

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

شبیه‌سازی جریان حول بالگرد در حضور روتور

پایان‌نامه کارشناسی ارشد تبدیل انرژی
روح‌الله ارسطویی

استاد راهنما
دکتر احمد صداقت



دانشگاه صنعتی اصفهان

دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی آقای روح اله ارسطویی

تحت عنوان

شبیه سازی جریان حول بالگرد در حضور روتور

در تاریخ ۱۳۸۷/۴/۱۸ توسط کمیته تخصصی زیر مورد بررسی و تصویب نهایی قرار گرفت.

دکتر احمد صداقت

۱- استاد راهنمای پایان نامه

دکتر احمد رضا پیشه‌ور

۲- استاد مشاور پایان نامه

دکتر علی اکبر عالم رجبی

۳- استاد داور

دکتر محسن ثقفیان

۴- استاد داور

دکتر مهدی کشمیری

سرپرست تحصیلات تکمیلی دانشکده

کلیه حقوق مادی مترتب بر نتایج مطالعات،

ابتکارات و نوآوریهای ناشی از تحقیق موضوع

این پایان نامه متعلق به دانشگاه صنعتی اصفهان است.

فهرست مطالب

<u>شماره صفحه</u>	<u>عنوان</u>
شش	فهرست مطالب
هفت	فهرست نمادها
۹	چکیده
۱۰	فصل اول: مقدمه
۱۰	۱-۱- تاریخچه
۱۳	۱-۲- دورنمایی از پروژه
۱۵	فصل دوم: شبیه سازی روتور با استفاده از عبارتهای چشمه مومنتم
۱۵	۱-۲- کلیات روش
۱۶	۲-۲- انواع توزیع چشمه
۲۱	۳-۲- توضیحاتی راجع به شرایط پیچیده تر
۲۳	فصل سوم: شرایط آزمایش
۲۴	۱-۳- هندسه بالگرد
۲۸	۲-۳- مشخصات روتور
۲۹	۳-۳- نقاط داده برداری برای بالگرد ROBIN
۳۰	فصل چهارم: معادلات حاکم و شرایط مرزی
۳۰	۱-۴- معادلات حاکم
۳۱	۲-۴- شرایط شبیه سازی
۳۳	۳-۴- شرایط مرزی بر روی جسم جامد
۳۵	فصل پنجم: نتایج و نتیجه گیری
۳۶	۱-۵- تاثیر عوامل مختلف در شبیه سازی جریان حول بالگرد
۴۰	۲-۵- بررسی روتور
۴۱	۳-۵- بررسی میدان جریان بر روی بالگرد و اطراف آن
۴۲	۴-۵- نتیجه گیری و پیشنهادات
۶۲	فهرست مراجع
۶۳	پیوست

فهرست نمادها

dQ	مولفه داخل صفحه روتور نیروی وارد بر مقطع		
	روتور، نیوتن	$2.3262 m^2, \pi R^2$	سطح دیسک روتور،
dT	مولفه عمود بر صفحه روتور نیروی وارد بر مقطع		
	روتور، نیوتن		گام دوره‌ای طولی روتور، درجه
dv	حجم سلول، متر مکعب		
dr	پهنای شعاعی سلول، متر		گام دوره‌ای عرضی روتور، درجه
$d\psi$	پهنای سمتی سلول، رادیان		
$\vec{e}_x, \vec{e}_y, \vec{e}_z$	بردارهای یکه محورهای مختصات		
F_x	نیروی وارد بر بالگرد در راستای محور x ، نیوتن	$\frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_{ref}^2 A}$	ضریب نیروی محوری،
F_z	نیروی وارد بر بالگرد در راستای محور z ، نیوتن		ضریب درگ
H	تابع مورد استفاده در تعریف بدنه بالگرد		ضریب لیفت
h	ضخامت ناحیه روتور، متر	$\frac{F_z}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_{ref}^2 A}$	ضریب نیروی عمودی،
l	طول مرجع بدنه (نصف طول طراحی شده)، 0.99949m	$\frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_{ref}^2}$	ضریب فشار،
l_{ref}	طول مرجع محاسبات، $R/12$ ، 0.0717m	$\frac{Q}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_{ref}^2 A l_{ref} \sigma}$	ضریب گشتاور شافت،
N	تعداد تیغه های روتور		
N	تابع استفاده شده در تعریف بدنه بالگرد در بخش ۳-۱	$\frac{T}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_{ref}^2 A \sigma}$	ضریب تراست،
\bar{n}	بردار یکه عمود بر ناحیه روتور متناسب به هر سلول		نیروی لیفت وارد بر هر مقطع روتور، نیوتن
p	فشار نسبی استاتیک محلی، پاسکال		نیروی درگ وارد بر مقطع روتور، نیوتن
p_∞	فشار استاتیک جریان آزاد، پاسکال		

فهرست نمادهای یونانی	\bar{p} بردار یکه در خلاف جهت حرکت روتور منتسب به هر سلول
زاویه حمله هندسی، درجه	α_g گشتاور شافت روتور، نیوتن متر
زاویه حمله القاشده، درجه	α_i مختصات شعاعی مورد استفاده در تعریف بدنه
زاویه شافت روتور (مثبت: لبه حمله بالا)، درجه	α_s فاصله شعاعی تا مرکز روتور، متر
پیش روتور، درجه	α_t بردار شعاعی منتسب به سلول محاسباتی
نسبت پیشروش، $\frac{V_\infty}{R\Omega}$	μ شعاع روتور، $0.8605m$
لزجت مولکولی، پاسکال ثانیه	μ مختصات شعاعی در تعریف فوق بیضی، بخش ۱-۳
لزجت ادی، پاسکال ثانیه	μ_t شعاع بریدگی ریشه روتور
زاویه گام روتور در موقعیت 75 درصدی طول	θ شعاع روتور
روتور، درجه	$\frac{N}{m^3 \cdot s}$ عبارت چشمه معادله مومتم i
گام کلی روتور، درجه	θ_c نیروی تراست روتور، نیوتن
چگالی جریان آزاد هوا، kg/m^3	ρ_∞ اندازه سرعت هوا نسبت به مقطع روتور، m/s
صلیبت روتور، 0.098	σ سرعت مرجع، $\sqrt{2} R\Omega$
زاویه سمتی در تعریف فوق بیضی	Φ سرعت جریان آزاد هوا، m/s
زاویه سمتی در تعریف بدنه بالگرد	φ تابع مورد استفاده در تعریف بدنه بالگرد
زاویه سمتی روتور، درجه	ψ متغیرهای موجود در تعریف فوق بیضی
سرعت زاویه‌ای روتور، $209.44 rad/s$	Ω مختصات مورد استفاده در تعریف بدنه
بردار سرعت زاویه‌ای شافت	$\bar{\Omega}$ تابع مورد استفاده در تعریف بدنه بالگرد

چکیده

پیش‌بینی دقیق برهمکنش روتور و بدنه در طراحی و تحلیل بالگردهای مدرن، ضروری است. هنگامی که بخواهیم آزمایشهای بسیار پرهزینه تونل باد را کاهش دهیم، شبیه‌سازی محاسباتی اهمیت فوق‌العاده‌ای پیدا می‌کند. در این تحقیق، جریان حول بالگرد در حضور روتور با فرض حالت پایا شبیه‌سازی شده‌است. در این کار، به جای مدل کردن روتور به عنوان جسم جامد در حال دوران، اثر دینامیکی متوسط زمانی آن توسط اضافه کردن عبارتهای چشمه به معادلات مومنتم در یک حجم حلقوی در شبکه حل که متناظر با روتور است، به وجود آمده‌است. عبارتهای چشمه به صورت یکنواخت، خطی و همچنین با کمک تئوری المان پره بر روی سلولهای متناظر با روتور در شبکه حل، توزیع شده‌است. نتایج تونل باد بر روی یک بالگرد مدل به صورت تجربی به دست آمده‌است. در این تحقیق، جریان حول این بالگرد، در شش وضعیت مختلف از نسبت پیشروش و ضریب تراست روتور حل شده‌است. ضرایب فشار به دست آمده از روشهای مختلف بارگذاری روتور با نتایج تجربی مقایسه شده‌است. دقت نتایج حاصل از توزیعهای یکنواخت و خطی جملات چشمه مومنتم، مناسب نبوده‌است. با استفاده از توزیع جملات چشمه مومنتم توسط تئوری المان پره به همراه تصحیحاتی بر روی زوایای گام روتور، ضرایب فشار بر روی بدنه بالگرد به نحو قابل قبولی پیش‌بینی شده‌است. همچنین نتایج حاصل از شبیه‌سازی برای تغییرات نیروی تراست روتور با قدرت آن با روتور آزمایشگاهی همخوانی مناسبی دارد. بالگرد مدل بر روی یک پایه نصب شده‌است. بررسیها نشان می‌دهد که هرچند در نظر گرفتن پایه در سرعتهای پایین جریان آزاد تاثیر چندانی بر نتایج نداشته‌است اما با افزایش سرعت جریان آزاد هوا به مقدار ۴۰ متر بر ثانیه، حضور پایه در شبیه‌سازی موجب شده‌است ضرایب فشار به دست آمده بر روی بدنه، در نواحی پایین دست آن به شدت کاهش یابد که همین وضعیت در نتایج تجربی نیز مشاهده می‌شود. ضمناً، در نظر گرفتن پایه در شبکه حل موجب بهبود پیش‌بینی نیروهای وارد بر بدنه بالگرد شده‌است.

فصل اول

مقدمه

۱-۱- تاریخچه

تحلیل میدان جریان پیچیده حول بالگرد، به بهبود طراحی آن کمک می‌کند. هنگامی که بخواهیم آزمایشهای بسیار پرهزینه تونل باد را کاهش دهیم، شبیه سازی محاسباتی اهمیت فوق العاده ای پیدا می‌کند. دیدگاه محاسباتی مورد استفاده به موضوع شبیه سازی بستگی دارد که می‌تواند از بررسی رفتار جزئی تیغه های روتور تا آثار متوسط زمانی روتورها بر یکدیگر یا بر روی بدنه، تغییر کند.

در ابتدای راه، افرادی به دنبال شبیه سازی جریان حول روتور تنها بوده اند. در اینجا اندکی به پدیدارشناسی جریان حول روتور می‌پردازیم. در پرواز رو به جلو در تیغه ای که رو به جلو حرکت می‌کند، ترکیب سرعت دورانی روتور و سرعت پرواز ممکن است باعث شود ناحیه ای صوتی در نوک تیغه ها ایجاد شود که همراه با تشکیل بسته های فراصوت و امواج ضربه ای باشد. قسمتهای داخلی (ریشه) تیغه ای که رو به عقب حرکت می‌کند در جریان برگشتی کار می‌کنند و برای اینکه این تیغه بتواند نیروی برآی لازم را ایجاد کند، قسمتهای خارجی آن باید در زوایای حمله بزرگتری کار کنند که این ممکن است باعث استال دینامیکی شود. برخلاف پرنده های دارای بال ثابت که دنباله پشت بالها به سرعت به نواحی دور از هواپیما منتقل می‌شود، گردابه های پر قدرتی که در نوک تیغه ها به وجود می‌آیند در نزدیکی روتور باقی می‌مانند و در نتیجه بر میدان جریان تسلط دارند و بارهای به شدت ناپایای سه بعدی و بسیار پیچیده ایجاد می‌کنند. در نهایت، تغییرات سریعی که در هر گردش روتور، رخ می‌دهد ممکن است

باعث ایجاد خمش سازه ای و تغییر شکلهای پیچشی آن شوند که هنگام طراحی سازه ای روتور باید به طور مناسبی مدل شوند.

یانگ و سنکر^۱ و دیگران [1] و همچنین هاری هاران و سنکر^۲ [2]، تاریخچه ای اجمالی از روشهای عددی مورد استفاده توسط محققین مختلف در شبیه سازی جریان حول روتور ارائه کرده اند. کانلیسک^۳ [3]، پس از ارائه مبانی آیرودینامیک جریان حول تیغه های روتور، روشهای اصلی تحلیل، محاسبه و آزمایش روتور را توضیح داده است. به طور خلاصه می توان گفت در ابتدای راه از روشهای تحلیل دنباله آزاد، روشهای خطوط / سطوح گردابه و یا روشهای پانل استفاده می شده است. سپس با افزایش حافظه و توانایی رایانه ها امکان استفاده از روشهای میدانی نیز فراهم گردیده است به طوری که این روشها از حل معادلات پتانسیل جریان به معادلات اولر و اخیراً معادلات ناویر-استوکس پیشرفت کرده است.

بر هم کنش آیرودینامیکی میان روتور و بدنه نیز موضوع مهمی است که از شروع طراحی یک بالگرد جدید باید در نظر گرفته شود. هندسه بدنه بالگرد نسبتاً ناهموار است به طوری که می تواند موجب جدایش جریان و ایجاد گردابه شود. اثر متقابل جریان ناشی از روتور و جریان حول بدنه، باعث به وجود آمدن پدیده های بسیاری است که شرایط پروازی را محدود می سازند. از آن جمله می توان به تغییر کارایی، افزایش سطح آلودگی صوتی (چه در داخل و چه در خارج بالگرد) و پاسخ پیچیده بالگرد به فرامین خلبان اشاره کرد.

بتچارت^۴ [4] در مقاله خود به کارهایی که در ONERA^۵ برای پیش بینی بر هم کنش میان روتور و بدنه انجام شده است، اشاره می نماید و از آن جمله کد پرف^۶ که یک ترکیب از دو روش پانل (یکی برای روتور و دیگری برای بدنه) است را عنوان کرده است. چنین روشهایی با توجه به محدودیتهای جریان پتانسیل نمی توانند اثرات لزجت را در نظر بگیرند.

در ادامه بدون توجه به روشهای گوناگونی که برای شبیه سازی جریان حول بالگرد به کار گرفته شده است، توجه خود را تنها به استفاده از تئوری دیسک فعال ساز^۷ (A.D.) معطوف می کنیم. در این روش روتور با یک دیسک، که مسیر عبور تیغه های آن را می پوشاند جایگزین می شود و با فرض حالت پایا، اثر دینامیکی متوسط آن مدل می شود. برای این نحوه مدلسازی روتور دو دیدگاه وجود دارد. عده ای با اعمال یک سری شرایط مرزی در

¹ Yang, Sankar

² Sankar, Hariharan

³ Conlisk

⁴ Bettschart

⁵ Office National d'Etudes et Recherches Aéropatiales, France

⁶ PEIRF (Programme d'Etude d'Interaction Rotor/Fuselage)

⁷ Actuator Disk

موقعیت روتور، اثر آن را در نظر گرفته‌اند و افرادی دیگر، اثر روتور را با اضافه کردن جملات چشمه به معادلات مختلف جریان به وجود آورده‌اند که در ادامه بعضی از این کارها را مرور می‌کنیم.

چافین^۱ [5]، یک پرش در فشار و سرعت مماسی بر روی دیسک اعمال کرده‌است و آن را دیسک فشار نامیده- است. او از این روش برای تخمین اثر روتور بالگرد یا ملخ هواپیما بر اجزای آیرودینامیکی آنها استفاده کرده‌است. چویتون^۲ [6]، شرایط مرزی به کار گرفته شده برای A.D. را به سه دسته طبقه‌بندی کرده است. به عنوان روش اول، شرط مرزی را بر روی متغیرهای معادلات جریان اعمال کرده‌است. سپس، یک بار با استفاده از «روش مشخصه-ها» بر روی متغیرهای مسئله و بار دیگر بر روی عبارات شار موجود در معادلات، شرایطی اعمال کرده‌است. برایان^۳ [7] برای اعمال A.D. در شبکه حل، آن را یک بار به عنوان سطحی بین دو مجموعه از سلولها در نظر گرفته‌است و مجدداً در دیدگاهی عمومی‌تر (برای ساده شدن شبکه‌سازی) اجازه داده است که این سطح به طور آزاد شبکه محاسباتی را قطع کند و سپس عبارتهای چشمه را به روشهای مختلف (یکنواخت، خطی، BET)^۴ بر روی A.D. توزیع کرده‌است و نتایج خود را با آزمایشهای تجربی مقایسه نموده‌است. بتجارت [4] تیغه‌های چرخان روتور را با یک دیسک بی‌نهایت نازک، جایگزین کرده‌است که مومنتم و انرژی جریان با عبور از آن، به اندازه کار و انرژی که روتور به آن می‌دهد، افزایش پیدا می‌کند. شرط مرزی دیسک در فصل مشترک دو بلوک شبکه قرار دارد و بر مبنای تئوری مشخصه‌هاست. شار در قسمت بالایی سطح روتور، از شرط مرزی خروجی مادون صوت کلاسیک به همراه بقای جرم محلی، محاسبه شده است. برای قسمت تحتانی آن، از شرط مرزی ورودی زیر صوت استفاده شده- است و شار، با اضافه کردن یک بردار چشمه متناظر با انرژی و مومنتم متوسط زمانی روتور، محاسبه شده‌است. بتجارت یک بار از توزیع یکنواخت تراست، متناظر با پرش فشار بر روی دیسک، استفاده کرده‌است و بار دیگر، برای توزیع تراست از کد خارجی متار^۵ که توسط یورو کوپتر^۶ برای محاسبات آیرودینامیکی روتور تولید شده بود، استفاده کرده‌است و جریان حول یک بالگرد ۸ تنی را شبیه‌سازی کرده‌است.

پیرو قراردادی برای مطالعه بالگرد، سه گروه مختلف کاری در AFDD^۷، ONERA و GIT^۸، هر یک با کدهای CFD مختلفی که در اختیار داشته‌اند، جریان حول بالگرد Dauphin 365N را حل کرده‌اند. آنها در این

¹ Chaffin

² Chuiton

³ M. O'Brien

⁴ Blade Element Theory

⁵ METAR (Modele d'Etude de l'Aérodynamique du Rotor)

⁶ EUROCOPTER

⁷ The US Army Aeroflightdynamics Directorate

⁸ Georgia Institute of Technology

کار از یک نوع روش خطوط برآزا^۱ استفاده کرده‌اند. هر سه گروه توانسته‌اند، ضرایب فشار در اکثر نقاط بالگرد را به نحو قابل قبولی پیش‌بینی کنند اما نیروهای وارد بر بالگرد را نتوانسته‌اند به خوبی پیش‌بینی کنند [8].

آلپمن و لانگ^۲ [9]، ابتدا تراست روتور دم بالگرد Comanche را با استفاده از دیدگاه متوسط زمانی به کمک BET به صورت تابعی از گام کلی آن و سرعت پرواز به دست آورده‌اند و سپس از این تابع در شبیه‌سازی جریان ناپایا، برای درک حساسیت کنترل سمتی بالگرد به تغییر گام کلی روتور دم آن استفاده کرده‌اند.

راجاگوپالان^۳ [10] در مقاله خود، گزارشی از پروژه‌های موفقیت‌آمیزی که با دانشجویان خود در پیش‌بینی کارایی ملخ هواپیما، حل جریان حول روتور تنها در شرایط پرواز عمودی و پرواز رو به جلو و تحلیل برهم‌کنش میان روتور و بدنه بالگرد با استفاده از به‌کارگیری جملات چشمه مومنتم انجام داده، ارائه کرده است.

برای دیدگاه متوسط زمانی، علاوه بر موارد ذکر شده، می‌توان کاربردهایی همچون توزیع دود موتور^۴ و همچنین توزیع دما بر روی بدنه بالگرد، متصور شد.

۲-۱- دورنمایی از پروژه

در این پروژه قصد داریم روشی را برای شبیه‌سازی جریان حول بالگرد در حضور روتور با فرض حالت پایا (دیدگاه متوسط زمانی) بررسی کنیم. برای این کار، اثر دینامیکی متوسط زمانی روتور را توسط اضافه کردن عبارتهای چشمه به معادلات مومنتم در یک حجم حلقوی در شبکه حل که متناظر با روتور است، به وجود می‌آوریم. در این پروژه از نرم‌افزار فلونت^۵ برای حل معادلات جریان استفاده کرده‌ایم. به همین دلیل در خلال مباحث، توضیحاتی راجع به چگونگی اعمال روش در این نرم‌افزار ارائه می‌کنیم. در فصل دوم، مبانی این روش شبیه‌سازی به همراه شیوه‌های مختلفی که برای توزیع عبارتهای چشمه بر روی روتور به کار گرفته‌ایم، به طور کامل توضیح داده شده است. ناسا، در تونل باد لانگلی^۶ آزمایشی را بر روی یک بالگرد مدل در چند حالت مختلف از سرعت جریان آزاد و نیروی تراست روتور انجام داده‌است. از این آزمایش برای سنجش اعتبار روش کار خود بهره گرفته‌ایم. هندسه بالگرد، مشخصات روتور و دیگر شرایط این آزمایش را در فصل سوم آورده‌ایم. برای شبیه‌سازی، از مدل اغتشاش $k-\epsilon$ استاندارد استفاده کرده‌ایم. معادلات حاکم بر حرکت سیال و همچنین شرایط مرزی به کار گرفته شده، موضوع فصل

¹ Lifting line method

² Alpman, Long

³ Rajagopalan

⁴ Engine plume distribution

⁵ FLUENT

⁶ Langley

چهارم می‌باشد. در فصل پنجم، نتایج حاصل از شبیه‌سازی عددی را با داده‌های تجربی مقایسه کرده‌ایم. نتایج به- دست آمده از روشهای مختلف توزیع نیرو بر روی صفحه روتور با یکدیگر مقایسه شده‌است. معادلات جریان برای بالگرد مدل در دو نسبت پیشروش 0.05 و 0.23 برای سه ضریب تراست اسمی 0.04، 0.06 و 0.08 در شرایطی مشابه با تونل باد (جریان داخلی) حل شده است. در ضمن برای دو مورد از شش حالت پروازی گفته شده، تمامی روشهای مختلفی که در فصل دوم برای توزیع نیرو بر روی روتور عنوان می‌شود، به کار گرفته شده است. برای بررسی امکان بکارگیری روش در شرایط پرواز واقعی بالگرد مسئله به صورت جریان خارجی نیز حل شده‌است. در نهایت، ضرایب فشار در نقاط مختلف بالگرد با نتایج تجربی موجود، مقایسه شده و مزایا و معایب روشهای مختلف توزیع نیرو در فصل پنجم مورد بررسی قرار گرفته‌است. برای اضافه نمودن عبارتهای چشمه به معادلات جریان در FLUENT باید برنامه‌ای به زبان C نوشته شود. این برنامه‌ها به همراه توضیحات مربوطه در پیوست آورده شده است.

فصل دوم

شبیه‌سازی روتور با استفاده از عبارتهای چشمه مومنتم

۲-۱- کلیات روش

تیغه‌های روتور با حرکت خود، مقدار معینی مومنتم به سیال می‌دهند. بنابراین معقول به نظر می‌رسد که فرض شود حضور تیغه‌های در حال چرخش می‌تواند توسط چشمه‌هایی در معادلات مومنتم، مدل شود. استفاده از چشمه‌های مومنتم، تیغه‌ها را تا نقاط نزدیک به آنها شبیه‌سازی می‌کند، اما به دلیل عدم حضور جسم جامد در موقعیت تیغه‌ها، لایه مرزی روی تیغه‌ها را حل نمی‌کند. در عوض با توجه به کاهش سلولهای لازم در اطراف تیغه‌ها و همچنین فرض پایا بودن جریان، به سوپر کامپیوتر احتیاج نخواهد بود و زمان محاسبات نیز به شدت کاهش پیدا می‌کند.

جزئیات روش، به سه قسمت معادلات مورد استفاده، ارزیابی نیروهای تولید شده توسط روتور و جفت کردن آنها با معادلات و روش حل تقسیم می‌شود. نوع معادلات مورد استفاده شامل اولر، ناویر-استوکس آرام، ناویر-استوکس به همراه مدل‌سازی توربولانس بر دقت نتایج و البته زمان محاسبات اثر می‌گذارد و انتخاب آنها به میزان دقت لازم و حافظه و توانایی رایانه مورد استفاده بستگی دارد. در این پروژه، از معادلات ناویر-استوکس به همراه مدل اغتشاش $k-\epsilon$ استاندارد استفاده شده است. چگونگی توزیع نیروها، در بخشهای بعدی همین فصل توضیح داده می‌شود. الگوریتم عددی مورد استفاده ممکن است بر زمان همگرایی جواب تاثیر بگذارد.

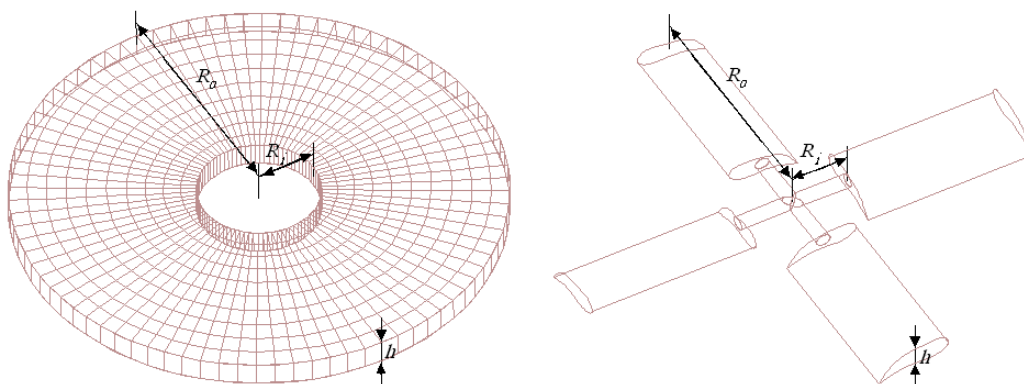
معادله مومنتم برای جریان پایای آرام با صرف نظر از نیروی گرانش در شکل تانسوری به صورت زیر نوشته می‌-

شود:

$$\frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + S_i \quad (1-2)$$

که μ ، لزجت مولکولی و S_i ، عبارت چشمه برای جهت i می باشد که برابر با مولفه i ام نیروی ناشی از روتور بر روی سیال در واحد حجم قرار داده می شود.

از روش حجم محدود برای حل معادلات، در فلونت استفاده می شود. عبارتهای چشمه به سلولها نسبت داده می شود. برای اضافه کردن عبارتهای چشمه به مجموعه ای از سلولها، آن سلولها باید در یک ناحیه^۱ مجزا قرار داده شود. گمبیت^۲، یک نرم افزار تولید شبکه است که به عنوان پیش پردازنده برای فلونت استفاده می شود. تعریف سلولهای فوق، به عنوان ناحیه ای مجزا در نرم افزار گمبیت انجام می شود. واحد عبارات چشمه در معادلات، برابر با «نرخ تولید کمیت بر حجم» است که برای معادله مومنتم برابر با N/m^3 می شود. با توجه به شکل روتور، ناحیه مربوط به آن، حجمی حلقوی دارای شعاع خارجی برابر با شعاع روتور، شعاع داخلی برابر با بریدگی ریشه روتور و ضخامتی در حدود ضخامت تیغه های روتور می باشد و در این ضخامت همانطور که در شکل ۱-۲ مشاهده می شود، تنها یک ردیف سلول قرار می گیرد.



شکل ۱-۲- ابعاد روتور واقعی و ناحیه روتور شبکه بندی شده

۲-۲- انواع توزیع چشمه

برای نسبت دادن عبارت چشمه به سلولهای مختلف در ناحیه روتور یا به عبارت دیگر بارگذاری بر روی صفحه روتور، راههای گوناگونی وجود دارد. در این بخش چهار مورد از آنها، توضیح داده می شود. در فصل آخر، نتایج

¹ Zone

² GAMBIT

حاصل از به کارگیری این روشها و مزایا و معایب آنها نسبت به یکدیگر بررسی خواهد شد. در حالتی که مقداری متغیر برای جملات چشمه به سلولها نسبت داده می شود، نیاز به نوشتن 'udf' می باشد که در پیوست ارائه شده است.

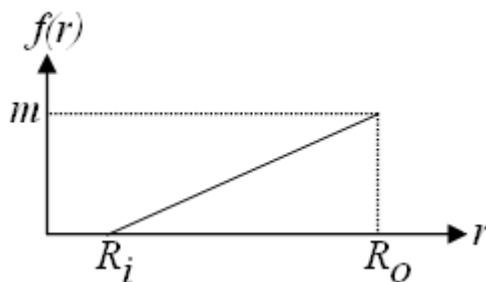
۲-۲-۱- توزیع یکنواخت

در این روش، فرض می شود تمام صفحه روتور نیروی یکنواختی به هوا وارد می کند. با توجه به ضخامت ثابت ناحیه روتور، مقدار نیروی روتور در واحد حجم مقداری ثابت برابر با نیروی تراست بر حجم کل ناحیه روتور خواهد بود. با تجزیه این نیرو، مقدار عبارت چشمه برای معادلات مومنتم در راستای محورهای مختصات به دست می آید.

۲-۲-۲- توزیع خطی

در قسمت متناظر با ریشه تیغهها در حجم حلقوی مربوطه، جملات را صفر قرار می دهیم. جملات به طور خطی افزایش می یابند و در شعاع روتور به مقدار بیشینه خود می رسند. در عین حال باید نیروی حاصل از کل این جملات برابر با نیروی تراست باشد. برای محاسبه جملات به این روش، ابتدا نیرو بر واحد سطح روتور که تابعی از فاصله r تا مرکز روتور می باشد را می یابیم. با توجه به خطی بودن، تابع به صورت زیر خواهد بود:

$$f(r) = m \times \frac{r - R_i}{R_o - R_i} \quad (2-2)$$



شکل ۲-۲- تابع خطی نیرو بر واحد سطح روتور

در رابطه فوق، m مقدار ماکزیمم تابع است که در R_o ، حاصل می شود. از آنجا که انتگرال تابع بر روی سطح

روتور باید برابر با نیروی تراست روتور باشد، می توانیم بنویسیم:

$$T = \int_{R_i}^{R_o} f(r) \times 2\pi r dr = 2\pi \int_{R_i}^{R_o} \left(\frac{m}{R_o - R_i} \right) (r^2 - R_i r) dr \quad (3-2)$$

$$\Rightarrow T = \frac{2\pi m}{R_o - R_i} \times \left(\frac{R_o^3 - R_i^3}{3} - \frac{R_o^2 - R_i^2}{2} \times R_i \right) \quad (4-2)$$

¹ user-defined function

از رابطه فوق، مقدار m به دست می آید و در نتیجه f را می توان به صورت زیر نوشت:

$$f(r) = \frac{T}{2\pi \left(\frac{R_o^3 - R_i^3}{3} - \frac{R_o^2 - R_i^2}{2} \times R_i \right)} (r - R_i) \quad (5-2)$$

اگر h ضخامت ناحیه روتور و \vec{n} برداری واحد، عمود بر روتور و در سوی نیروی تراست باشد، عبارتهای چشمه معادلات مومنتم برای سلولی که در فاصله شعاعی r از مرکز روتور قرار دارد از روابط زیر به دست می آیند:

$$S_x = -\frac{f(r)}{h} \vec{n} \cdot \vec{e}_x; S_y = -\frac{f(r)}{h} \vec{n} \cdot \vec{e}_y; S_z = -\frac{f(r)}{h} \vec{n} \cdot \vec{e}_z \quad (6-2)$$

\vec{e}_i بردار یکه در راستای محور i می باشد و وجود علامت منفی به این دلیل است که باید نیرویی در خلاف جهت تراست به سیال وارد شود.

۲-۲-۳- توزیع به کمک تئوری المان پره^۱

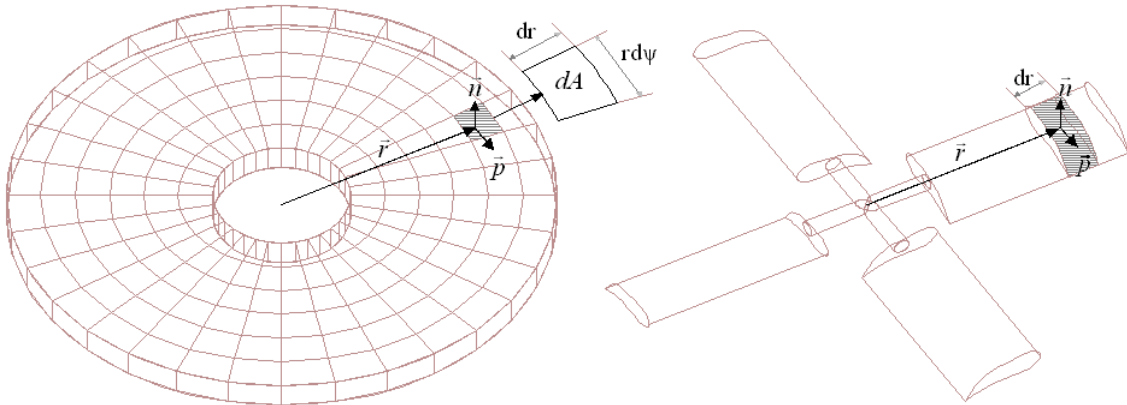
در صورتیکه سرعت برخورد جریان هوا و زاویه برخورد آن با یک ایرفویل دوبعدی را داشته باشیم با استفاده از نتایج آزمایشگاهی برای ضریب لیفت و درگ و روابطی بسیار ساده، نیروی وارد بر ایرفویل را می توانیم به دست آوریم. تیغه های روتور را می توان به صورت مجموعه ای از ایرفویلها که در کنار یکدیگر قرار گرفته اند در نظر گرفت. با استفاده از روش بسیار ساده فوق و البته در نظر گرفتن بعضی تصحیحات برای سه بعدی بودن جریان، به هر برش کوچک از روتور بالگرد می توان نیرویی نسبت داد. مجموع نیروهای وارده بر مقاطع کوچکی که در کنار یکدیگر قرار گرفته اند، تخمین بسیار خوبی برای نیروی وارد بر روتور (یا بال هواپیما) می باشد. مطالب فوق، اساس تئوری المان پره است. البته، چگونگی به کارگیری این نظریه برای روتور بالگرد، بال و یا ملخ هواپیما تفاوتی با یکدیگر دارد که خارج از موضوع بحث ما می باشد.

در این قسمت می خواهیم چگونگی استفاده از این نظریه را برای محاسبه نیروی وارد بر مقاطع مختلف روتور (یا به عبارت دیگر محاسبه عبارتهای چشمه برای سلولهای مختلف ناحیه روتور) توضیح دهیم. ابتدا باید سرعت و زاویه برخورد جریان هوا با مقاطع مختلف تیغه ها را بیابیم. فرض کنید می خواهیم نیرویی را که برش نشان داده شده در شکل ۲-۳ از تیغه روتور بر روی سیال وارد می کند محاسبه کنیم. برای تعیین وضعیت حرکت از سه بردار استفاده می کنیم. \vec{r} ، برداری است که مرکز روتور را به مقطع مورد نظر از تیغه وصل می کند. بردار واحد \vec{n} را عمود بر جهت حرکت روتور تعریف می کنیم که با توجه به تعریف شبکه، تعیین می شود. بردار \vec{p} ، برداری واحد در خلاف جهت

¹ Blade Element Theory

حرکت روتور است که با توجه به تعاریف \vec{r} و \vec{n} می توان آن را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$\vec{p} = \frac{1}{|\vec{r}|} \vec{r} \times \vec{n} \quad (۷-۲)$$



شکل ۲-۳- تعیین وضعیت حرکت مقطعی از تیغه در کنار سلول متناظر از ناحیه روتور

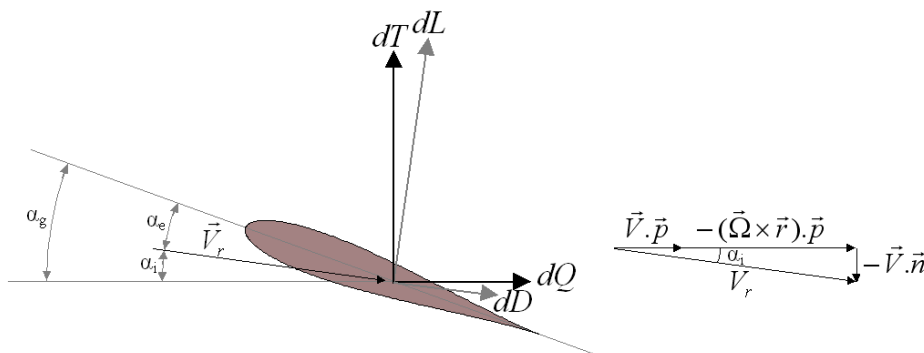
سرعت جریان هوا، \vec{V} از حل معادلات توسط فلوئنت فراهم می شود. $\vec{V} \cdot \vec{n}$ مولفه سرعت هوا در جهت عمود بر مسیر تیغه های روتور است. $\vec{V} \cdot \vec{p}$ مولفه سرعت جریان آزاد در راستای موازی با مسیر تیغه ها می باشد. سرعت هوا نسبت به روتور در راستای حرکت روتور را می توان از مجموع سرعت جریان هوا در راستای روتور و سرعت حرکت روتور به دست آورد.

$$V_{rp} = \vec{V} \cdot \vec{p} + (\vec{r} \times \vec{\Omega}) \cdot \vec{p} \quad (۸-۲)$$

که $\vec{\Omega}$ بردار سرعت زاویه ای روتور است. همچنین اندازه سرعت نسبی هوا برابر خواهد بود با

$$V_r = \sqrt{(\vec{V} \cdot \vec{p} + (\vec{r} \times \vec{\Omega}) \cdot \vec{p})^2 + (\vec{V} \cdot \vec{n})^2} \quad (۹-۲)$$

حالا می خواهیم زاویه برخورد هوا با مقطع را تعیین کنیم. زاویه ای که هر مقطع از تیغه با صفحه روتور می سازد، زاویه حمله هندسی نامیده می شود. این زاویه با توجه به مشخصات فنی روتور از رابطه ای مشابه با رابطه زیر به دست می آید:



شکل ۲-۴- محاسبه نیروی وارد بر روی برشی از تیغه

$$\alpha_g = \theta_c - A_1 \cos \psi - B_1 \sin \psi - (0.75 - \frac{r}{R}) \alpha_i \quad (10-2)$$

که θ_c گام کلی، A_1 و B_1 گامهای دوره‌ای جانبی و طولی و α_i زاویه پیچش روتور می‌باشند. شعاع روتور R و ψ ، زاویه دوران روتور است که از روی دم‌بالگرد اندازه‌گیری می‌شود. تنها متغیرهای رابطه فوق، r و ψ هستند که برای هر سلول در ناحیه روتور معلوم می‌باشند. زاویه حمله هندسی از زاویه برخورد واقعی جریان هوا با مقطع به اندازه α_i ، انحراف دارد. با توجه به شکل، α_i از رابطه زیر تعیین می‌شود:

$$\alpha_i = \arctan\left(\frac{-\vec{V} \cdot \vec{n}}{\vec{V} \cdot \vec{p} + (\vec{r} \times \vec{\Omega}) \cdot \vec{p}}\right) \quad (11-2)$$

زاویه برخورد موثر را می‌توان با کم کردن α_i از α_g به دست آورد:

$$\alpha_e = \alpha_g - \alpha_i \quad (12-2)$$

با داشتن α_e و سرعت باد نسبی، ضریب لیفت و درگ را می‌توان از جدول خواند. نیروهای لیفت dL و

درگ dD وارد بر مقطعی از ایرفویل به پهنای dr و طول وتر c از روابط زیر به دست می‌آیند:

$$dL = \frac{1}{2} \rho_\infty V_r^2 c_l c dr \quad (13-2)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho_\infty V_r^2 c_d c dr \quad (14-2)$$

که c_l ضریب لیفت، c_d ضریب درگ، ρ_∞ چگالی جریان آزاد هوا می‌باشند. dr ، پهنای مقطع یا به عبارت دیگر فاصله شعاعی است که هر سلول در بر می‌گیرد. حجم هر سلول توسط نرم‌افزار فلونت در دسترس است. برای حجم هر سلول، رابطه زیر را می‌توان نوشت:

$$dv = h r d\psi dr \quad (15-2)$$

h و $d\psi$ از روی شبکه معلوم هستند. r نیز فاصله مرکز هر سلول تا مرکز روتور است و از روی مختصات مرکز

سلول توسط فلونت در دسترس است. به این ترتیب dr از رابطه زیر به دست می‌آید:

$$dr = \frac{dv}{h r d\psi} \quad (16-2)$$

از طرفی، هر تیغه تنها کسری از زمان برابر با $\frac{d\psi}{2\pi}$ را بر روی سطح سلول می‌گذراند و اگر تعداد تیغه‌ها (N) را

نیز در نظر بگیریم، برای به دست آوردن نیروی متناظر با هر سلول باید مقادیر dL و dD را در $N \frac{d\psi}{2\pi}$ ضرب نماییم.

نیروی وارد بر هر مقطع ایرفویل از برآیند نیروهای لیفت و درگ با در نظر گرفتن ضرایب فوق به دست می‌آید. با

تجزیه این نیرو در راستای \vec{n} ، dT و در راستای \vec{p} ، dQ به دست می‌آیند:

$$dT = N \frac{d\psi}{2\pi} (dL \cos(\alpha_i) - dD \sin(\alpha_i)) \quad (17-2)$$

$$dQ = N \frac{d\psi}{2\pi} (dL \sin(\alpha_i) + dD \cos(\alpha_i)) \quad (18-2)$$

همین نیروها در جهت عکس، از جانب روتور به سیال وارد می شود که با در نظر گرفتن جهت بردارهای \vec{n} و \vec{p} با محورهای مختصات، می توان مقدار عبارت چشمه برای هر سلول را به صورت زیر محاسبه کرد:

$$S_x = -(n_x dT + p_x dQ) \quad (19-2)$$

$$S_y = -(n_y dT + p_y dQ) \quad (20-2)$$

$$S_z = -(n_z dT + p_z dQ) \quad (21-2)$$

که زیرنویسهای x ، y و z مولفه های \vec{n} و \vec{p} را در راستای محورهای مختصات کارترین مشخص می کنند.

۲-۲-۴- توزیع تئوری المان پره به همراه اصلاح نیروها

جریان حول روتور، سه بعدی است. زاویه گام روتور در هر گردش، حول یک مقدار ثابت به صورت دوره ای تغییر می کند. با توجه به متفاوت بودن این شرایط با شرایط جریان پایای دوبعدی حول ایرفویل، مجموع نیروهای به- دست آمده برای مقاطع مختلف روتور از قسمت قبل با نیروی واقعی تراست روتور تفاوت دارد. همچنین می دانیم که گشتاور حول هاب روتور باید صفر باشد زیرا در غیر این صورت، روتور تا جایی که گشتاور صفر شود خواهد چرخید. پیش بینی صحیح کارایی بالگرد و بارهای آیرودینامیکی وارد بر آن حاصل نخواهد شد، مگر اینکه شرایط فوق برای گشتاور و نیروی تراست ارضا شود. به همین منظور، زوایای گام روتور را باید در طی حل به مرور تغییر داد تا جایی که به شرایط مورد نظر رسید. به این کار، تریم^۱ یا اصلاح می گویند.

۲-۳- توضیحاتی راجع به شرایط پیچیده تر

در این فصل، چهار روش مختلف برای توزیع جملات چشمه بر روی روتور، توضیح داده شد. برای توزیع یکنواخت و خطی می توان در ناحیه روتور از شبکه غیرسازمان یافته نیز استفاده کرد و تفاوتی میان شبکه بندی سازمان- یافته دایروی و غیرسازمان یافته بر روی صفحه روتور وجود ندارد. اما در حالتی که از BET برای توزیع جملات استفاده می شود، فرمول بندی مسئله برای شبکه سازمان یافته ساده تر است زیرا بعضی کمیته ها مانند dr که پهنای مقطع تیغه بود و همچنین کسری از زمان که برش تیغه روی سلول مورد نظر قرار می گیرد ($d\psi/2\pi$) در شبکه بندی

¹ Trim