علائم یونانی

α	ضریب پخش حرارتی، m^2/s
σ	انحراف معیار خطای تصادفی تولید شده
ρ	چگالی، kg/m^3

زیرنویس‌ها

$_0$	حالت اولیه
$_\infty$	سیال محیط
$_{interval}$	بازه روی سطح
$_{jet}$	خروجی نازل
$_{surf}$	روی سطح برخورد
$_m$	اندیس زمان تخمین
$_{meas}$	اندازه‌گیری شده
$_j$	اندیس مکان، اندیس تکرار
$_p$	اندیس پارامتر تخمین زده شده

فصل اول

مقدمه

۱ مقدمه

۱-۱ اهمیت موضوع

خنک کاری با استفاده از برخورد جت سیال در شکل‌ها و شرایط مختلف در پروسه‌های صنعتی استفاده می‌شود، زیرا که خواص انتقال حرارت و انتقال جرم مربوط به جریان برخورد جت بسیار مطلوب است. این نوع جریان جابجایی حرارت بسیار بیشتری را نسبت به حالتی فراهم می‌کند، که همان مقدار سیال موازی سطح هدف در جریان باشد. در میان کاربردهای اصلی برخورد جت سیال می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. خشک کردن محصولات پارچه، نگاتیوهای عکاسی و کاغذ
۲. خنک کاری لبه پره های توربین و قطعات الکترونیک
۳. یخ زدایی از بال های هواپیما
۴. آنیل کردن ورق های فلزات غیر آهنی و شیشه

برخورد جت مزایای هزینه پایین، قابلیت کنترل ساده و نرخ انتقال حرارت محلی بالا را دارد. قابلیت کنترل انتقال حرارت از سطح به کمک تغییر پارامترهای جریان مانند سرعت خروجی جت و دمای سیال و همچنین پارامترهای هندسی مانند شکل نازل جت و فاصله نازل تا سطح از عوامل اصلی استفاده گسترده از جت سیال برای انتقال حرارت می‌باشند.

هرچند که در سال‌های اخیر مکانیک سیالات محاسباتی پیشرفت‌های چشمگیری در مدل‌سازی جریان‌های مغشوش داشته است، اما نتایج همچنان در بسیاری از موارد – به خصوص مواردی که

شرایط مرزی جریان پیچیده می‌شود – راضی کننده نیست. بهمین سبب روش‌های تجربی هنوز مورد توجه بسیاری از پژوهشگران است. روش‌های متفاوتی در بررسی تجربی انتقال حرارت در جریان برخورد جت بکار گرفته می شوند که در آن میان می توان به روش‌های اپتیک، استفاده از کریستال مایع و استفاده از حسگرهای شار حرارتی اشاره کرد.

یکی از روش‌هایی که در دهه‌های اخیر پیشرفت کرده است، تکنیکی مبتنی بر استفاده از روش-های معکوس در هدایت حرارتی است. مهمترین خاصیت روش هدایت حرارتی معکوس[1] آن است که نتایج را در این روش با کمک اندازه‌گیری‌های ساده دما در محلی در درون جسم - بدون پیچیدگی حاضر در بسیاری از روش‌های دیگر - بدست می‌آورند. جزئیات مربوط به مطالعات گذشته در مورد برخورد جت سیال و همچنین پیشینه و دسته‌بندی روش‌های معکوس به ترتیب در فصل‌های ۲ و ۳ ارائه شده است. در این قسمت به بیان اهداف پایان نامه و معرفی بخش‌های مختلف آن می پردازیم.

۱-۲ اهداف پایان‌نامه

هدف در این پروژه تشریح و استفاده از یک روش هدایت حرارتی معکوس است که در بدست آوردن تجربی توزیع ضریب انتقال حرارت جابجایی در جریان برخورد جت بکار گرفته می‌شود. یک بخش اصلی از انجام هر آزمایشی طراحی آن آزمایش است. با کمک طراحی بهینه یک آزمایش تاثیر خطاها را حداقل و مناسب ترین شرایط را طرح ریزی می‌کنیم. در این پایان نامه با بکار گرفتن روش ارائه شده در یک سری آزمایشات شبیه سازی شده[2]، طراحی بهینه آزمایش حاصل می شود و همزمان کارایی روش ارائه شده در تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی مورد بررسی قرار می‌گیرد.

[1] IHCP: Inverse Heat Conduction Problem
[2] Simulated experiments

۱-۳ بخش‌های پایان‌نامه

پایان‌نامه در ادامه شامل چهار بخش است. در بخش بعدی به بررسی مسئله انتقال حرارت در برخورد جت سیال می‌پردازیم، طبقه‌بندی این نوع جریان، خواص آن و تعدادی از مطالعات تجربی انجام شده در این راستا را معرفی می‌کنیم. در این بخش به روش‌های افزایش این انتقال حرارت نیز بطور فهرست‌وار اشاره می‌شود. بعلاوه، شبیه‌سازی عددی جریان مورد نظر در این پروژه توسط نرم افزار فلوئنت بهمراه توضیح پارامترهای حل و شبکه استفاده شده ارائه می‌شود. هدف از این شبیه-سازی آشنایی با فیزیک حاکم بر جریان و خواص آن است.

در فصل ۳ روش‌های معکوس در انتقال حرارت معرفی می‌شوند و تاریخچه مطالعاتی و کاربردهای متنوع این روش‌ها به ویژه هدایت حرارتی معکوس بیان می‌شود. همچنین، دسته‌بندی این روش‌ها بر اساس پارامترهای مختلف از مباحث این بخش است. ضرایب حساسیت که در الگوریتم‌های معکوس نقشی کلیدی ایفا می‌کنند، تعریف و خواص آنها تشریح می‌شود. در پایان نیز روش *IHCP* استفاده شده در این پروژه – که روش تخمین تابع متوالی دوبعدی نام دارد - معرفی و بسط داده می‌شود.

بخش چهار به الگوریتم حل و ملاحظات مربوط به طراحی آزمایش می‌پردازد. در این بخش روش حل مستقیم که وجود آن برای استفاده از روش معکوس الزامی است، بیان می‌شود. همچنین معرفی روش انجام آزمایش و معیارهایی که در طراحی آزمایش استفاده می‌شوند (مانند ماتریس کلی ضریب حساسیت) بعلاوه معیارهای بررسی خطا در روش‌های معکوس (مانند بایاس و واریانس)، از اهداف این بخش خواهند بود.

در بخش آخر به نتایج حاصل از استفاده از روش معکوس در تخمین ضریب انتقال حرارت جابجایی و همچنین بیان طراحی بهینه آزمایش و بحث راجع به این نتایج می‌پردازیم. در ابتدا روش

در یک سری موارد آزمایشی[1] مورد بررسی و تایید قرار می‌گیرد، سپس نتایج کاربرد نهایی آن ارائه می‌شوند.

[1] Test-case