

## چکیده

در این مطالعه روش خنک‌سازی فیلمی به صورت تک فاز و دو فاز مورد بررسی قرار گرفته است. روش خنک‌سازی فیلمی روشی جهت افزایش بازده سیکل‌های توربین گازی می‌باشد که با خنک‌کاری خارجی سطوح توربین گازی، افزایش دمای ورودی را امکان پذیر می‌سازد. در این بررسی با استفاده از تحلیل عددی، روش خنک‌سازی فیلمی بر روی دو نوع هندسه‌ی صفحه (تخت و محدب) مورد بررسی قرار گرفته است. تاثیر پارامترهایی از قبیل هندسه‌ی لوله‌ی تزریق، زاویه‌ی تزریق مرکب و نرخ دمش بر توزیع کارایی خنک‌سازی فیلمی ارائه شده است. در قسمت بررسی‌های دو فاز، اثر قطر قطرات تزریق شده و درصد تزریق قطرات مورد مطالعه قرار گرفته است. بررسی تزریق دوفاز بر روی صفحه‌ی محدب، در شرایط واقعی کارکرد توربین گازی (دمای بالا و فشار بالا) انجام شده است. معادلات سرعت، دما، آشفستگی، اجزا و معادلات مربوط به فاز گسسته حل شده‌اند. برای گسسته‌سازی معادلات فوق از تقریب مرتبه‌ی دوم استفاده شده است. برای کوپلینگ سرعت و فشار از الگوریتم سیمپل استفاده شده است. از مدل لاگرانژی برای پیش‌بینی مسیر ذرات استفاده شده است و برهم‌کنش میان فاز پیوسته و گسسته نیز ملاحظه شده است. مدل آشفستگی  $k-\omega$  استاندارد برای پیش‌بینی رفتار آشفته‌ی جریان به کار گرفته شده است. نتایج به عددی به دست آمده با نتایج آزمایشگاهی موجود مورد مقایسه قرار گرفته است و تطبیق قابل قبولی بین آنها وجود دارد. روش خنک‌سازی فیلمی، روشی مطلوب در جهت افزایش بازده سیکل توربین گازی خواهد بود. موثرترین روش در جهت افزایش کارایی خنک‌سازی فیلمی، استفاده از لوله‌های تزریق با زاویه‌ی مرکب می‌باشد. هر چه هندسه‌ی لوله از حالت استوانه‌ای به سمت لوله‌های شکل داده شده نزدیک‌تر شود، کارایی خنک‌سازی فیلمی افزایش بیشتری می‌یابد. روش تزریق مرطوب توانایی خود را در افزایش کارایی خنک‌سازی فیلمی در پایین دست جریان نشان می‌دهد.

**کلمات کلیدی:** خنک‌سازی فیلمی، تزریق مرطوب، زاویه‌ی مرکب، صفحه‌ی تخت، صفحه‌ی محدب

## فهرست مطالب

ا	چکیده
ب	فهرست مطالب
ه	فهرست اشکال، جداول و نمودارها
ح	فهرست علائم و اختصارات
1	فصل اول: مقدمه
2	1-1- مقدمه
3	2-1- خنک کاری دیوارهٔ محفظهٔ احتراق
4	1-2-1- خنک کاری لایه‌ای
5	2-2-1- خنک کاری نفوذی
5	3-2-1- روش‌های خنک کاری مدرن
6	3-1- خنک کاری پره‌های توربین و پره‌های راهنما
10	4-1- معرفی پارامترهای بی بعد
11	5-1- ساختار سیال خنک‌کن پس از تزریق
12	6-1- رویکردهای مختلف در بررسی خنک‌سازی فیلمی
12	7-1- تزریق مرطوب
14	فصل دوم: مروری بر تحقیقات انجام شده
15	1-2- مروری بر تحقیقات گذشته
23	2-2- بررسی‌های انجام شده در این پایان‌نامه
24	فصل سوم: معادلات حاکم
25	1-3- مقدمه
25	2-3- معادلات بقاء
26	3-3- معادلات آشفستگی
28	4-3- معادلات مربوط به فاز گسسته
29	1-4-3- معادلات حرکت ذرات
29	2-4-3- قانون محاسبه ضریب پسا
31	3-4-3- نیروهای دیگر
31	1-3-4-3- نیروی ترموفورتیک
31	2-3-4-3- نیروی برای سافمن
32	4-4-3- ردیابی تصادفی ذره در جریان آشفته

32	3-4-5- پخش ذرات در جریان آشفته
32	3-4-5-1- ردیابی تصادفی
33	3-4-5-2- زمان انتگرالی
34	3-4-5-3- مدل DRW
35	3-4-6- معادلات انتقال حرارت برای قطره
36	3-4-6-1- تبخیر
36	3-4-6-2- معادله انتقال جرم برای قطره
37	3-4-6-3- فشار بخار و ضریب پخش
38	3-4-6-4- معادله کلی انتقال حرارت قطره
38	3-4-6-5- جوشش قطرات
39	3-4-7- کوپل بودن معادلات فازهای گسسته و پیوسته
39	3-4-7-1- تبادل ممنتوم
40	3-4-7-2- تبادل حرارت
40	3-4-7-3- تبادل جرم
41	3-5-5- مدل عددی به کار رفته در این پایان نامه
42	فصل چهارم: ارائه‌ی نتایج بر روی صفحه‌ی تخت
43	4-1- هندسه و شبکه‌ی مورد بررسی
44	4-2- شرایط مرزی
45	4-3- اعتبار سنجی نتایج
47	4-4- بررسی کارآیی خنک‌سازی فیلمی بر روی خط مرکزی
49	4-4- بررسی شرط مرزی دیواره و تقارن روی دیواره‌های جانبی
52	4-5- تاثیر زاویه‌ی مرکب
58	4-6- تزریق مرطوب
59	4-6-1- اثر قطر قطرات
59	4-6-2- تاثیر درصد تزریق
64	فصل پنجم: ارائه‌ی نتایج بر روی صفحه‌ی محدب
65	5-1- مقدمه
66	5-2- هندسه و شبکه‌ی حل
68	5-3- شرایط مرزی
68	5-4- اعتبار سنجی نتایج
69	5-5- تاثیر هندسه‌ی لوله‌های تزریق

74	6-5- تزریق مرطوب
74	5-6-1- تاثیر قطر قطرات تزریق شده
77	5-6-2- تاثیر درصد تزریق
80	5-7- تاثیر نرخ دمش
83	فصل ششم: نتیجه گیری و ارائه پیشنهادات برای آیندهی
84	6-1- نتیجه گیری
85	6-2- ارائه پیشنهادات
86	فصل هفتم: منابع

## فهرست اشکال، جداول و نمودارها

- شکل 1-1) افزایش دمای سیال ورودی به توربین گازی در طول سال‌های گذشته 2
- شکل 1-2) روش‌های مختلف خنک‌کاری پره‌ی توربین 7
- شکل 1-3) تصویر ساده‌ای از تشکیل فیلم سیال روی سطح 8
- شکل 1-4) نمایی از سوراخ‌های تزریق در خنک‌سازی فیلمی سکو و خنک‌سازی فیلمی ایرفویل 9
- شکل 1-5) تشکیل جفت گردابه بر اثر تزریق سیال خنک‌کن در جریان اصلی 11
- شکل 1-3) اندرکنش فاز پیوسته و گسسته داخل یک حجم کنترل 39
- شکل 1-4) نمایی کلی از هندسه‌ی به کار گرفته شده 43
- شکل 2-4) آرایش لوله‌های تزریق سیال خنک‌کن 44
- شکل 3-4) کارایی خنک‌سازی فیلمی را روی خط مرکزی صفحه‌ی خنک شونده،  $M=1$  45
- شکل 4-4) کارایی خنک‌سازی فیلمی را روی خط مرکزی صفحه‌ی خنک شونده،  $M=1.33$  46
- شکل 4-5) کارایی خنک‌سازی فیلمی را روی خط مرکزی صفحه‌ی خنک شونده،  $M=1.67$  46
- شکل 4-6) کارایی خنک‌سازی فیلمی بر روی صفحه‌ی گذرنده از مرکز هندسه‌ی محاسباتی 47
- شکل 4-7) کارایی خنک‌سازی فیلمی بر روی خط گذرنده از مرکز صفحه‌ی خنک شونده برای پنج مقدار مختلف نرخ دمش 48
- شکل 4-8) کارایی خنک‌سازی فیلمی رو خطوط  $Z_1$ ،  $Z_2$  و  $Z_3$ ،  $M=0.5$  50
- شکل 4-9) کارایی خنک‌سازی فیلمی در راستای عرضی روی خط  $X_1$ ،  $M=0.5$  51
- شکل 4-10) کارایی خنک‌سازی فیلمی در راستای عرضی روی خط  $X_2$ ،  $M=0.5$  51
- شکل 4-11) جهت‌گیری لوله‌های تزریق با زاویه‌ی مرکب 52
- شکل 4-12) توزیع کارایی خنک‌سازی فیلمی بر روی سطح خنک شونده در حالت تزریق با لوله‌های با زاویه‌ی مرکب  $0^\circ$  و  $60^\circ$ ،  $M=0.5$  54
- شکل 4-13) توزیع کارایی خنک‌سازی فیلمی بر روی سطح خنک شونده در حالت تزریق با لوله‌های با زاویه‌ی مرکب  $0^\circ$  و  $60^\circ$ ،  $M=0.67$  54
- شکل 4-14) توزیع کارایی خنک‌سازی فیلمی بر روی سطح خنک شونده در حالت تزریق با لوله‌های با زاویه‌ی مرکب  $0^\circ$  و  $60^\circ$ ،  $M=1$  55
- شکل 4-15) توزیع کارایی خنک‌سازی فیلمی بر روی سطح خنک شونده در حالت تزریق با لوله‌های با زاویه‌ی مرکب  $0^\circ$  و  $60^\circ$ ،  $M=1.33$  55
- شکل 4-16) توزیع کارایی خنک‌سازی فیلمی بر روی سطح خنک شونده در حالت تزریق با لوله‌های با زاویه‌ی مرکب  $0^\circ$  و  $60^\circ$ ،  $M=1.67$  56

- شکل 4-17) مقدار متوسط‌گیری شده‌ی عرضی کارآیی خنک‌سازی فیلمی بر روی سطح خنک شونده، در حالت تزریق با لوله‌های با زاویه‌ی مرکب  $0^\circ$  و  $60^\circ$ ،  $M=0.67$  57
- شکل 4-18) مقدار متوسط‌گیری شده‌ی عرضی کارآیی خنک‌سازی فیلمی بر روی سطح خنک شونده، در حالت تزریق با لوله‌های با زاویه‌ی مرکب  $0^\circ$  و  $60^\circ$ ،  $M=1$  57
- شکل 4-19) مقدار متوسط‌گیری شده‌ی عرضی کارآیی خنک‌سازی فیلمی بر روی سطح خنک شونده، در حالت تزریق با لوله‌های با زاویه‌ی مرکب  $0^\circ$  و  $60^\circ$ ،  $M=1.33$  58
- شکل 4-20) کارآیی خنک‌سازی فیلمی در حالت تزریق خشک و مرطوب (درصد تزریق 2% با قطراتی به قطرهای  $2\mu\text{m}$  و  $5\mu\text{m}$ )،  $M=1$  60
- شکل 4-21) کارآیی خنک‌سازی فیلمی در حالت تزریق خشک و مرطوب (درصد تزریق 5% با قطراتی به قطرهای  $2\mu\text{m}$  و  $5\mu\text{m}$ )،  $M=1$  61
- شکل 4-22) کارآیی خنک‌سازی فیلمی در حالت تزریق خشک و مرطوب (درصدهای تزریق 2% و 5% با قطراتی به قطر  $2\mu\text{m}$ )،  $M=1$  62
- شکل 4-23) کارآیی خنک‌سازی فیلمی در حالت تزریق خشک و مرطوب (درصدهای تزریق 2% و 5% با قطراتی به قطر  $5\mu\text{m}$ )،  $M=1$  63
- جدول 5-1) روابط وابسته به دما برای محاسبه‌ی خواص 65
- شکل 5-1) نمای جانبی هندسه‌ی مورد بررسی 67
- شکل 5-2) هندسه و ابعاد هر دو نوع لوله‌ی تزریق 67
- شکل 5-3) مقدار متوسط‌گیری شده‌ی عرضی کارآیی خنک‌سازی فیلمی بر روی سطح خنک شونده در حالت دما پایین و فشار پایین برای لوله‌ی تزریق استوانه‌ای و نتایج آزمایشگاهی به دست آمده توسط شوارتز و همکاران [44] 69
- شکل 5-4) بردارهای سرعت در مقاطع عرضی مجرای اصلی در فاصله‌های  $X/D=1$  و  $X/D=5$  برای حالت تزریق با لوله‌ی استوانه‌ای (حالت A) و حالت تزریق با لوله‌ی شکل داده شده (حالت B)، تزریق خشک در دما و فشار پایین،  $M=1$  70
- شکل 5-5) مقدار متوسط‌گیری شده‌ی عرضی کارآیی خنک‌سازی فیلمی در حالت تزریق خشک در شرایط دما و فشار پایین، برای لوله‌ی تزریق استوانه‌ای و شکل داده شده،  $M=0.34$  71
- شکل 5-6) مقدار متوسط‌گیری شده‌ی عرضی کارآیی خنک‌سازی فیلمی در حالت تزریق خشک در شرایط دما و فشار پایین، برای لوله‌ی تزریق استوانه‌ای و شکل داده شده،  $M=0.5$  72
- شکل 5-7) مقدار متوسط‌گیری شده‌ی عرضی کارآیی خنک‌سازی فیلمی در حالت تزریق خشک در شرایط دما و فشار پایین، برای لوله‌ی تزریق استوانه‌ای و شکل داده شده،  $M=1$  72
- شکل 5-8) مقدار متوسط‌گیری شده‌ی عرضی کارآیی خنک‌سازی فیلمی در حالت تزریق خشک در شرایط دما و فشار پایین، برای لوله‌ی تزریق استوانه‌ای و شکل داده شده،  $M=1.37$  73

- شکل 5-9) مقدار متوسط‌گیری شده‌ی عرضی کارآیی خنک‌سازی فیلمی در حالت تزریق خشک در شرایط دما و فشار پایین، برای لوله‌ی تزریق استوانه‌ای و شکل داده شده،  $M=2$  73
- شکل 5-10) کارآیی خنک‌سازی فیلمی به صورت متوسط‌گیری شده‌ی عرضی در شرایط فشار و دمای بالا و تزریق از لوله‌ی استوانه‌ای، در حالت تزریق خشک و مرطوب (درصد تزریق 2%، قطرات با قطرهای 20  $\mu\text{m}$  و 10، 5)،  $M=1$  75
- شکل 5-11) کارآیی خنک‌سازی فیلمی به صورت متوسط‌گیری شده‌ی عرضی در شرایط فشار و دمای بالا و تزریق از لوله‌ی شکل داده شده، در حالت تزریق خشک و مرطوب (درصد تزریق 2%، قطرات با قطرهای 20  $\mu\text{m}$  و 10، 5)،  $M=1$  76
- شکل 5-12) کارآیی خنک‌سازی فیلمی به صورت متوسط‌گیری شده‌ی عرضی در شرایط فشار و دمای بالا و تزریق از لوله‌ی استوانه‌ای، در حالت تزریق خشک و مرطوب (درصد تزریق 2% و 5% برای قطرات با قطر 10  $\mu\text{m}$ )،  $M=1$  78
- شکل 5-13) کارآیی خنک‌سازی فیلمی به صورت متوسط‌گیری شده‌ی عرضی در شرایط فشار و دمای بالا و تزریق از لوله‌ی شکل داده شده، در حالت تزریق خشک و مرطوب (درصد تزریق 2% و 5% برای قطرات با قطر 10  $\mu\text{m}$ )،  $M=1$  79
- شکل 5-14) کارآیی خنک‌سازی فیلمی به صورت متوسط‌گیری شده‌ی عرضی در مقادیر مختلف نرخ دمش در حالت تزریق خشک از لوله‌ی استوانه‌ای 81
- شکل 5-15) کارآیی خنک‌سازی فیلمی به صورت متوسط‌گیری شده‌ی عرضی در مقادیر مختلف نرخ دمش در حالت تزریق خشک از لوله شکل داده شده 81
- شکل 5-16) کارآیی خنک‌سازی فیلمی به صورت متوسط‌گیری شده‌ی عرضی در مقادیر مختلف نرخ دمش، در حالت تزریق مرطوب (درصد تزریق 2% برای قطرات با قطر 10  $\mu\text{m}$ ) از لوله‌ی استوانه‌ای 82
- شکل 5-17) کارآیی خنک‌سازی فیلمی به صورت متوسط‌گیری شده‌ی عرضی در مقادیر مختلف نرخ دمش، در حالت تزریق مرطوب (درصد تزریق 2% برای قطرات با قطر 10  $\mu\text{m}$ ) از لوله‌ی شکل داده شده 82

فهرست علائم و اختصارات

علامت	واحد	توضیح
C	$\text{kg}/\text{m}^3$	غلظت
$C_c$	-	ضریب تصحیح کانینگهام
$C_D$	-	ضریب پسا
$c_p$	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$	ظرفیت گرمایی ویژه
D	$\text{m}^2/\text{s}$	ضریب نفوذ جرم
D	m	قطر لوله‌ی تزریق
d	m	قطر قطره
F	N	نیرو
$f_{v,0}$	-	جزء فرار قطره
g	$\text{m}/\text{s}^2$	شتاب جاذبه
h	$\text{W}/\text{m}^2\cdot\text{K}$	ضریب انتقال حرارت جابه‌جایی
$h_{fg}$	$\text{J}/\text{kg}$	گرمای نهان
Kn	-	عدد نادسن
k	$\text{m}^2/\text{s}^2$	انرژی جنبشی آشفتگی
$k_c$	$\text{m}/\text{s}$	ضریب انتقال جرم
M	-	نرخ دمش $\frac{\rho_c u_c}{\rho_m u_m}$
m	kg	جرم



Nu	-	$hd/k$	عدد ناسلت
P	pa		فشار
Pr	-		عدد پرائنتل
Re	-	$\rho UI/\mu$	عدد رینولدز
S	$m^2$		مساحت
Sc	-		عدد اشمیت
Sh	-	$k_c d/D$	عدد شروود
t	s		زمان
T	K		دما
$T_L$	s		زمان انتگرالی لاگرانژی
U	m/s		سرعت
X	m		فاصله از لوله‌ی تزریق
$\eta$	-		کارایی خنک‌سازی فیلمی
$\mu$	$kg/m.s$		لزجت
$\rho$	$kg/m^3$		چگالی
$\lambda$	$W/m.K$		ضریب هدایت حرارتی
$\omega$	$1/s$		نرخ اضمحلال ویژه

پایین نویس ها

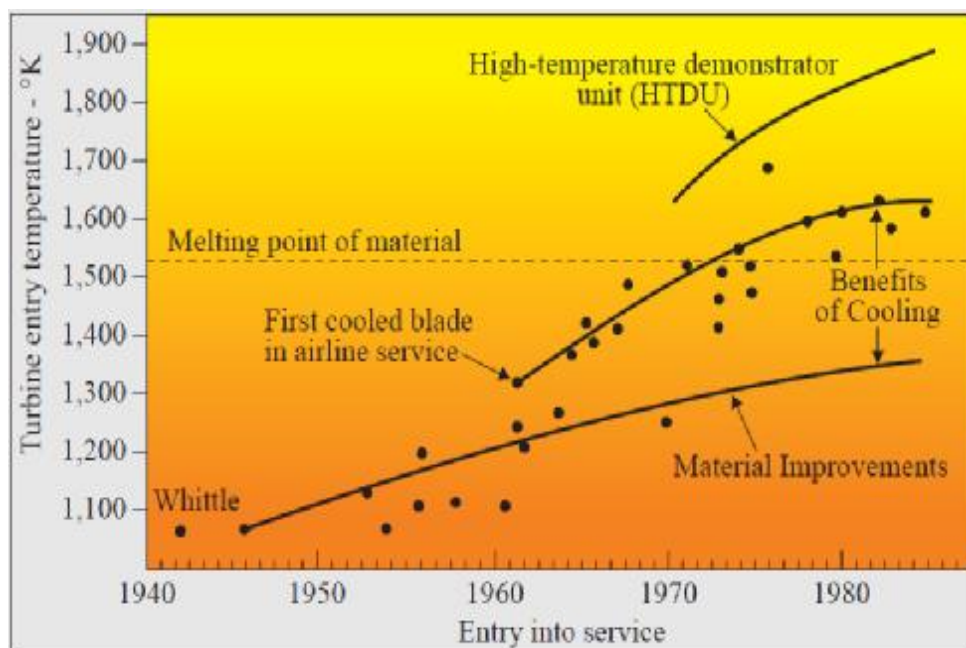
c	سیال خنک کن
eff	موثر
M	جریان اصلی
op	شرایط کارکرد
p	ذره
ref	مرجع
t	آشفتگی
vap	تبخیر
W	دیوار

# مقدمه

## 1-1- مقدمه

در طول پنجاه سال گذشته، طراحان هواپیماها و سیکل‌های توربین گازی در تلاش بوده‌اند تا بتوانند دمای سیال ورودی به توربین گازی را افزایش دهند. دلیل این امر آن است که با انجام این کار بازده سیکل افزایش یافته و مصرف سوخت کم می‌شود. به طور مشابه در هواپیماها این افزایش دما منجر به افزایش نیروی پیشران می‌شود [1].

در شکل 1-1 افزایش دمای سیال ورودی به توربین‌های گازی در طول سال‌های گذشته نشان داده شده است. همانطور که دیده می‌شود به مرور زمان این دما از دمای ذوب فلز سازنده نیز بیشتر شده است. با توجه به این موضوع لازم است یک سری روش‌های خنک کاری برای تمامی اجزای تشکیل دهنده‌ی سیکل توربین گازی که در معرض دماهای بالا هستند در نظر گرفته شود تا دمای سطح اجزای داخلی به هنگام کارکرد به دمای ذوب فلز سازنده نزدیک نشود.



شکل 1-1) افزایش دمای سیال ورودی به توربین گازی در طول سال‌های گذشته [1]

برای دستیابی به این مهم محققین روشهای متعددی را مورد بررسی قرار داده‌اند.

این روش‌ها عبارتند از:

• روش‌های خنک‌کاری دیواره‌های محفظه‌ی احتراق

•  $\dot{U}$  خنک‌کاری لایه‌ای

•  $\dot{U}$  خنک‌کاری نفوذی<sup>1</sup>

• روش‌های خنک‌کاری تیغه و پره‌های توربین

•  $\dot{U}$  خنک‌کاری داخلی

•  $\dot{U}$  خنک‌کاری خارجی

## 1-2- خنک‌کاری دیواره‌ی محفظه‌ی احتراق

برای بهبود بازده حرارتی سیکل توربین گازی، باید دمای گاز در خروجی محفظه‌ی احتراق بسیار بالا باشد. اما این شرایط مستلزم آن است که دیواره‌های محفظه‌ی احتراق، پره‌های راهنما و تیغه‌ی توربین در معرض گاز با دمای بسیار بالا قرار گیرند و در این صورت مشکلات متعددی برای مواد به کار رفته به وجود خواهد آمد. بنابراین دیواره‌های محفظه‌ی احتراق و پره‌ها باید تا حد مناسبی خنک‌کاری شوند تا توانایی مقاومت در برابر دمای بالا را داشته باشند.

اخیراً آلودگی‌هایی مانند  $\text{NO}_x$  به شدت مورد توجه قرار گرفته‌اند و نیاز به کاهش  $\text{NO}$  و  $\text{NO}_2$  یکی از اهداف اصلی طراحی‌ها شده است. تشکیل اکسیدهای نیتروژن بستگی به دما، نسبت هوا به سوخت در طول احتراق، فشار، مدت زمان قرار داشتن در حداکثر دما و مقدار نیتروژن در سوخت دارد. اگر نواحی خنک در شعله وجود داشته باشد، خروج هیدروکربن‌های نسوخته، ممکن است افزایش یابد. بنابراین هر مقدار که روش‌های خنک‌کاری دیواره بیشتر توسعه می‌یابند، باید دمای تشکیل آلاینده‌های

---

<sup>1</sup> Transpiration Cooling

مختلف نیز در نظر گرفته شود. علاوه بر این، مسأله مهم دیگر این است که محدودیت افت فشار مجاز در طول پروسه خنک‌کاری نیز مدنظر قرار گیرد.

### 1-2-1- خنک‌کاری لایه‌ای

این روش خنک‌کاری به طور گسترده‌ای در طی سال‌های متمادی در سیستم‌های توربین گاز به کار رفته است. این روش به نسبت روش‌های دیگر به مقدار زیادی هوای خنک کننده نیاز دارد. در این روش جریان هوای خنک کننده از بین سوراخ‌های دیواره محفظه احتراق به سمت گازهای داغ جریان می‌یابد. در طول دیواره، یک ناحیه از مخلوط سیال‌های داغ و سرد به شکل یک فیلم به وجود می‌آید که در واقع دیواره را از جریان گازهای داغ محافظت می‌کند. یکی از معایب روش خنک‌کاری لایه‌ای این است که فیلم تشکیل شده، در پایین دست جریان ضخیم شده و گاز سرد اولیه به تدریج گرم می‌شود.

برای بهبود عملکرد خنک‌کاری فیلم (که معمولاً به صورت ضریب اثربخشی خنک‌کاری لایه‌ای بیان می‌شود)، جت‌های برخوردی را به صورت عمود، از دیواره محفظه احتراق وارد آن می‌کنند. هوای خنک کننده به چندین جت تقسیم می‌شود و در این صورت دیواره محفظه احتراق به صورت دو جداره طراحی می‌گردد.

به طور کلی، تخمین‌ها نشان می‌دهند که با استفاده از روش خنک‌کاری لایه‌ای و به منظور جلوگیری از ایجاد دمایی در حدود 1500 کلوین در پایین دست محفظه احتراق، حدود 40% کل جریان جرمی هوا برای فرآیند خنک‌کاری لازم است. اگر دمای گازها به حدود (1700-2000) کلوین برسد، در این صورت هوای مورد نیاز برای فرآیند خنک‌کاری حدود 60-70% کل جریان جرمی هوا خواهد بود. بنابراین میزان هوای باقی مانده برای فرآیند احتراق بسیار کم خواهد بود [2].

## 1-2-2- خنک‌کاری نفوذی

یکی از معایب روش خنک‌کاری لایه‌ای، علاوه بر اینکه به مقدار بسیار زیادی هوا مورد نیاز دارد، این است که فیلم در طول دیوارهٔ محفظهٔ احتراق به دلیل مخلوط شدن با گازهای داغ قابلیت خود را از دست می‌دهد و به همین دلیل ضخامت فیلم در پایین دست ورودی سوراخ افزایش می‌یابد. این مسأله می‌تواند به وسیله استفاده از روش خنک‌کاری نفوذی اجتناب گردد، به طوری که دیوارهٔ محفظهٔ احتراق باید توسط مواد متخلخل ساخته شود. هوای خنک کننده، از بین سوراخ دیواره به داخل دمیده می‌شود. در این روش، فیلم خنک‌کاری به صورت پیوسته‌ای تجدید می‌شود و ظرفیت خنک‌کاری در طول دیواره ثابت نگه داشته می‌شود. تخمین‌های زیادی در مقالات متعدد نشان داده‌اند که خنک‌کاری نفوذی نسبت به حالت خنک‌کاری لایه‌ای معمولی، به هوای خنک کنندهٔ کمتر نیاز دارد.

## 1-2-3- روش‌های خنک‌کاری مدرن

در توربین گاز مدرن، مطلوب‌ترین حالت این است که اجازه دهیم دمای گازها در ورودی توربین به ماکزیمم دمای شعله نزدیک گردد و در عین حال باید صدور گازهای  $\text{NO}_x$  به حداقل برسد. برای اینکه این نیازها برآورده شوند، باید تمامی هوای مورد نیاز کمپرسور (به جز آن مقدار هوایی که برای خنک‌کاری پره‌های توربین به کار می‌رود) از منطقهٔ احتراق عبور کند. بنابراین خنک‌کاری لایه‌ای و خنک‌کاری نفوذی (که مقداری مشخص از هوا از منطقهٔ احتراق عبور نمی‌کند) برای این روش قابل استفاده نخواهند بود. بنابراین مطلوب است که به هر طریق شده دمای گازها را در توربین به دمای شعله برسانیم. برای دستیابی به خنک‌کاری مناسب دیوارهٔ احتراق، هوای خنک کننده ممکن است از سمت خارجی دیوارهٔ داغ عبور کند، به عبارت دیگر یک محفظهٔ احتراق دو جداره. بنابراین فرایند خنک‌کاری براساس جابجایی اجباری انجام می‌گیرد. هوای خنک کننده، ابتدا گرم خواهد شد و

بنابراین هوا قبل از ورود به ناحیه احتراق پیش گرم خواهد شد. این یک مزیت در فرآیند احتراق خواهد بود.

به منظور داشتن حداکثر بازدهی در فرآیند خنک کاری، می توان قدرت فرآیند انتقال حرارت جابجایی را با استفاده از مغشوش کننده هایی مانند اینسرت<sup>2</sup> یا اصلاح کننده های سطح مانند شیارهای<sup>3</sup> موجود در سطح داغ منطقه خنک کاری، افزایش داد. طراحی مسیر سوراخ های بسیار باریک خنک کاری، که شامل مغشوش کننده ها و شیارها نیز می شود، باید به طریقی انجام گیرد که افت فشار در طول مسیر خنک کاری در محدوده قابل قبولی قرار گیرد. یک مسأله بهینه سازی می تواند به وسیله این حقیقت که نرخ جریان جرمی هوای خنک کننده ثابت است و افت فشار باید در محدوده خاصی قرار گیرد، فرموله شود. بنابراین کار طراحی این خواهد بود که شکل و ترکیب مسیرهای خنک کاری به صورتی تعیین گردد که بهترین عملکرد در فرآیند خنک کاری حاصل گردد. برای اطمینان از دستیابی به یک عملکرد خنک کاری مشخص، لازم است که روش های خنک کاری جابجایی بهبود یافته را با روش خنک کاری برخوردی (که جت هوای خنک کاری به صورت عمود به سمت داغ دیواره برخورد می کند) ترکیب کرده و به صورت همزمان استفاده کرد.

### 1-3- خنک کاری پره های توربین و پره های راهنما<sup>4</sup>

این روش ها را در حالت کلی می توان به دو دسته ی زیر تقسیم کرد:

خنک کاری داخلی<sup>5</sup>

خنک کاری خارجی<sup>6</sup>

---

<sup>2</sup> Inserts

<sup>3</sup> Ribs

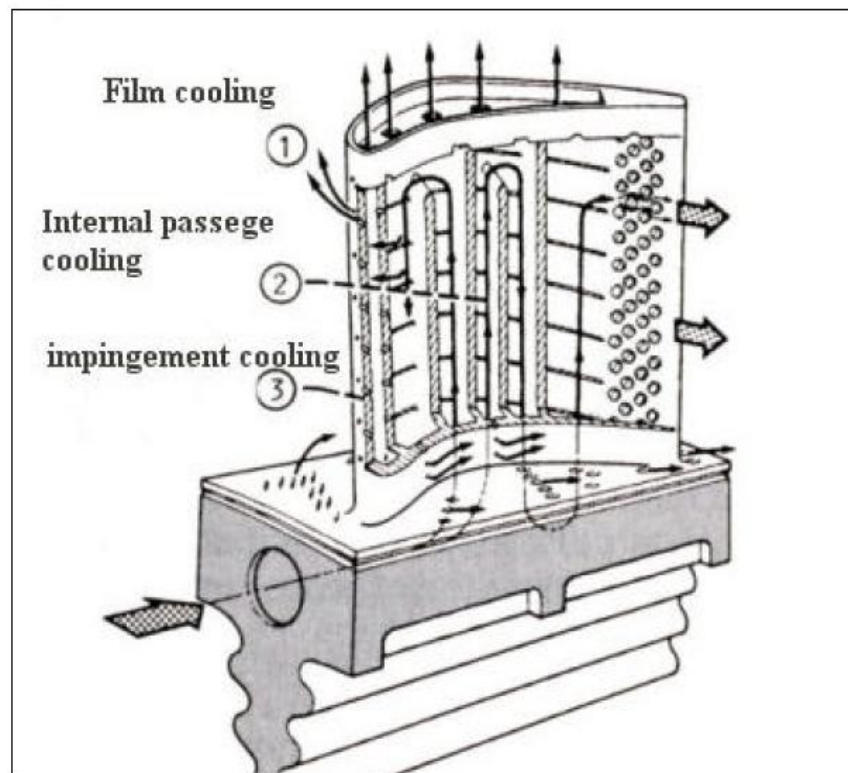
<sup>4</sup> Guide Vane

<sup>5</sup> Internal Cooling

<sup>6</sup> External Cooling



در روش اول بخش اندکی از سیال کاری سیکل به عنوان سیال خنک‌کن<sup>7</sup> از خروجی کمپرسور گرفته شده و از یک سری مجرای داخلی که در داخل پره‌ها تعبیه شده عبور داده می‌شود. هوای عبوری با انتقال حرارت از پره‌ها دمای آنها را کاهش می‌دهد. این روش رایج‌ترین روش موجود بوده و خنک‌سازی دالانی<sup>8</sup> نامیده می‌شود. برای اینکه حداکثر انتقال حرارت را داشته باشیم می‌توان هوا را با سطوح داخلی پره برخورد داد که به این کار خنک‌سازی برخوردی<sup>9</sup> گفته می‌شود [3].



شکل 1-2) روش‌های مختلف خنک‌کاری پره‌ی توربین [3]

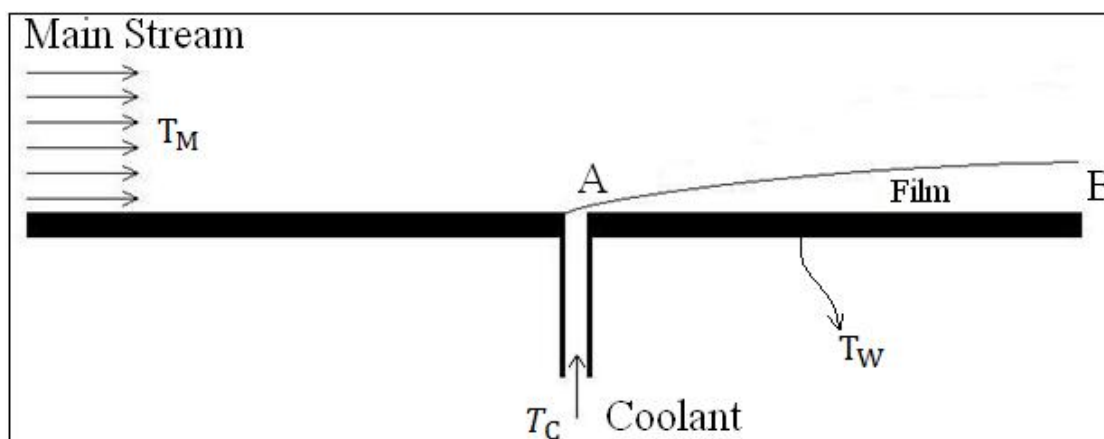
در خنک‌سازی خارجی، بخشی از هوای عبوری از مجراهای داخلی پره‌ها را از سوراخ‌هایی که روی سطح پره تعبیه شده عبور می‌دهند. هوای خروجی یک فیلم نازک روی سطح خارجی پره تشکیل

<sup>7</sup> Coolant  
<sup>8</sup> Passage Cooling  
<sup>9</sup> Impingement Cooling

می‌دهد. این فیلم نقش حفاظتی را روی سطح ایفا می‌کند و از برخورد سیال دما بالا با سطح پره جلوگیری می‌کند. به این روش خنک‌سازی فیلمی<sup>10</sup> گفته می‌شود.

برای درک بهتر این روش یک حالت ساده را که در شکل 1-3 نشان داده شده است مورد بررسی قرار می‌دهیم. فرض کنیم می‌خواهیم سطح AB را که در معرض برخورد با سیال داغی با دمای  $T_M$  قرار دارد، مورد حفاظت قرار دهیم. برای این کار سیالی با دمای  $T_C$  را ( $T_C < T_M$ ) از طریق یک لوله یا یک شکاف روی سطح تزریق می‌کنیم. سیال تزریق شده به صورت یک لایه‌ی محافظ روی سطح قرار می‌گیرد و اجازه نمی‌دهد دمای دیواره ( $T_W$ ) به دمای سیال داغ نزدیک شود. در این حالت رابطه‌ی زیر بین دماهای جریان اصلی<sup>11</sup> (جریان سیال داغ)، سیال تزریق شده و دیواره وجود خواهد داشت

$$T_C < T_W < T_M \quad (1-1)$$



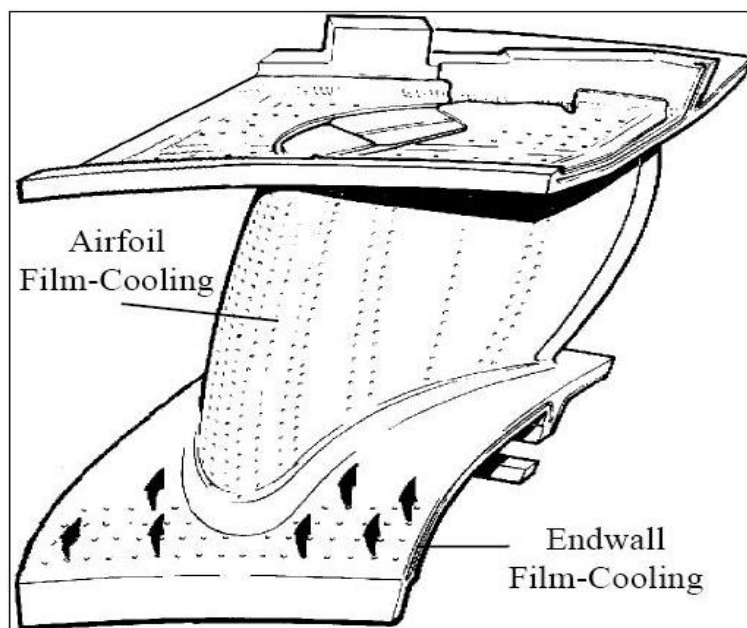
شکل 1-3) تصویر ساده‌ای از تشکیل فیلم سیال روی سطح

در توربین‌های گازی همان‌طور که گفته شد برای حفاظت از سطح پره سوراخ‌های تزریق روی سطح پره قرار می‌گیرند که به این روش خنک‌سازی فیلمی ایرفویل<sup>12</sup> گفته می‌شود. برای حفاظت از

<sup>10</sup> Film Cooling  
<sup>11</sup> Main stream  
<sup>12</sup> Airfoil Film cooling

سطوحی که پره روی آنها نصب می‌شود نیز می‌توان از همین روش استفاده کرد و سوراخ‌هایی را روی سطح آنها در نظر گرفت تا بتوان در آن قسمت‌ها نیز فیلم سیال محافظ را تشکیل داد به این روش خنک‌سازی فیلمی سکو<sup>13</sup> گفته می‌شود [1]. شکل 1-4 این سوراخ‌های تزریق را نشان می‌دهد.

در خنک‌سازی فیلمی سیال تزریق شده باعث ایجاد افت هد در جریان اصلی می‌شود. این مسئله باعث کاهش بازده در هر مرحله از توربین گازی می‌شود. همچنین خروج بخشی از سیال از کمپرسور به عنوان سیال خنک‌کن باعث می‌شود دبی جریان سیال داغ ورودی به کمپرسور کاهش یابد. این مسائل به همراه هم باعث کاهش بازده کلی سیکل می‌شوند. در بهینه‌سازی سیستم‌های خنک‌کن این مسئله باید به همراه افزایش بازده سیکل به دلیل افزایش دمای سیال ورودی به توربین در نظر گرفته شوند.



شکل 1-4) نمایی از سوراخ‌های تزریق در خنک‌سازی فیلمی سکو و خنک‌سازی فیلمی ایرفویل [1]

<sup>13</sup> Endwall Film Cooling

#### 4-1- معرفی پارامترهای بی بعد

دمای سطح مورد حفاظت نه تنها تابع هندسه و میدان جریان است همچنین دمای جریان اصلی و جریان تزریقی به شدت بر آن تاثیر می‌گذارند. برای از بین بردن این وابستگی دمایی می‌توان یک دمای دیواره‌ی بی بعد تعریف کرد که کارآیی خنک‌سازی فیلمی<sup>14</sup> نام دارد و با  $\eta$  نشان داده می‌شود.

برای جریان‌های با سرعت پایین و با خواص ثابت، این پارامتر به صورت زیر تعریف می‌شود [4]

$$\eta = \frac{T_w - T_M}{T_c - T_M} \quad (2-1)$$

که  $T_w$  دمای دیواره،  $T_M$  دمای جریان اصلی و  $T_c$  دمای سیال ورودی به لوله‌ی تزریق می‌باشند.

همان‌طور که گفته شد  $\eta$  یک دمای بی بعد شده می‌باشد که معیاری برای بررسی توانایی فیلم سیال در پوشاندن سطح مورد حفاظت است. در حالتی که پوشش سطح توسط فیلم سیال به صورت کامل و ایده‌آل انجام شود، دمای سطح و دمای فیلم سیال برابر خواهند بود و  $\eta=1$  خواهد شد. در حالتی که فیلم مایع تشکیل نشود، سطح و جریان اصلی هم‌دما خواهند بود و در این حالت  $\eta=0$  می‌شود.

پارامترهای دیگری نیز وجود دارند که به هنگام طراحی باید مورد توجه قرار گیرند. یکی از مهم‌ترین این پارامترها نرخ دمش<sup>15</sup> است که با  $M$  نشان داده می‌شود و به صورت زیر تعریف می‌شود

$$M = \frac{\rho_c U_c}{\rho_M U_M} \quad (3-1)$$

در رابطه‌ی فوق  $\rho$  و  $U$  به ترتیب چگالی و سرعت سیال و اندیس‌های  $c$  و  $M$  به ترتیب مربوط به سیال ورودی به لوله‌ی تزریق و جریان اصلی می‌باشند.

نسبت دمش تاثیر بسزایی در تشکیل فیلم سیال و توزیع کارآیی خنک‌سازی فیلمی روی سطح دارد.

---

<sup>14</sup> Film Cooling Effectiveness  
<sup>15</sup> Blowing Ratio