دانشکده مهندسی مکانیک

گروه مهندسی مکانیک

پایان نامه

برای دریافت درجه کارشناسی ارشد در رشته مهندسی مکانیک – تبدیل انرژی

عنوان:

مطالعه عددی کارایی جت های برخوردی جوششی غوطه ور برای کاربردهای خنک کاری

استاد راهنما

دکترسیما باهری اسلامی

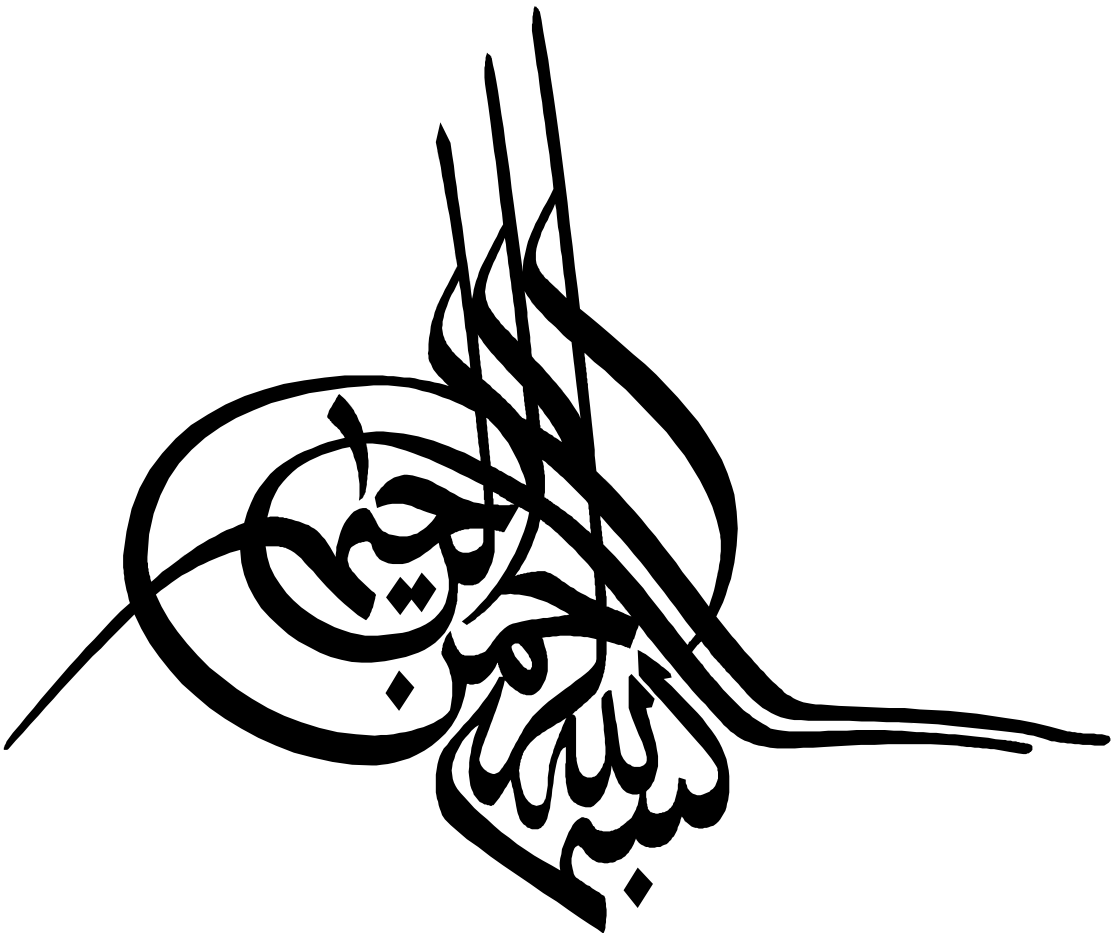
استاد مشاور

دکتر حبیب امین فر

پژوهشگر

سید سعید موسوی

بهمن ۹۳


بسم الله الرحمن الرحيم

نام خانوادگی دانشجو: موسوی **نام:** سید سعید

عنوان پایان‌نامه: مطالعه عددی کارایی جت های برخوردی جوششی غوطه ور برای کاربردهای خنک کاری

استاد راهنما: دکتر سیما باهری اسلامی

استاد مشاور: دکتر حبیب امین فر

مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد **رشته:** مهندسی مکانیک **گرایش:** تبدیل انرژی

دانشگاه: تبریز **دانشکده:** فنی مهندسی مکانیک

تاریخ فارغ‌التحصیلی: بهمن ۱۳۹۳ **تعداد صفحه:** ۹۱

کلیدواژه‌ها: جت برخوردی، جوشش، مطالعه عددی، بهبود انتقال گرما

چکیده:

در این پایان نامه جت های برخوردی جوششی غوطه ور از لحاظ انتقال گرما و الگوهای جریان به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است. با توجه به وجود شارهای گرمایی بسیار بالا در برخی قطعات الکترونیکی و محدودیت های مواد مورد استفاده در این قطعات، لزوم خنک کاری بهینه با استفاده از تکنولوژی جوشش در جت های برخوردی مطرح می شود. در این روش با قرار دادن جریان ورودی جت دروضعیت مایع فروسرد و ایجاد شرایط تغییر فاز (جوشش) روی سطح برخوردی، از طریق گرفتن گرمای نهان تبخیر، ضرایب انتقال گرمای بالایی را ایجاد می کند که در نتیجه باعث خنک تر شدن سطح برخوردی خواهد شد. در این تحقیق ابتدا یک جت سیال تنهای دایره ای به صورت غوطه ور در سیال شبیه سازی شده و نتایج با نتایج آزمایشگاهی موجود اعتبار سنجی شده است. سپس تأثیر کمیت‌های مختلف هندسی و جریان از قبیل نسبت فاصله جت با صفحه برخوردی به قطر جت ، دمای سیال ورودی ، سرعت ورودی جریان، و برخی کمیت‌های دیگر بر بهبود عملکرد جت مورد مطالعه قرار گرفته است. در ادامه آرایه ای از جت ها در چیدمان های مختلف انتخاب و تاثیر کمیت های مختلف از قبیل سرعت سیال، دمای سیال ورودی، نسبت فاصله جت ها از دیواره به قطر جت ها، نسبت فاصله جت ها از هم به قطر جت ها و همچنین نوع سطح مقطع جت ها در بهبود انتقال گرما از سطح در حالت آرایه ای مورد بررسی قرار گرفته است و در مواردی با رفتار جریان های تک فازی نیز مقایسه شده است. جریان، سه بعدی، پایا، تراکم ناپذیر، متلاطم و دو فازی می‌باشد و شبیه‌سازی‌ها به صورت عددی با استفاده از نرم افزار ANSYS-CFX انجام گرفته است. نتایج نشان می دهد، به ازای تغییر سرعت ورودی و نسبت فاصله جت از صفحه برخوردی به قطر جت چه در حالت تک جت و چه در حالت آرایه ای، تغییر چندانی در منحنی جوشش جت های برخوردی حاصل نمی شود. تنها کمیتی که تاثیر محسوسی بر روی منحنی جوشش دارد، کمیت میزان فروسردی ورودی سیال می باشد که با افزایش این کمیت روند بهبود انتقال گرما اتفاق می افتد.

تشکر و سپاس

به‌پاس لطف بیکران و رحمت لایزال پروردگار متعال در تمامی مراحل زندگی و تحصیل، خاضعانه جبهه شکربر آستان پر عطوفت و کبریایی‌اش می‌سایم و با زبانی قاصر ذات اقدسش را به خاطر تمامی نعمت‌های بی‌شمار و ناتمامش شکر می‌گزارم.

لازم می‌دانم که از راهنمایی‌ها و دقت نظر استاد گرانقدرم خانم دکتر سیما باهری اسلامی در این پایان‌نامه و تمامی اساتید عزیزم که در دانشکده مهندسی مکانیک زحمت تعلیم و تربیت را بر دوش داشته و در ایام تحصیل خوشه‌هایی از خرمن علم آنان چیدم، سپاسگزاری نمایم.

همچنین بر خود وظیفه می‌دانم که از همراهی و مشاوره جناب آقای دکتر حبیب امین فر برای به ثمر رسیدن این پایان‌نامه مراتب تشکر و قدردانی را بجا آورم.

تقدیم به:

خدایم که آفرید

جهان را، انسان را، عقل را، علم را، معرفت را، عشق را

و مادر مهربانم و پدر عزیزم

دو فرشته‌ای که خورشیدی شدند و از روشنایی‌شان جان گرفتم

و در ناامیدی‌ها نازم را کشیدند

و لبریزم کردند از شوق ...

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

مقدمه ۱

فصل اول : پیشینه پژوهش ۳

فصل دوم : مبانی و روش ها ۱۳

۲-۱ مقدمه ای بر رفتار جت های برخوردی ۱۴

۲-۲ جت برخوردی تک فازی ۱۶

۲-۳ جت دو فازی (جوشش در جت های برخوردی) ۱۸

۲-۴ مقدمه ای بر جریان های دو فازی ۲۲

۲-۵ مدل CFD رفتار سیال در جریان دوفازی جوشش فروسرد ۲۴

۲-۵-۱ معادلات حاکم ۲۴

۲-۵-۲ تبادل جرم بین دو فاز ۲۵

۲-۵-۳ تبادل مومنتوم بین دو فاز ۲۶

۲-۵-۴ تبادل انرژی بین دو فاز ۲۸

۲-۵-۵ مدل جوشش دیواره ۲۹

۲-۶ برنامه ریزی نرم افزاری ۳۲

۲-۶-۱ هندسه و شبکه مورد استفاده ۳۲

۲-۶-۲ شرایط مرزی و تنظیمات نرم افزاری ۳۳

فصل سوم : نتایج و بحث ۳۶

۳-۱ اعتبار سنجی ۳۷

۳-۲ استقلال از شبکه ۳۹

۳-۳ بررسی تاثیر کمیتهای مختلف بر منحنی جوشش تک جت ۴۰

۳-۳-۱ میزان سرعت جریان ورودی ۴۰

۳-۳-۲ میزان فروسردی جریان ورودی ۴۱

۳-۳-۳ نسبت فاصله جت از صفحه به قطر جت ۴۲

۳-۴ آرایه جت ها ۴۳

۳-۵ بررسی تاثیر کمیتهای مختلف بر رفتار گرمایی آرایه جت ها ۵۲

۳-۵-۱ میزان فروسردی جریان ورودی ۵۲

۳-۵-۲ میزان سرعت جریان ورودی ۵۸

۳-۵-۳ نسبت فاصله جت از دیواره به قطر جت ۶۲

۳-۵-۴ نسبت فاصله جت ها از هم به قطر جت ۶۶

۳-۵-۵ شکل سطح مقطع جت ۷۱

نتیجه گیری ۷۵
پیشنهادات ۷۶
مراجع ۷۷

فهرست علائم

α_q	درصد حجمی فاز q
$\vec{v}$	بردار سرعت
ρ	چگالی فاز
$\dot{m}_{pq}$	آهنگ تبادل جرم حجمی بین فاز p و q
t	زمان
∇p	گرادیان فشار
$\bar{\bar{\tau}}$	تانسور تنش
$\vec{g}$	بردار گرانش
F_{pq}	نیروهای مابین فاز p و q
Q_{pq}	تبادل انرژی بین دو فاز
h_{pq}	اختلاف آنتالپی بین دو فاز
$\dot{m}_w$	آهنگ تغییر جرم تبخیر دیواره
$\dot{m}_{ig}$	آهنگ تغییر جرم چگالش
h_{ls}	ضریب انتقال گرمای وجه مربوط به مایع
h_{vs}	ضریب انتقال گرمای وجه مربوط به بخار
$\vec{F}_D$	نیروی پسای وارد بر حباب
C_D	ضریب پسا
$\vec{F}_L$	نیروی برآی وارد بر حباب
C_L	ضریب برآ
$\vec{F}_{TD}$	میانگین نیروی پسای فیوور
μ_l^{eff}	لزجت دینامیکی کل
σ_t	عدد اشمیت توربولانس برای فاز مایع
C_{TD}	ضریب پراکندگی توربولانس
μ_l^b	لزجت آشفتگی حباب-واداشته
μ_l	لزجت مولکولی
μ_l^{turb}	لزجت حاصل از آشفتگی جریان
$\vec{F}_W$	نیروی روغنکاری دیواره
d_b	قطر متوسط حباب
$\vec{F}_{vm}$	نیروی جرم مجازی
λ_l	ضریب انتقال گرمای رسانشی مایع
q_w	شار گرمایی اعمالی به دیواره
q_c	سهم شار انتقال گرمای جا به جایی
q_Q	سهم شار انتقال گرمای کوئنچینگ
q_e	سهم شار انتقال گرمای تبخیر
h_c	ضریب انتقال گرمای جا به جایی
T_w	دمای دیواره
S_t	عدد استنتون
T_l	دمای مایع سلول نزدیک دیواره
u_l	سرعت مایع سلول نزدیک دیواره
u_w	سرعت اصطکاکی سیال روی دیواره
C_{pl}	ظرفیت گرمایی مایع
A_{bub}	سطح مقطع تماس حباب با دیواره
N_a	چگالی مکان های هسته زایی فعال
d_{bw}	قطر جدایش بخار از دیواره
ΔT_{sub}	اختلاف دمای سیال با دمای اشباع
f	فرکانس هسته زایی حباب
τ_Q	تناوب زمانی بین جدایش حباب ها
$A_{1\phi}$	سطح مقطع تماس مایع با سطح
T_{sat}	دمای حالت اشباع سیال
T_{in}	دمای ورودی جت
d	قطر جت
v	سرعت ورودی جت
ΔT_{sat}	اختلاف دمای فراگرم دیواره
x	فاصله از نقطه سکون
H	فاصله جت از دیواره
$\Delta T_{w,ave}$	اختلاف دمای میانگین دیواره
$T_{w,ave}$	دمای میانگین دیواره
h_{ave}	ضریب انتقال گرمای میانگین
s	فاصله جت ها از هم

فهرست شکل ها

عنوان **صفحه**

شکل ۲-۱ انواع جت های برخوردی ۱۴

شکل ۲-۲ الگوی جریان مربوط به (الف)جت سطح آزاد و (ب)جت غوطه ور ۱۵

شکل ۲-۳ نمونه ای از نتایج آزمایشگاهی رفتار عدد نوسلت بر حسب فاصله از نقطه سکون در جت های برخوردی تک فازی ۱۷

شکل ۲-۴ تاثیر رشد لایه مرزی بر رفتار عدد نوسلت در جت های برخوردی ۱۸

شکل ۲-۵ منحنی جوشش مربوط به جوشش جریانی موازی ۲۰

شکل ۲-۶ منحنی جوشش مربوط به جوشش جریانی جت برخوردی ۲۰

شکل ۲-۷ منحنی مربوط به جوشش هسته ای ۲۲

شکل ۲-۸ هندسه و شبکه مورد استفاده همراه با شرایط مرزی اعمالی ۳۳

شکل ۳-۱ کانتورهای حاصل از حل عددی جت تنها. الف)کانتور سرعت سیال مایع.ب)کانتور توزیع نسبت حجمی بخار ۳۸

شکل ۳-۲ مقایسه منحنی جوشش حاصل از حل عددی با نتایج تجربی در $\frac{x}{d}=2$ ، $v=2.05\mathrm{m/s}$ و $\Delta T_{sub}=18.5\mathrm{K}$ ۳۹

شکل ۳-۳ منحنی جوشش به ازای سرعت های ورودی مختلف در حالت تک جت ۴۰

شکل ۳-۴ منحنی جوشش به ازای تغییر میزان فروسردی جریان در حالت تک جت ۴۲

شکل ۳-۵ منحنی جوشش به ازای تغییر نسبت فاصله جت از سطح به قطر جت در حالت تک جت ۴۳

شکل ۳-۶ چیدمان های جت مورد بررسی ۴۴

شکل ۳-۷ مقایسه رفتار گرمایی آرایه جت های مختلف با یک جت تنها به ازای دبی جریان یکسان ۴۵

شکل ۳-۸ مقایسه رفتار گرمایی آرایه جت های مختلف با یک جت تنها به ازای عدد رینولدز یکسان. الف)نمودار منحنی جوشش. ب)نمودار میانگین ضریب انتقال گرما بر حسب شار اعمالی ۴۸

شکل ۳-۹ کانتورهای میزان دمای فراگرم دیواره و توزیع بخار نزدیک دیواره در حالت تک جت و آرایه‌ها به ازای شار گرمایی یکسان دیواره ۴۹

شکل ۳-۱۰ کانتورهای توزیع میدان سرعت و توزیع کسر حجمی بخار در حالت تک جت و آرایه ها به ازای شار گرمایی یکسان دیواره ۵۰

شکل ۳-۱۱ مقایسه توزیع دمای سطح و ضریب انتقال گرما در حالت تک جت و آرایه ای ۵۱

شکل ۳-۱۲ بررسی تاثیر میزان فروسردی جریان ورودی در حالت آرایه جت ها. الف)منحنی جوشش. ب) تغییرات ضریب انتقال گرما بر حسب شار ۵۴

شکل ۳-۱۳ کانتورهای میزان دمای فراگرم دیواره و توزیع بخار نزدیک دیواره برای شرایط میزان فروسردی متفاوت در حالت آرایه ای ۵۵

شکل ۳-۱۴ کانتورهای توزیع کسر حجمی بخار به ازای میزان فروسردی متفاوت در حالت آرایه ای ۵۶

شکل ۳-۱۵ نحوه توزیع ضریب انتقال گرمای روی سطح در خط مرکزی آرایه نوع یک به ازای میزان فروسردی متفاوت ورودی ۵۷

شکل ۳-۱۶ بررسی تاثیر سرعت جریان ورودی بر رفتار گرمایی آرایه جت ها. الف)منحنی جوشش .ب) تغییر ضریب انتقال گرما بر حسب شار ۵۹

شکل ۳-۱۷ توزیع میزان اختلاف دمای فراگرم دیواره و میزان بخار مجاور سطح به ازای سرعت های مختلف ورودی ۶۰

شکل ۳-۱۸ توزیع میدان سرعت سیال و کسر حجمی بخار به ازای سرعت های مختلف ورودی ۶۱
شکل ۳-۱۹ بررسی تاثیر نسبت فاصله جت ها از دیواره بر قطر جت ها در حالت آرایه جت ها. الف) منحنی جوشش. ب) ضریب انتقال گرما بر حسب شار اعمالی ۶۳
شکل ۳-۲۰ توزیع میزان اختلاف دمای فراگرم دیواره و میزان بخار مجاور سطح به ازای نسبت های مختلف فاصله جت از دیواره به قطر جت ۶۴
شکل ۳-۲۱ توزیع میدان سرعت سیال و کسر حجمی بخار به ازای نسبت های مختلف فاصله جت از دیواره به قطر جت ۶۵
شکل ۳-۲۲ بررسی تاثیر نسبت فاصله جت ها از هم به قطر جت ها. الف) منحنی جوشش. ب) تغییر ضریب انتقال گرما بر حسب شار اعمالی ۶۷
شکل ۳-۲۳ توزیع میزان اختلاف دمای فراگرم دیواره و میزان بخار مجاور سطح به ازای نسبت های مختلف فاصله جت ها از هم به قطر جت ۶۸
شکل ۳-۲۴ توزیع میدان سرعت سیال و کسر حجمی بخار به ازای نسبت های مختلف فاصله جت ها از هم به قطر جت ۶۹
شکل ۳-۲۵ نحوه توزیع ضریب انتقال گرمای روی سطح در خط مرکزی آرایه نوع یک به ازای نسبت های مختلف فاصله جت ها از هم به قطر جت. ۷۰
شکل ۳-۲۶ تاثیر کمیت نوع سطح مقطع جت بر رفتار گرمایی آرایه جت ها. الف) منحنی جوشش. ب) تغییرات ضریب انتقال گرما بر حسب شار اعمالی ۷۲
شکل ۳-۲۷ توزیع میزان اختلاف دمای فراگرم دیواره و میزان بخار مجاور سطح به ازای سطح مقطع های مختلف ورودی ۷۳
شکل ۳-۲۸ توزیع میدان سرعت سیال و کسر حجمی بخار به ازای سطح مقطع های مختلف ورودی ۷۴

فهرست جدول ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱ خواص ترموفیزیکی سیال R-113 در شرایط اشباع و فشار ۱ اتمسفر ۳۷
جدول ۳-۲ بررسی بحث مستقل بودن نتایج از شبکه برحسب اختلاف دمای فراگرم دیواره در x/d=2 ۴۰

مقدمه

یکی از مهم ترین و اساسی ترین نیاز صنایع مختلف استفاده از سیستم های متفاوت جهت خنک کاری قطعات و لوازمی که در معرض شارهای گرمایی قراردارند، می باشد. از جمله این سیستم ها می توان به خنک کننده های فن دار، مبادله کن‌های گرما و جت های برخوردی[1] اشاره کرد که بسته به نیاز و با توجه به کارایی هر کدام از این سیستم ها در صنایع مختلفی مورد استفاده قرار می گیرند.

از جمله متداول ترین این سیستم ها می توان جت های برخوردی را در نظر گرفت که علاوه بر بحث خنک کاری و انتقال گرما می توان جهت انتقال جرم نیز از این سیستم ها استفاده کرد.

در این سیستم روال خنک کاری به این صورت است که سیالی از طریق یک یا تعدادی نازل با سرعت و فشار مشخصی به صورت عمود یا تحت زاویه ای خاص به سطحی که نیاز به خنک کاری دارد پاشیده می شود که با توجه به الگوی جریان ایجاد شده روی سطح (که در فصل مبانی و روش ها به طور کامل توضیح داده شده است)، ضرایب بالایی از انتقال گرمای روی سطح ایجاد می شود.

از انواع کاربرد های این نوع روش در صنایع مختلف می توان به موارد زیر اشاره کرد: خنک کاری پره های توربین ،خشک کردن کاغذ و پارچه ، عملیات گرمایی فلزات و صفحات پلاستیکی، خنک کاری تجهیزات الکترونیکی و ... .

در کاربرد های با شارهای گرمایی بسیار بالا و یا شارهایی که در نقاط مجزا متمرکز شده اند، مخصوصا در قطعات پیشرفته الکترونیکی و با توجه به محدودیت های موادی که در این قطعات مورد استفاده قرار می گیرند، یکی از راههای افزایش انتقال گرما و کاهش دمای سطح مورد نظر ، در جت های برخوردی استفاده از پدیده جوشش می باشد. به این صورت که در این روش جت مایع تک فازی که در شرایط دمایی نزدیک به نقطه جوش قرار دارد ، در برخورد با سطح گرم دچار تغییر فاز شده و بدین طریق با گرفتن گرمای نهان تبخیر، ضرایب انتقال گرمای بالایی را ایجاد می کند.

جت های برخوردی در دو نوع سطح آزاد[2] و غوطه ور[3] بیشتر مورد استفاده قرار می گیرند. در جت های با سطح آزاد سیال جت وارد محیطی از یک سیال متفاوت (غالبا گازی شکل) می شود ولی جت غوطه ور به جتی اطلاق می شود که به محیطی از جنس همان سیال جت تخلیه می شود که طبیعتا الگوی جریان متفاوتی به موجب این دو نوع جت ایجاد می شود که در فصل مبانی و روش ها به آن ها پرداخته شده است.

در این تحقیق مشخصه های کلی جت های برخوردی جوششی غوطه ور از نظر انتقال گرما و الگوهای جریان به صورت عددی مورد مطالعه قرار گرفته است به طوری که ابتدا منحنی های جوشش مربوط به جت

---

[1] Impinging jet
[2] Free surface jet
[3] Submerged jet

های برخوردی غوطه ور در مراجع مختلف بررسی شده و رژیم جوشش مناسبی که تحت عنوان جوشش هسته ای یا جریان حباب دار مطرح است و قابل شبیه سازی با نرم افزار های تجاری موجود می باشد، انتخاب شده و با مدل سازی در نرم افزار ANSYS-CFX که توانایی بالایی در حل این نوع جریان ها خصوصا جوشش دارد، به صورت سه بعدی و متلاطم و با فرض تراکم ناپذیر بودن جریان شبیه سازی شده است. روش حل به این صورت است که ابتدا نتایج در چند مورد ساده با نتایج موجود مورد اعتبارسنجی قرار گرفته است. سپس تاثیر کمیت‌های مختلف هندسی و جریان بر انتقال گرما بررسی شده است. به ازای مقادیر مختلف این کمیت‌ها، نمودارهایی در قالب میزان فراگرم دیواره در نقاط مختلف سطح برحسب شارهای اعمالی ارائه شده که محدوده جواب های بهینه از این نمودارها کاملا مشخص است.

از جمله نو آوری های این تحقیق، که قبلا در کمتر مقاله‌ای به صورت عددی به آن پرداخته شده است، بحث استفاده از آرایه ای از جت های غوطه‌ور جوششی به جای یک جت تنها می باشد که با تغییر در نحوه آرایش آن ها می توان به یک حالت بهینه در انتقال گرما از سطح رسید.

فصل اول

پیشینه پژوهش

مطالعات زیادی تا به حال بر روی رفتار گرمایی جت های برخوردی جوششی به صورت تجربی، تحلیلی و گاها عددی صورت گرفته است . در اغلب این کارها جریان با سرعت و دمای مشخص از یک جت تنهای دایره ای به فاصله مشخصی از سطح داغ قرار دارد به صورت عمود برصفحه که دارای شرط مرزی شار گرمایی ثابت می باشد برخورد کرده و با توجه به بالا بودن مقدار این شار سیال پس از برخورد و رسیدن به شرایط جوشش دچار جوشش شده و بدین طریق انتقال گرما از سطح صورت می گیرد. فرآیند جوشش در این حالت دارای منحنی مشخصی می باشد که در قسمت مبانی تئوری به طور کامل در مورد آن بحث شده است. فقط همین نکته بس که در اکثر این کارها بیشتر تمرکز روی ناحیه ای تحت عنوان جوشش هسته ای از این منحنی می باشد که در واقع ناحیه مهمی در طراحی جت های برخوردی جوششی محسوب می شود چرا که بهینه ترین انتقال گرما از فرآیند جوشش در این ناحیه اتفاق می افتد. به طوری که تاثیر کمیتهای مختلف جریانی و هندسی در رفتار این قسمت از منحنی را مورد بررسی قرار داده اند.

از جمله ی این کمیتهای مهم که در اکثر این تحقیق ها مشاهده می شود بحث تغییر سرعت ورودی می‌باشد که گاهی اوقات به نتایج ضد و نقیضی هم رسیده اند. به عنوان نمونه در بسیاری از این تحقیق ها از جمله راچ وهلمن [۱]، موند و کاتو [۲] ، ما و برگلس [۳,۴]، لی و سیمون [۵]، موداوار و وادس ورس[۶] ، گرسی و موداوار[۷] ، ولف و همکاران [۸] و در بسیاری از کارهای مشابه دیگر به این نتیجه رسیده اند که قسمت جوشش هسته ای کاملا توسعه یافته منحنی جوشش مستقل از سرعت ورودی و حتی گاهی اوقات مستقل از رینولدز جریان ورودی می باشد ولی در مقابل کارهای معدودی هستند که نتایجشان اندکی متفاوت با کارهای قبلی است ، مثلا در کارهای ییلماز و وست واتر[۹]، ما و همکاران [۱۰]، و هوانگ و وایت [۱۱] به این نتیجه رسیده اند که این منحنی با افزایش سرعت اندکی به سمت چپ یعنی نواحی با دمای دیواره کمتر متمایل می شود، که در این حالت افزایش سرعت باعث بهبود انتقال گرما از سطح می شود.

مطالعاتی در مورد تاثیر میزان فروسردی سیال ورودی روی منحنی مورد نظر صورت گرفته است که در بسیاری از آن ها از قبیل : لی و سیمون [۵] ، گرسی و موداوار[۷]، نیشیکاوا و همکاران [۱۲]، دلوال و کنینگ [۱۳]، ما و برگلس[۴]، گریملی و همکاران [۱۴]، هوانگ و وایت [۱۱]، ناکایاما و بهینا[۱۵]، یو وهمکاران [۱۶]، ولف و همکاران [۸] و کارهای مشابه دیگر شاهد تغییر منحنی بر اثر تغییر فروسردی سیال بودند به طوری که با افزایش این کمیت منحنی به سمت فراگرم های دیواره کمتر متمایل می شد و بدین طریق افزایش انتقال گرما از سطح را به دنبال داشت. در عوض در کار موند وکاتو [۲]، که در محدوده ای از فروسردی صورت گرفته است، این نتیجه حاصل شده است که منحنی مستقل از مقدار فروسردی می باشد. حتی در نمونه ای در کار نون و همکاران [۱۷]، وابستگی منحنی به فروسردی را در محدوده متوسطی از فروسردی مثلا (۲۰-۳۰) درجه دانسته اند که بسته به مقدار شار گرمایی و دمای فراگرم دیواره تغییر می کند.

کمیت مهم دیگری که در برخی کارها و به صورت تجربی به آن پرداخته شده ، بحث شرایط و ویژگی های سطح برخوردی جت می باشد که کمیت بسیار تاثیر گذاری در فرآیند جوشش می باشد، چرا که این فرآیند مستلزم ایجاد شرایطی برای بهبود هسته زایی سیال می باشد و این کار با تغییر شرایط و مواد به کار رفته در سطوح برخوردی می تواند صورت بگیرد. تحقیقات انجام شده در این زمینه عبارتند از: یو و همکاران[۱۶] در مورد زبری سطح، لیانگ و یانگ[۱۸]در مورد نوع ماده سطح ، وانگ و دیر[۱۹] در مورد خیسی سطح مورد نظر ، جودی وجیمز[۲۰] در مورد تمیزی سطح , دیر[۲۱] در مورد سال خوردگی سطح.

مطالعاتی نیز در مورد سیال مورد استفاده جهت خنک کاری و تاثیرات به کارگیری یک سیال بسیار تر صورت گرفته است و بیشتر، تاخیری که به موجب به کارگیری این نوع سیالات در ایجاد فرآیند جوشش حاصل می شود مد نظر بوده است. این مطالعات شامل: یو وهمکاران [۱۶]، زو و ما [۲۲]،برگلس و هیو [۲۳]، مارتو و لیپر[۲۴] و بسیاری کار مشابه دیگر می باشند.

در ادامه نمونه ای از تحقیقاتی که در سال های اخیر چه به صورت تجربی وچه به صورت عددی در این زمینه صورت گرفته و گاها نتایجی مشابه با نتایج تحقیقات بالا بدست آورده اند، با توضیح بیشتری آورده شده است.

در سال ۲۰۰۱ زن-هوا لیو و جینگ وانگ[۲۵] یک مطالعه تجربی وتئوری بر روی انتقال گرمای جوشش فیلمی جت های برخوردی ناشی از دماهای بالای دیواره در منطقه سکون انجام داده اند. در مطالعه تئوری آن ها جهت محاسبه ضخامت لایه بخار ایجاد شده از معادلات ساده شده لایه مرزی جریان دو فازی استفاده کرده اند که به موجب آن ضریب انتقال گرمای جوشش فیلمی نیز قابل محاسبه می باشد. همچنین یک رابطه نیمه تجربی هم جهت پیش بینی این ضریب انتقال گرما ارائه داده اند.

در سال ۲۰۰۲ روبیده وهمکاران[۲۶] به صورت کنترل شده انتقال گرمای جوشش جت برخوردی حاصل از سیال آب را بررسی کردند. به این صورت که در حالت پایا و با کنترل دمای روی سطح منحنی جوشش را در رژیم های مختلف شناسایی کرده اند. دراین تحقیق با حل مسئله انتقال گرمای رسانش معکوس دو بعدی شار گرمایی موضعی و به موازات آن دمای سطح را در نقاط مختلف محاسبه کرده اند. همچنین تاثیر کمیتهای مختلف جریان از جمله میزان فروسردی و سرعت جریان و نسبت فاصله از دیواره به قطر نازل در دو حالت جت غوطه ور و سطح آزاد را بر انتقال گرما بررسی کرده اند.

زن-هوا لیو [۲۷] درسال ۲۰۰۳ با استفاده از یک روش تئوری – تحلیلی رابطه ای جهت پیش بینی کمترین شار گرمایی که به موجب آن منحنی جوشش از حالت جوشش گذرا به جوشش فیلمی انتقال می یابد، ارائه کرده اند. در این روش از معادلات ساده شده لایه مرزی جریان دوفازی استفاده شده که ابتدا شرایط جریان محدود شده بخار در حالت پایا به دست آورده شده اند و از آن طریق معادلات تئوری جهت

پیش بینی کمترین شار محاسبه شده اند. ضرایب موجود در این روابط هم از طریق داده های تجربی بدست آمده اند. همچنین یک رابطه نیمه تجربی نیز جهت محاسبه کمترین شار ارائه شده است.

تیم وهمکاران [۲۸] در سال ۲۰۰۳ به صورت تحلیلی رابطه ای برای پروفیل سرعت و دمای لایه مرزی توربولانسی ایجاد شده روی دیواره به موجب جوشش بدست آورده اند. این رابطه برای حالتی که شار گرمایی اعمالی از سطح مقدار بسیار بالایی در محدوده ۱۰ مگاوات بر متر مربع و حتی بالاتر باشد، صادق است که به موجب آن دمای ایجاد شده روی سطح تفاوت زیادی با دمای جوشش سیال خواهد داشت. در این حالت به دلیل تراکم بالای حباب ایجاد شده روی سطح عملا زیر لایه آرامی در نزدیکی دیواره وجود نخواهد داشت. با این توضیحات رابطه تحلیلی با فرض وجود حداکثر شدت توربولانسی در مرز نزدیک دیواره و اینکه ضریب پخش گردابه ها با فاصله گرفتن از دیواره کاهش می یابد ، با استفاده از روش تشابه ابعادی استخراج شده است.

در تحقیق سال ۲۰۰۴ زو و ما [۲۹] به صورت تجربی ویزگی های انتقال گرمای جت های برخوردی جوششی غوطه ور بررسی شده است. در این تحقیق از یک جت تنهای دایره ای در ابعاد میلیمتر به صورت غوطه‌ور در سیال مبرد R-113 که بر صفحه ای مربعی به ضلع ۵ میلیمتر بر خورد می کند استفاده شده است. در این تحقیق روش های مختلف انتقال گرمای جوششی از قبیل جا به جایی آزاد و جابه جایی از طریق جت برخوردی مورد بررسی قرار گرفته است، محدوده کاری این تحقیق قسمت مربوط به جوشش هسته ای شامل جوشش هسته ای جزئی و جوشش هسته ای کاملا توسعه یافته از منحنی جوشش می باشد. به طوری که تاثیر کمیت های مختلف از قبیل سرعت جت ورودی و میزان فروسردی سیال ورودی بر منحنی جوشش هسته ای به خصوص جوشش هسته ای کاملا توسعه یافته بررسی گردیده و در نهایت به این نتیجه رسیده اند که منحنی قسمت مربوط به شارهای گرمایی بالا یا همان جوشش هسته ای کاملا توسعه یافته مستقل از سرعت جریان ورودی می باشد ولی با تغییر میزان فروسردی یا فروسرد بودن سیال ورودی شاهد انتقال این قسمت از منحنی به سمت چپ یعنی قسمتی با دمای فراگرم دیواره کمتر بودند ، به طوری که به ازای فروسردی یکسان سیال ورودی، منحنی جوشش هسته ای کاملا توسعه یافته چه در حالت جوشش استخری و چه در وضعیت جوشش برخوردی یکسان می باشد. روابطی نیز برای منحنی جوشش هسته ای کاملا توسعه یافته که برحسب شار اعمالی نسبت به دمای فراگرم دیواره می باشد از روی داده های تجربی ارائه کرده اند و همچنین برای منحنی جوشش هسته ای جزئی توسعه یافته با استفاده از روش درون یابی رابطه ای بدست آمده است. همچنین در این مطالعه شاهد افزایش شار گرمای بحرانی سطح به موجب کاهش نسبت فاصله جت از صفحه برخوردی به قطر نازل بودند.

زو و ما [۳۰] در سال ۲۰۰۴ در مورد بحث پسماند[1] منحنی جوشش جت های برخوردی غوطه ور به موجب استفاده از سیالات به اصطلاح بسیار تر[2] همانند R-113 به عنوان سیال خنک کار ، مطالعه تجربی انجام داده اند. این نوع سیالات به دلیل ویژگی خاصی که دارند ، منحنی جوشش متفاوتی در دو حالت افزایش وکاهش شار گرمایی از خود نشان می دهند، به طوری که در سیالات معمولی چنین رفتاری اتفاق نمی افتد. این پدیده به این صورت است که در حالت افزایش شار به دلیل هسته زایی ضعیف و همچنین کم بودن کشش سطحی این نوع سیالات ، تاخیری در آغاز جوشش در سیال ایجاد می شود که همین مسئله باعث افزایش میزان فراگرم سطح و در نتیجه‌ی آن ضعف در آهنگ انتقال گرما در ناحیه قبل از جوشش می شود ، که بعد از آغاز جوشش یک کاهش ناگهانی در این میزان سوپر هیت در منحنی جوشش ایجاد می شود ، در حالی که چنین روندی در حالت کاهش شار اتفاق نمی افتد و منحنی رفتار ملایم تری دارد.

در این تحقیق اثرات کمیتهای مختلف از قبیل سرعت سیال ورودی ، قطر نازل ، فاصله از نقطه سکون روی سطح و همچنین میزان فروسردی سیال ورودی بر روند آغاز جوشش و میزان فراگرم سطح در آغاز جوشش بررسی شده است، و به این نتیجه رسیده اند که میزان این فراگرم مستقل از سرعت سیال و قطر نازل و فاصله از نقطه سکون می باشد وتنها با افزایش میزان فروسردی سیال ، نقطه آغاز جوشش جا به جا شده و به مکان با سوپر هیت های کمتر منتقل می شود.

اثر دو کمیت دیگر روی منحنی جوشش در نظر گرفته شده است که عبارتند از: یکی استفاده از مایع دارای گاز چگال ناپذیر نامحلول در سیال یا به اصطلاح مایع گازدار و دیگری بررسی میزان سال خوردگی سطح که به موجب آن سطح دچار زبری شده وهسته زایی جوشش در سیال را تقویت می کند. در هر دو حالت شاهد کاهش میزان فراگرم آغازین جوشش و در نتیجه افزایش آهنگ انتقال گرما از سطح بودند. دلیل افزایش آهنگ انتقال گرما به موجب استفاده از مایع گازدار را اینگونه توجیه کرده اند، که اولا این گاز نامحلول باعث کاهش دمای جوشش سیال و در نتیجه کاهش کشش سطحی آن و از طرف دیگر افزایش هسته زایی سیال را به دنبال دارد که در نهایت باعث کاهش فراگرم آغاز جوشش و افزایش آهنگ انتقال گرما می شود.

کیو و لیو[۳۱] در سال۲۰۰۵ به صورت تجربی تاثیر کمیتهای مختلف از قبیل سرعت جریان ورودی ، قطر نازل و میزان فروسردی سیال بر مقدار شار گرمای بحرانی را بررسی کرده اند.

[1] Boiling hysteresis
[2] Highly wetting liquids

در نهایت دو رابطه تجربی برای پیش بینی میزان این شار در نقطه سکون برای دو حالت جوشش فروسرد[1] و اشباع[2] ارائه شده است. در ضمن سیال مورد بررسی در این تحقیق مبرد R113 می باشد که از یک جت دایروی به صفحه با شار گرمایی بالا برخورد می کند.

نتایج تحقیق عبارتند از: هم سرعت ورودی و هم قطر نازل تاثیر زیادی در مقدار شار بحرانی دارند به طوری که با افزایش سرعت و کاهش قطر این شار افزایش می یابد. لازم به ذکر است که چه در حالت جوشش فروسرد و چه در حالت جوشش اشباع رابطه فوق مابین شار بحرانی و سرعت و قطر نازل برقرار است. مقدار شار بحرانی در حالت جوشش فروسرد به شدت تابع میزان فروسردی سیال ورودی می باشد و یک رابط خطی بین آن ها برقرار است و با افزایش میزان فروسردی سیال شار گرمای بحرانی افزایش می یابد.

در سال ۲۰۰۶ تیلری و همکاران [۳۲] موضوع جدیدی را در انتقال گرمای جوششی جت های برخوردی غوطه ور بررسی کردند. به این صورت که با ایجاد ارتعاش ناشی از دیافراگم پیزوالکتریک در نازل ورودی جت ، باعث پخش حباب های ایجاد شده بر روی صفحه در ناحیه جوشش هسته ای می شدند و با این کار در واقع سیال مایع بیشتری را در تماس با سطح قرار می دانند که در نتیجه انتقال گرمای جابه‌جایی در سطح افزایش می یافت و همین مسئله باعث به تاخیر افتادن و بالا رفتن شار گرمای بحرانی می شد.

در سال ۲۰۰۷ زن-هوا لیو و یو-هاو کیو[۳۳] بر روی مشخصه های انتقال گرمای جوششی نانوسیال(آب-اکسید مس) در جت های برخوردی به صورت تجربی مطالعه کرده اند و در نهایت نتایج را با نتایج حاصل از سیال پایه آب مقایسه کرده اند. در این تحقیق تاثیر میزان غلظت ذرات نانو و همچنین مشخصه های جریان بر روی انتقال گرمای جوشش هسته ای و همین طور شار گرمای بحرانی بررسی شده است. مشاهدات نشان دادند که انتقال گرمای جوشش هسته ای ناشی از این نانو سیال در مقایسه با سیال پایه ضعیف تر می باشد و دلیل این امر را ناشی از لایه جذب سطحی خیلی نازک ذرات نانو که در روی سطح ایجاد می شود، می دانند. مقدار شار بحرانی ایجاد شده در این حالت نسبت به حالت استفاده از سیال پایه بیشتر می باشد .دلایل این امر ناشی از ۱-کاهش زاویه تماس سیال-جامد به موجب لایه جذب سطحی خیلی نازک ذرات نانو در صفحه گرم و۲- به موجب آمیختگی که ذرات نانو در جریان مجاور سطح ایجاد می کنند باعث می شود که سیال مایع بیشتری در نزدیکی سطح قرار گیرد که این قضیه موجب افزایش انتقال گرمای جابه‌جایی و در نتیجه افزایش میزان شار گرمای بحرانی می شود.

نارومانچی و همکاران [۳۴] در سال۲۰۰۸ به صورت عددی و با حل معادلات حاکم بر جریان های دوفازی و با استفاده از یک مدل که مختص شبیه سازی جریان های جوشش فروسرد می باشد، رفتار

[1] Subcooled boiling
[2] Saturated boiling

جوشش هسته ای جت های برخوردی غوطه ور را با استفاده از نرم افزار فلوئنت[1] بررسی کرده اند. به این صورت است که نتایج مربوط به منحنی جوشش هسته ای در سه مورد با کار تجربی مورد مقایسه قرار گرفته است . در این تحقیق شرط شار گرمایی ثابت برای دیواره لحاظ شده و نتایج در قالب منحنی شار اعمالی بر حسب اختلاف دمای فراگرم نقطه سکون با هم مقایسه شده اند و با تقریب خوبی به هم نزدیکند.

در سال ۲۰۰۹ چانگ هوان شین و همکاران [۳۵] به بررسی تاثیر عدد رینولدز و فاصله جت از دیواره به صورت تجربی بر روی انتقال گرمای جوششی حاصل از جت های برخوردی غوطه ور محدود شده با استفاده از سیال دی الکتریک پرداختند. اعداد رینولدز انتخاب شده (۲۰۰۰و۳۰۰۰و۵۰۰۰) و فاصله جت از دیواره (۰/۵، ۱ و ۴)می باشند. نتایج حاصله عبارتند از: نقطه آغاز جوشش با افزایش عدد رینولدز و کاهش فاصله جت از دیواره افزایش می یابد. همچنین شار گرمای بحرانی در حالت فاصله جت از دیواره مساوی یک کمتر از دو حالت دیگر می باشد.

گرادک و همکاران[۳۶] در سال ۲۰۰۹ به بررسی منحنی های جوشش در دو حالت صفحه ثابت و متحرک به صورت تجربی پرداختند. این تحقیق در محدوده های مختلف میزان فروسردی ، سرعت جت و نسبت سرعت جریان به سرعت صفحه بررسی شده است. در نهایت به این نتیجه رسیده اند که در حالت صفحه ثابت یک شانه شاری در نقطه سکون مشاهده می شود و همچنین برای صفحه متحرک ماکزیمم شار گرمایی در طول فرآیند خنک کاری از رژیم جوشش فیلمی به رژیم جابه جایی واداشته انتقال می یابد.

در سال ۲۰۰۹ اومر و همکاران [۳۷] به ارائه یک مدل تحلیلی جهت پیش بینی آهنگ انتقال گرما در منطقه سکون جت های برخوردی جوششی پرداختند. این مدل بر اساس نظریه اختلاط واداشته از طریق حباب ها[2] که به موجب آن ضریب پخش سیال افزایش می یابد ، ارائه شده است، که این ضریب پخش اضافه شده در جمله پخش[3] معادلات بقا قرار می گیرد و مقدار این ضریب موثر به کمیتهایی همچون سرعت و دمای جت و دمای سطح وابسته است. قابلیت استفاده از این مدل در شرایط جوشش هسته ای جزئی توسعه یافته و کاملا توسعه یافته بررسی شده است و نتایج حاصل از این مدل با دقت قابل قبولی در مقایسه با نتایج تجربی قابل استفاده می باشد.

برائون و همکاران [۳۸] در سال ۲۰۱۰ به صورت تک فازی و دوفازی آرایه ای از جت های برخوردی غوطه ور در ابعاد میکرو را در نظر گرفته و منحنی جوشش در شرایط مختلف جریان را بررسی کردند. نتایج حاصله عبارتند از: افزایش سرعت ورودی موجب افزایش ضریب انتقال گرمای جابه‌جایی ، به تاخیر افتادن نقطه آغاز جوشش و در کل افزایش انتقال گرمای عبوری از سطح می باشد . افزایش میزان فروسردی سیال

[1] Fluent
[2] Bubble-induced mixing
[3] Diffusion term

باعث جابه جا شدن منحنی جوشش به سمت چپ و افزایش نقطه آغاز جوشش وهمچنین میزان شار بحرانی می شود.

در سال ۲۰۱۲ میترا و همکاران [۳۹] تاثیر دو نوع نانو سیال مختلف از قبیل آب-اکسید تیتانیوم[1] و آب –نانو تیوب های کربنی چند دیواره[2] را برانتقال گرمای جوششی جت های برخوردی در جریان آرام بررسی کردند.

همچنین آن ها به صورت تئوری با استفاده از روش حجم محدود، معادله انتقال گرمای معکوس تک بعدی را جهت پیش بینی آهنگ انتقال گرمای عبوری از سطح حل کرده اند.

نتایج نشان می دهند که در حالت استفاده از نانوسیال انتقال از رژیم جوشش فیلمی به جوشش گذرا زودتر از حالتی که فقط سیال پایه وجود داشته باشد، اتفاق می افتد. این قضیه را به این صورت توجیه کرده اند که به دلیل ته نشینی ذرات نانودر مجاورت دیواره، لایه بخار موجود در این ناحیه در جوشش فیلمی دچار ناپایداری شده و در نتیجه تغییر رژیم سریعتر را به دنبال خواهد داشت.

همچنین تغییرات اندکی نیز به موجب استفاده از نانو سیال در مقدار شار بحرانی مشاهده گردیده است. در نهایت با ارائه نموداری که دمای مرکز سطح را بر حسب زمان نشان می دهد متوجه می شویم که در صورت استفاده از این نانو سیال ها نسبت به سیال پایه در زمان کوتاهتری این دما روند کاهشی پیدا می کند و این نشان از بهبود انتقال گرما در این وضعیت می باشد.

کاردناس و همکاران[۴۰] در سال ۲۰۱۲ ، ویژگی های انتقال گرمای جوششی غوطه ور برای سیال آب در فشار های پایین تر از فشار اتمسفر را به صورت تجربی بررسی کرده اند و تاثیر کمیتهایی همچون عدد رینولدز ، زبری سطح و میزان فروسردی در این فشارها را بر منحنی جوشش در نظر گرفته اند. شاهد نتایج زیر بودند: منحنی جوشش هسته ای جزئی توسعه یافته نسبت به عدد رینولدز تغییر محسوسی دارد، در حالتی که در منحنی مربوط به جوشش هسته ای کاملا توسعه یافته میزان این تغییر بسیار ناچیز می باشد. افزایش میزان فروسردی باعث انتقال منحنی جوشش هسته ای کاملا توسعه یافته به سمت چپ و در نتیجه بهبود انتقال گرما می شود و میزان شار بحرانی با افزایش فشار ، زبری سطح و عدد رینولدز افزایش می یابد.

در سال ۲۰۱۲ توسط آبیشک و همکاران [۴۱] یک مطالعه عددی جهت پیش بینی رفتار انتقال گرمای جوشش هسته ای جت های برخوردی با استفاده از نرم افزار فلوئنت ارائه شده است. هندسه مورد استفاده در این مطالعه به صورت دو بعدی و تقارن محوری می باشد. سیال کاری مورد استفاده آب بدون گاز و دیونیزه شده که در فشار اتمسفر قرار دارد، می باشد. شرط دمای ثابت در دیواره لحاظ شده ، رینولدز جریان ورودی

[1] Water-Tio_2
[2] Water-MWCNT