

## تحلیل عددی پدیده تعامل سیال-سازه بر روی پره توربین

محمد تشکری بافقی<sup>۱</sup>، محمدرضا الهامی<sup>۲</sup> و علیرضا ربیعی<sup>۳</sup>

دانشگاه جامع امام حسین<sup>(ع)</sup>

(تاریخ دریافت: ۱۳۹۴/۸/۳۰؛ تاریخ پذیرش: ۱۳۹۵/۸/۷)

### چکیده

در این مقاله، ابتدا به بیان پدیده تعامل سیال-سازه و تاریخچه‌ای از آن پرداخته شده و سپس با توجه به شرایط کاری پیچیده و خاصی که یک پره توربین دارد به بررسی این پدیده بر روی آن پرداخته شده است. تعامل سیال-سازه یک مدل پره توربین با استفاده از نرم‌افزار ANSYS شبیه‌سازی شده است و در این تحلیل قسمت سازه‌ای و سیالاتی نرم‌افزار استفاده می‌گردد. یک مدل پره توربین با مقطع ایرفویل و جنس آلومینیوم در سه سرعت ورودی مختلف مورد تحلیل قرار گرفته و میزان انحراف نوک پره توربین و تاثیر این انحراف بر روی فشار جریان سیال وارده بر پره توربین بررسی گردیده است. نتایج این بررسی نشان می‌دهد که با افزایش سرعت جریان ورودی، میزان انحراف نوک پره افزایش یافته و تاثیر آن بر فشارهای سیالاتی وارد بر روتور نیز افزایش می‌یابد. همچنین، نتایج بررسی میزان جابجایی در راستای طول پره نشان می‌دهد که این تغییر شکل در طول پره خطی می‌باشد.

**واژه‌های کلیدی:** تعامل سیال-سازه، کوپل دوطرفه سیال و سازه، پره توربین، تحلیل عددی پره توربین

## Numerical Analysis of Fluid Structure Interaction Phenomenon on a Turbine Blade

M. Tashakori Bafghi, M.R. Elhami and A.R. Rabiee

Mechanical Engineering Department  
Imam Hosein University

(Received:21/November/2015; Accepted:28/October/2016)

### ABSTRACT

In this paper, the fluid-structure interaction phenomenon and the research history are described. Then due to the complex and specific working conditions of a turbine blade, we have investigated the phenomenon on this subject. The fluid-structure interaction on a turbine blade model has been simulated by using structural and fluid flow section of ANSYS software. A model of turbine blade with airfoil cross section made of aluminum has been analyzed in three different inlet speed of the fluid. For analysis results the amount of turbine blade tip deviation and its impact on the fluid flow pressure exerted on the turbine blade has been considered. The results show that by increasing the speed of inlet flow, the amount of blade tip deviation increases and also its impact increases on fluid pressure exerted on the rotor. The results also show that the transverse displacement of the blade is linear across of its axis.

**Keywords:** Fluid-Structure Interaction, Two-Way Coupled Fluid and Structural, Turbine Blade<sup>1</sup>, Numerical Analysis

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد: muhammadtashakori@chmail.ir

۲-دانشیار(نویسنده پاسخگو): melhami@ihu.ac.ir

۳- مربی: arabiee@ihu.ac.ir

## ۱- مقدمه

زمانی که یک جریان سیال از روی سازه یا بدنه جامد عبور می‌کند، می‌تواند با آن اندرکنش داشته باشد و به آن نیروهای فشاری و حرارتی وارد نماید. علم تعامل سیال-سازه به تحلیل این گونه مسائل می‌پردازد و با حل همزمان معادلات دینامیکی سیال و سازه‌ای، نیروها و فشارهای وارد به جسم را محاسبه می‌کند. اثرات اندرکنش بین سیال و سازه را به دو صورت می‌توان در نظر گرفت:

الف: میدان جریان باعث ایجاد تغییر شکل در جسم می‌شود و این به نوبه خود باعث تغییر در میدان پایه می‌گردد (اندرکنش دوطرفه).

ب: تغییر شکل جسم جامد باعث تغییرات زیادی در میدان سیال نمی‌شود (اندرکنش یک‌طرفه).

یکی دیگر از کاربردهای تعامل سیال-سازه حرکت یا تغییر شکل یک جسم جامد به خاطر نیروهای خارجی است که باعث القای نیروهای حرارتی و فشاری به جریان پایه می‌شود.

اهمیت مطالعه در این زمینه را می‌توان به این صورت بیان نمود که بسیاری از عملیات مهندسی مانند انتخاب مواد مطالعه خستگی مواد بر اثر حرکت سیال، تخمین عمر سازه و ... مربوط به این شاخه می‌باشد با به‌کاربردن این تکنیک می‌توان دید بهتری نسبت به طراحی سامانه داشت.

تعامل سیال-سازه<sup>۱</sup> در مهندسی، پزشکی، علوم طبیعی و نیز در زندگی ما کاربردهای زیادی دارد. برخی روش‌ها برای حل سیال و سازه به‌صورت جداگانه اند اما تعداد اندکی روش به‌صورت پیشرفته برای حل مسائل تعامل سیال-سازه که پیشرفت‌های قابل توجهی در زمینه تحقیقاتی، در چارچوب‌های کلی و روش‌های ویژه با هدف گروهی از مسائل ویژه وجود دارد [۱].

روش‌های حل عددی برای این‌گونه مسائل در مهندسی هوافضا برای تجزیه و تحلیل پایداری آیرولاستیک مانند فلاتر (بال‌زدن)، شوک یا ضربه‌زدن، نوسانات سیکلی [۲]، طراحی هواپیما [۳و۴] و هلی کوپتر [۵و۶] و در مهندسی مکانیک در زمینه دریایی بررسی اثرات سیال (آب) بر روی پروانه کشتی صورت گرفته و همچنین بررسی توربین‌های بادی و توربین‌های بخار و گاز براساس تعامل سیال و سازه است. در مهندسی عمران به تحلیل پل‌ها و ساختمان‌های بلند پرداخته و در

مهندسی پزشکی برای تجزیه و تحلیل قلب، درچه‌های قلب و جریان خون در رگ‌ها و عروق استفاده می‌شود [۷و۱].

میچلر<sup>۲</sup> [۸] در سال ۲۰۰۳ در مقاله روش یکپارچه برای تعامل سیال-سازه، به مقایسه روش‌های حل، تقسیم و یکپارچه برای شبیه‌سازی عددی یک تعادل سیال-سازه پرداخته شده است. یک شبکه پالایش (تصحیح) برای ارزیابی دقت زمانی از این روش‌ها بیان گردیده که هزینه‌ها و راندمان محاسباتی آن‌ها نیز مقایسه شده است. همچنین، یک آزمایش عددی برای یک مسئله یک‌بعدی، تعامل پیستون با سیال، انجام گردید.

هابنر<sup>۳</sup> [۹] در سال ۲۰۰۴ در مقاله روش یکپارچه برای تعامل سیال و سازه با استفاده از المان محدود بعد چهارم، روش حل‌های همزمانی را برای مسائل تعامل سیال-سازه بیان کرده است. در این مقاله به حل همزمان معادلات غیرخطی الاستیک سازه در تعامل با سیال لزج تراکم‌ناپذیر پرداخته شده، در روش یکپارچه فرم گسسته از بقای جرم و بقای مومنتم سیال برای تمام سامانه سیال-سازه، معادلات در یک سامانه تک‌فرموله شده است و یک حلقه تکرار تک‌مش متحرک سیال حل می‌گردد.

چارکراباتیک<sup>۴</sup> [۱۰] در سال ۲۰۰۵ در کتاب مدل‌های عددی در تعامل سیال-سازه طیف گسترده‌ای از تکنیک‌های محاسبات عددی در زمینه‌های تخصصی مکانیکی سیالات مدل‌ها محاسبات عددی برای اثر سیال بر روی سازه در زمینه دریایی معرفی گردیده است. با توجه به مدل فیزیکی از مسائل تعامل، فرمولاسیون پایه ریاضی از تعامل سیال-سازه و مدل‌سازی‌های عددی بررسی شده است.

دول و هال<sup>۵</sup> [۱۱] در سال ۲۰۰۱ در مقاله مدل از تعامل سیال-سازه به بررسی مدل‌های مختلف سیال پرداخته شده است و طیف گسترده‌ای از مدل‌های سیالاتی را بیان نموده است. همچنین، به شرح مدل‌های مختلف فیزیکی برای یک حرکت وابسته به زمان برای سیال و سپس به بحث در مورد تمایز حرکت بین مدل‌های خطی و غیرخطی، مدل زمانی خطی و راه‌حل‌های این مدل به‌صورت زمانی یا دامنه فرکانسی و مدل‌های مختلف برای روش‌های غیرخطی از جمله گام زمانی، موازنه هارمونیک، سامانه‌های شناسایی پرداخته است. در این

2- Michler

3- Hubner

4- Charkrabati

5- Dowell and Hall

1- Fluid-Structure Interaction: (FSI)

اختیاری و بعد چهارم برای تعامل سیال-سازه، پیشرفت‌های تعامل سیال-سازه و تکنیک‌های بعد چهارم، نرم‌افزارهای عمومی و نمونه مدل‌های تعامل سیال-سازه همچنین به تحلیل چند مثال: تعامل سیال-سازه در قلب و عروق، تعامل سیال-سازه در چتر نجات و تعامل سیال-سازه در آیرودینامیک توربین بادی پرداخته شده است.

روش مرز غوطه‌ور اولین بار توسط پسکین<sup>۵</sup> [۱۵] در سال ۱۹۷۲ برای محاسبه جریان خون در سامانه قلب و عروق استفاده نمود. به تدریج چندین تصحیح برای افزایش دقت، پایداری و محدوده کاربرد این روش انجام شد. در مقاله روش‌های مرز غوطه‌وری در سال ۲۰۰۲ به بیان معادلات حاکم حرکت، بیان تعامل سیال-سازه و گسسته‌سازی معادلات پرداخته شده است.

در این تحقیق یک مدل پره توربین مورد تحلیل تعامل سیال-سازه قرار داده شده است که این تحلیل به صورت کوپل دوطرفه سیال و سازه انجام گردید و میدان‌های سیال و سازه به طور همزمان مورد تحلیل قرار گرفته است. این گونه تحلیل بر روی این مدل پره توربین دیده نشده است که به بررسی آن پرداخته شد. همچنین در تحلیل بر روی پره توربین، در بیش تر موارد پره به صورت صلب در نظر گرفته می‌شود که در این تحلیل به صورت یک جسم قابل انعطاف می‌باشد و تاثیر این انعطاف‌پذیری بر روی جریان سیال بررسی شده است.

هدف بررسی تاثیر سیال بر وروی یک مدل پره توربین می‌باشد که این تاثیر به صورت جابجایی یا تغییر شکل پره بیان شده است. مدل پره توربین همراه با میدان سیال آن مدل‌سازی شده و جریان‌های با سرعت ورودی مختلفی از روی پره توربین عبور داده شد و جابجایی نوک پره توربین بررسی گردید. همچنین، فشار وارد شده بر پره در سه مکان مختلف آن در حالت کوپل و غیرکوپل مقایسه شده است. و تاثیر انحراف پره بر روی فشار سیال بیان گردیده است.

## ۲- معادلات حاکم بر مسئله

دامنه تعامل سیال و سازه در وضعیت اولیه به صورت  $\Omega_0 \subset R^n$  داده شده است و همچنین به عنوان وضعیت مرجع عمل می‌کند.  $\Omega_t \subset R^n$  یعنی وضعیتی از  $\Omega_0$  که در آن زمان  $t$  وجود دارد وابسته به زمان است. دامنه  $\Omega_0$  به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\Omega_0 = (\Omega_1)_0 \cup (\Omega_2)_0 \quad (1)$$

مقاله آیرودینامیک یک ایرفویل نیز بررسی و نمودارهای آیرودینامیک آن مورد مطالعه قرار گرفته است.

مورند و آهایون<sup>۱</sup> [۱۲] در سال ۱۹۹۵ تعدادی از مدل‌های عددی برای مدل نمودن ارتعاش خطی از سازه الاستیک، کوپل با سیال داخلی ارائه نموده‌اند. همچنین، برنامه‌های کاربردی متمرکز روی نوسانات، هیدرو الاستیک و نویزهای سازه پرداخته شده است.

میتال و لاکارینو<sup>۲</sup> [۱۳] در سال ۲۰۰۵ در مقاله مدل‌های مرز غوطه‌وری، ابتدا به بیان روش مرز غوطه‌وری پرداخته و سپس به بررسی اعمال شرایط مرزی در مرزها غوطه‌وری، جریان با مرز الاستیک، جریان با مرز سفت و محکم، روش‌های گسسته‌سازی، اعمال شرایط مرزی غیرمستقیم، اعمال شرایط مرزی مستقیم، جریان با مرز متغیر پرداخته شده است و همچنین، چند نمونه مثال نیز بررسی گردیده است که به شرح زیر است:

۱- جریان گذرنده از یک میله آویخته،

۲- جریان گذرنده از یک وانت،

۳- جریان گذرنده از یک کره و

۴- بال‌بال‌زدن و چرخیدن بدن انسان در سقوط آزاد.

هویو و وانگ<sup>۳</sup> [۱۴] در سال ۲۰۱۲ در مقاله روش‌های عددی برای تعامل سیال و سازه، به تعامل بین جریان سیال تراکم‌ناپذیر و سازه غوطه‌ور یک پدیده غیرخطی چندفیزیکی پرداخته شده است. در ابتدا تعامل سازه و سیال تعریف گردیده و به بررسی روش‌های تقسیم و یکپارچه و رسم شکل به بیان مش منطبق و غیر منطبق پرداخته است. همچنین، در این مقاله فرمولاسیون مسائل تعامل سیال-سازه، روش مش منطبق و محاسبه تعامل سیال-سازه با استفاده از روش غوطه‌وری بررسی شده است. روش غوطه‌وری یک روش مش غیرمنطبق بوده است. که در این مقاله به بررسی فرمولاسیون اساسی، روش مرز غوطه‌وری، روش دامنه غوطه‌ور و دیگر روش‌های غوطه‌وری پرداخته شده است.

بازلوز، تاکیزاوا و تزدویار<sup>۴</sup> [۱] در سال ۲۰۱۳ در کتاب محاسبات تعامل سیال و سازه، به بررسی، تعریف و روش‌های محاسباتی تعامل سیال-سازه پرداخته است. این کتاب شامل فصل‌های معادلات عمومی مکانیک سیالات و سازه، مدل المان محدود برای دامنه غیرمتحرک مدل بعد چهارم و اویلر لاگرانژ

1- Morand and Ohayon

2- Mittal and Iaccarinv

3- Hou and Wang

4- Bazilevs, Takizawa and Tezduyar

5- Peskin

$(\Omega_1)_0$  دامنه سطح مشترک سیال و سازه را در وضعیت اولیه نشان می‌دهد و  $\Gamma_I$  همین وضعیت را در شرایط کلی به صورت کامل نشان می‌دهد.

تبصره ۱:  $(\Omega_2)_0$  زیرمجموعه سازه است که در ارتباط با وضعیت کلی از سازه در زمان  $t = 0$  است.  $(\Omega_1)_0$  زیرمجموعه سیال است که معمولاً مستقل از وضعیت کلی سیال در زمان  $t = 0$  است.

$(\Omega_1)_0$  زیرمجموعه سیال، انتخاب مناسبی برای تجزیه و تحلیل تعامل سیال-سازه است.  $(\Omega_2)_t$  زیرمجموعه سازه، به طور معمول در ارتباط با موقعیت کلی سازه در زمان  $t$  است که ماهیت آن از روش لاگرانژ در مکانیک جامدات است. برای ملاحظات در دقت و سادگی محاسبات تعامل سیال-سازه،  $(\Omega_1)_t$ ،  $(\Omega_2)_t$  تعریف شده‌اند.

با توجه به مطالب بالا که گفته شد، فرمولاسیون تعامل سیال-سازه شروع می‌شود، سرعت و فشار سیال  $p \in S, u \in S, u$  و تغییرات سازه  $y \in S, y$  می‌باشد:

$$\forall w_1 \in v, u, q_1 \in v, p, w_2 \in v, y, \text{ که}$$

$$\int_{(\Omega_1)_t} W_1 \cdot \rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \cdot \nabla u - f \right) d\Omega + \int_{(\Omega_1)_t} \varepsilon(W_1) : \sigma_1 d\Omega -$$

$$\int_{\Gamma_{1E}} W_1 \cdot h_{1E} d\Gamma + \int_{(\Omega_1)_t} q_1 \nabla u d\Omega +$$

$$\int_{(\Omega_2)_t} W_2 \cdot \rho_2 \left( \frac{d^2 y}{dt^2} - f_2 \right) d\Omega +$$

$$\int_{(\Omega_2)_t} \varepsilon(w_2) : \sigma_2 d\Omega - \int_{\Gamma_{2E}} W_2 \cdot h_{2E} d\Gamma = 0$$

(۵)

معادله (۵) از دو قسمت تشکیل گردید است قسمت اول آن در ارتباط با میدان سیال و قسمت دوم آن در ارتباط با میدان سازه می‌باشد. که از معادلات اساسی سیال (قانون برنولی) و سازه (قانون نیوتن) پیروی می‌کنند.

### ۳- مدل سازی

توربین دارای ۴۰ عدد استاتور و روتور می‌باشد که فاصله بین استاتور و روتور ۱۰ میلی‌متر، فاصله بین پره‌ها با پوسته ۰/۵ میلی‌متر که روتور با سرعت دورانی ۵۰۰ رادیان بر ثانیه در حال دوران می‌باشد. با توجه به این که تعداد استاتور و روتور با هم برابر می‌باشند یک ردیف از آن در نظر گرفته می‌شود. مدل سازی استاتور و روتور و پره توربین در شکل ۳ نشان داده

که در آن،  $(\Omega_1)_0$  و  $(\Omega_2)_0$  زیرمجموعه‌ای از  $\Omega_0$  که شامل سیال و سازه می‌باشد. در اینجا اندیس (۱ و ۲) در معادلات به ترتیب بیانگر سیال و سازه است. دامنه‌های سیال و سازه هیچ وجه مشترکی با هم ندارند.

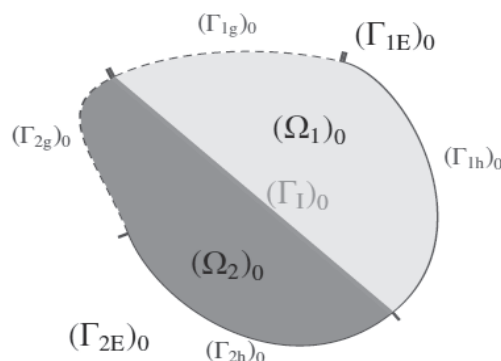
$$(\Omega_1)_0 \cap (\Omega_2)_0 = \emptyset \quad (۲)$$

به طور مشابه برای  $\Omega_t$  داریم:

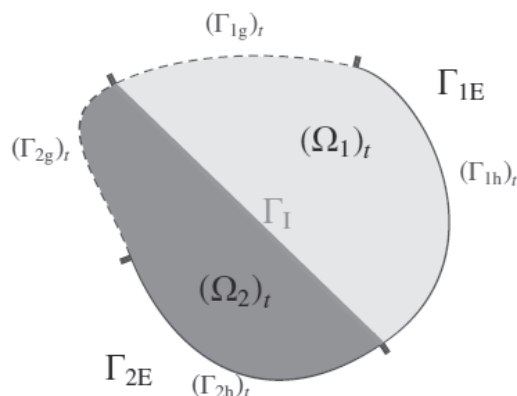
$$\Omega_0 = \overline{(\Omega_1)_t \cup (\Omega_2)_t} \quad (۳)$$

$$(\Omega_1)_t \cap (\Omega_2)_t = \emptyset \quad (۴)$$

برای درک بهتر مسائل و شرایط مرزی در سطح مشترک سیال و سازه یک علامت دیگری در نظر گرفته شده است. در این علامت زیرنویس "I" به مرز سطح مشترک سیال و سازه اشاره دارد و زیرنویس "E" به دامنه مرزهای دیگر سیال و سازه اشاره دارد (شکل ۱ و ۲).



شکل (۱۰): دامنه فضایی برای فرمولاسیون تعامل سیال-سازه.



شکل (۲۰): دامنه فضایی برای فرمولاسیون تعامل سیال-سازه.

### ۶- نتایج تحلیل و اعتبارسنجی

ابتدا برای مستقل کردن میدان سیال از مش به تحلیل چند نمونه مش بندی پرداخته شده و سپس با بررسی تغییرات فشار در چند نقطه بهترین روش مش بندی انتخاب گردیده است که در جدول ۲ انواع مش بندی همراه با فشار در چند نقطه از پره آورده شده است.

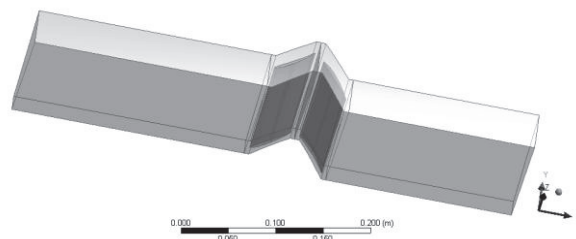
در جدول ۲ به بررسی تأثیر مقادیر مش بر تحلیل پرداخته شده و بهترین مش انتخاب گردیده است، در دو ستون آخر تعداد مش در میدان روتور نسبت به میدان استاتور بیش تر می باشد که نتایج بسیار بهتری را نشان می دهد.

در مرحله بعد به اعتبارسنجی تحلیل با بررسی فشار در نوک پره توربین پرداخته شده است. نتایج تحلیل با یک مقاله مقایسه شده و نتایج حاصل نزدیک به هم و قابل قبول می باشد. ابتدا به بررسی کانتورهای فشار و سرعت، اطراف روتور در حالت اولیه پرداخته شده که در شکل های ۹-۴ نشان داده شده است. در شکل ۴ کانتور فشار بر نوک روتور نشان داده شد و با نتایج یک مقاله مقایسه گردیده است و نتایج نزدیک به هم و قابل قبولی را دارد.

### جدول (۲): مستقل از مش کردن میدان حل.

متغیرها تعداد مش به میلیون	P center	P center Shell	P 250	P 250.5	همگرایی
۱/۴	-۵۸۰/۰۴	-۱۸۲/۸	-۸۳۴/۳۶	-۷۶۴/۴۲	همگرایی ضعیف
۱/۴۹	-۵۸۵/۰۸	-۴۵۹/۶۱	-۸۶۸/۳۹	-۸۰۳/۳۹	همگرایی ضعیف
۱/۶۸	-۵۴۵/۳۵	-۴۳۸/۹۵	-۸۷۲/۲۳	-۸۴۷/۳	همگرایی ضعیف
۱/۹۳۸	-۱۰۲۳/۳	-۸۲۵/۸۳	-۱۱۴۴/۲	-۱۰۸۲/۵	همگرایی قوی
A1/۶۶	-۹۹۵/۱۳	-۸۳۰/۷۳	-۱۰۴۴/۷	-۱۰۸۲/۳	همگرایی متوسط
A1/۷	-۹۶۵	-۸۰۹/۵	-۱۰۰۸/۲	-۱۰۵۱/۳	همگرایی قوی
۲			-۱۱۵۹	-۱۰۹۲	همگرایی قوی

شده است که طول آن ۱۵۰ میلی متر، وتر آن ۵۰ میلی متر، مقطع آن ایرفویل NACA4506 و جنس آن آلومینیوم می باشد.



شکل (۳۰): مدل سازی استاتور و روتور.

### ۴- شرایط مرزی

مسئله از دو میدان تشکیل شده، یکی استاتور و دیگری روتور می باشد که هر کدام جداگانه دارای شرایط مرزی می باشد که به صورت کلی در جدول ۱ بیان شده است.

### جدول (۱): شرایط مرزی میدان سیال.

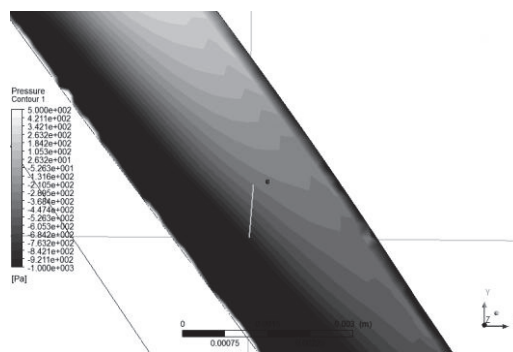
صفحات	شرایط مرزی	مقدار شرایط مرزی
ورودی	سرعت	۴۴/۳۸ i-۶۱/۰۸ j+۰ k
خروجی	فشار استاتیکی	۰
روتور	تعامل سیال-سازه	-
استاتور	دیواره	-
تویی و پوسته	دیواره	-
صفحات جانبی	تناوبی، دورانی	-

### ۵- مدل حل

حل این گونه مسائل به صورت کوپل سیال-سازه و گذرا می باشد در نتیجه قسمت سازه ای و سیالاتی نرم افزار باید به صورت همزمان به تحلیل مسئله پردازد و به علت گذرابودن حل باید گام زمانی مناسب، برابر با ۰/۰۰۱ برای قسمت سازه و سیال انتخاب گردد. دقت گسسته سازی معادلات را به صورت مرتبه بالا، مدل توربالانسسی SST با مرتبه بالا، میزان همگرایی مومنتوم، انرژی و جرم به میزان  $10^{-6}$  انتخاب شده است.

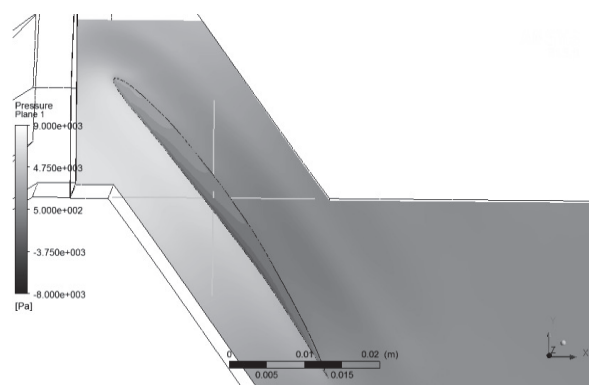
در این تحلیل روتور دارای جابجایی می باشد در نتیجه نیاز است که مش بندی قابلیت درک این جابجایی را داشته باشد، برای همین از حدود ۱/۷ میلیون مش استفاده شده است به این نکته نیز باید توجه داشت که در هر کوپل مش بندی باید دوباره صورت گیرد در نتیجه تعداد مش در زمان حل و حجم تحلیل ها بسیار مهم می باشد. این تحلیل به علت گذرا و کوپل بودن به چندین هفته زمان و سامانه با حافظه ذخیره سازی و پردازنده نسبتا بالایی را نیاز دارد.

می‌رسد که نمودار استخراج شده از مقاله نیز همین نتایج را نشان می‌دهد. تغییرات بین  $-0/7$  و  $0/7$  است. در شکل ۶ کانتور فشار اطراف نوک پره توربین نشان داده شده است. در کانتور فشار، فشار در پایین پره با گذر از لبه پره سریع افزایش می‌یابد و تا  $6,000$  پاسکال می‌رسد، ولی تغییرات فشار در لبه بالایی با شیب کمتری و تا  $4,000$  پاسکال افزایش می‌یابد که این تغییر را می‌توانید در نمودار بالا نیز مشاهده کنید.

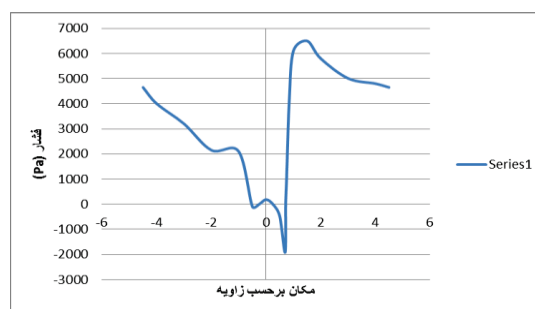


شکل (۴): کانتور فشار در مرکز نوک روتور.

در شکل ۶ نمودار تغییرات فشار بر نوک روتور می‌باشد که توسط آلشروف<sup>۱</sup> [۱۶] و همکارانش در سال ۲۰۱۲ به دست آمده است.

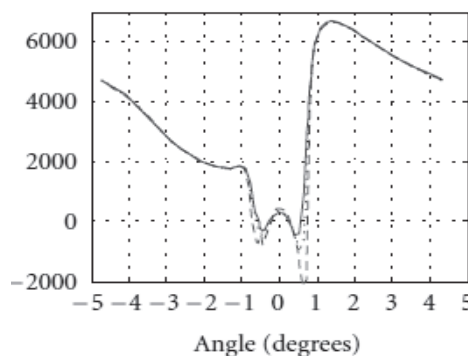


شکل (۷): کانتور فشار در اطراف نوک روتور.



شکل (۵): نمودار تغییرات فشار در مرکز نوک روتور

و اطراف آن.



شکل (۶): نمودار تغییرات فشار در مرکز نوک روتور و اطراف آن [۱۶].

شکل ۴ و شکل ۵، کانتور و نمودار فشار نوک پره نشان می‌دهد که فشار از مرکز به سمت هر طرف کاهش می‌یابد و این کاهش در سمت پایین خیلی شدید بوده و به  $-2000$  پاسکال

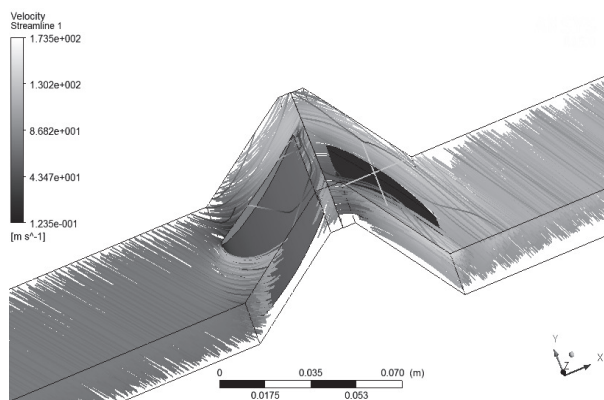
جدول (۳): میزان درصد خطا حل تحلیلی.

Angle	میزان فشار بر روی نوک روتور		درصد خطا
	حل تحلیلی	حل تحلیلی مرجع	
۴/۵	۴۶۵۰	۴۸۰۰	۳/۲۲
۴	۴۸۰۰	۵۰۰۰	۴/۱۶
۳	۵۰۱۰	۵۲۰۰	۳/۷۹
۲	۵۸۰۰	۶۱۰۰	۵/۱۷
۱/۵	۶۵۰۰	۶۸۰۰	۴/۶۱
۱	۶۱۰۰	۶۰۰	۱/۶۴
۰/۸۵	۴۱۲۰	۴۰۰۰	۲/۹۱
۰/۷۵	۹۲۰	۱۰۰۰	۷/۸۷
۰/۷۲	۰	۰	-
۰/۷	-۱۹۲۰	-۲۰۰۰	۴/۱۶
۰/۵	-۴۷۰	-۵۰۰	۶/۳۸
۰/۲۵	۰	۰	-
۰	۱۸۵	۲۰۰	۸/۱
-۰/۲۵	۰	۰	-
-۰/۵	-۹۵	-۱۰۰	۵/۲۶
-۱	۲۱۰۰	۲۰۰۰	۴/۷۶
-۲	۲۱۵۰	۲۰۰۰	۶/۹۷
-۳	۳۲۰۰	۳۰۰۰	۶/۲۵
-۴	۴۰۰۰	۴۰۰۰	۰
-۴/۵	۴۶۵۰	۴۸۰۰	۳/۲۲

به خاطر این است که لبه جلو پره محل برخورد پره با سیال پراثرژی و لبه انتهایی محل گذر سیال می باشد.

ب- کانتور سرعت در اطراف پره:

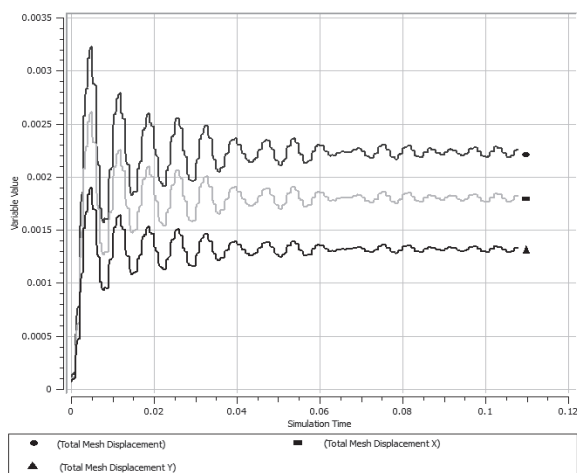
در شکل ۱۰ سرعت جریان در اطراف استاتور و روتور نمایش داده شده است. همان گونه که می دانید یکی از وظایف استاتور، افزایش سرعت جریان و هدایت جریان برای روتور، که در شکل ۱۰ این وظیفه را به خوبی می توانید ببینید. سرعت جریان با عبور از استاتور در حدود دو برابر شده و به صفحه پایین روتور هدایت شده است. در اینجا همچنین می توان نقش صفحات تناوبی دورانی را هم بهتر درک کرد، جریان با برخورد به هریک از آن ها از صفحه متناظر خودش ادامه پیدا می کند.



شکل (۱۰): کانتور سرعت جریان اطراف استاتور و روتور.

۲- بررسی جابجایی نوک پره توربین با افزایش سرعت ورودی جریان:

تغییرات روتور در سرعت ورودی V:



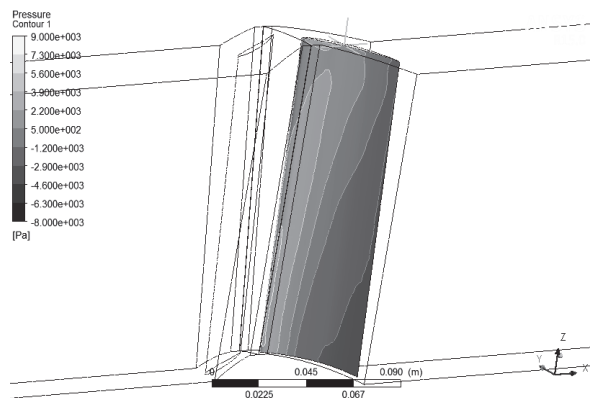
شکل (۱۱): نمودار جابجایی نوک روتور نسبت به زمان در

سرعت ورودی V.

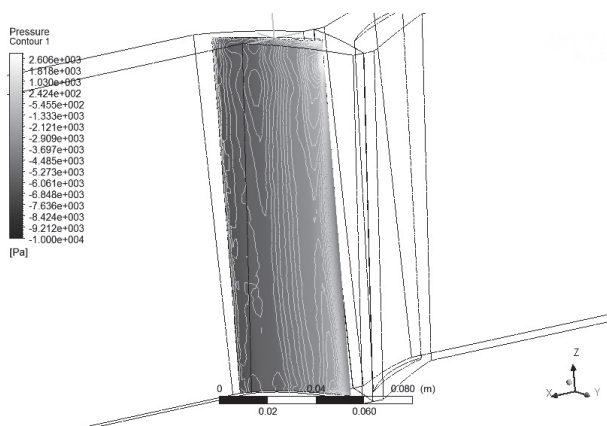
در جدول ۳ میزان درصد خطا تحلیلی عددی به حل مرجع را نشان می دهد، که نتایج آن اعتبارسنجی قابل قبولی را به همراه دارد و تحلیل قابل قبولی با درصد خطای کم می باشد.

اکنون به بررسی فشار و سرعت جریان بر روی پره توربین پرداخته می شود.

الف- کانتور فشار بر روی پره توربین:



شکل (۸): کانتور فشار در صفحه پایینی روتور.

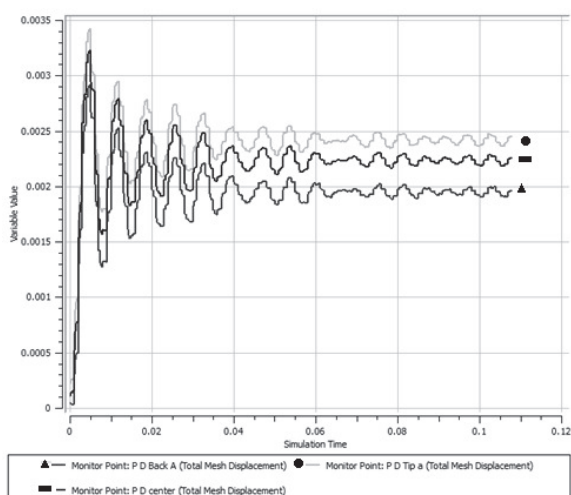


شکل (۹): کانتور فشار در صفحه بالایی روتور.

شکل های ۸ و ۹، کانتور فشار بر در دو صفحه بالا و پایین روتور نشان می دهد که فشار در صفحه پایینی بیش تر از بالایی و همچنین فشار در صفحه بالایی به طور میانگین نزدیک به صفر بوده و فشار در صفحه پایین به طور میانگین حدودا ۵,۰۰۰ پاسکال، که فشار چندان زیادی نیست ولی باید توجه داشت که تغییرات فشار در صفحه پایینی، متغیر و از پایین به بالا افزایش می یابد.

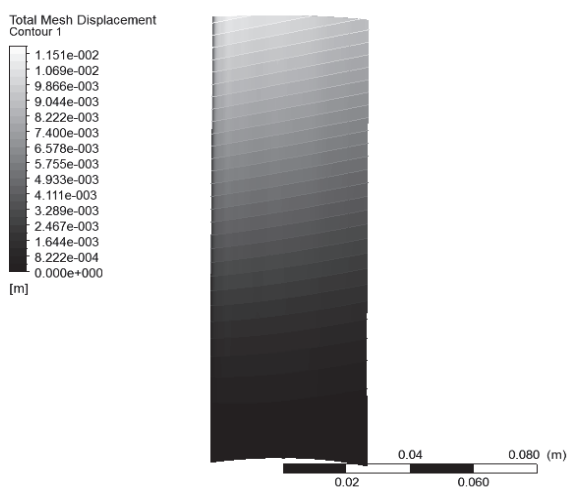
فشار در لبه جلو پره بیش ترین مقدار را دارد و با عبور جریان از روی پره در انتهای آن فشار وارده کاهش می یابد که علت آن

با توجه به شکل ۱۳ با افزایش سرعت ورودی به ۱/۵۷ نوک روتور به میزان ۱۱ میلی متر جابجایی دارد این میزان جابجایی تاثیر بسزایی بر روی جریان سیال نیز دارد. همچنین، این جابجایی نوک روتور باعث افزایش فشار در راستار محوری روتور نیز می گردد.



شکل (۱۴): تغییرات ابتدا، مرکز و انتهای نوک روتور برای در سرعت V.

شکل ۱۴ جابجایی ابتدا، مرکز و انتهای نوک روتور را نشان می دهد که اختلاف جابجایی ابتدا و انتها آن بسیار ناچیز و قابل چشم پوشی می باشد. در نتیجه میزان پیش روتور بسیار ناچیز است.



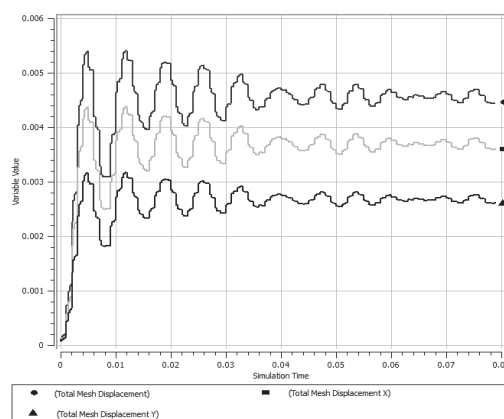
شکل (۱۵): کانتور تغییر شکل در طول پره توربین.

در شکل ۱۵ کانتور تغییر شکل در سرتاسر پره توربین نشان داده شده است. همان گونه که از شکل کانتور مشاهده می شود،

در شکل ۱۱، تغییرات نوک روتور را برای جنس سوم در حدود ۲/۲ میلی متر عمود بر سطح روتور نشان داده است همانند جنس شماره ۲ نوسانات اولیه نوک روتور به علت مود ارتعاشی پایین، کند به حالت پایدار می رسد و در حالت پایداری دامنه نوسانی ۰/۱ میلی متر می شود.

همچنین، تغییرات در دو جهت X و Y نیز داده شده است که منطبق بر اطلاعات زاویه نصب روتور و تغییرات کل، می باشد.

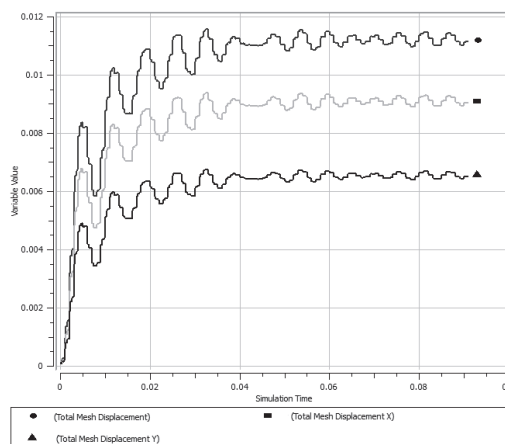
### تغییرات روتور در سرعت ورودی ۱/۲۵۷:



شکل (۱۲): نمودار جابجایی نوک روتور نسبت به زمان در سرعت ورودی ۱/۲۵۷.

با توجه به شکل ۱۲ با افزایش سرعت ورودی به ۱/۲۵۷ نوک روتور به میزان ۴/۵ میلی متر جابجایی دارد که به نسبت حالت قبل افزایش دو برابری را داشته است. شکل بالا نشان می دهد که بعد ۰/۰۴ ثانیه جابجایی نوک روتور به حالت پایای خود رسیده است.

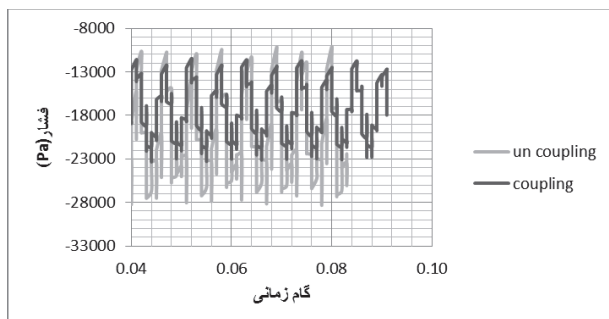
### تغییرات روتور در سرعت ورودی ۱/۵۷:



شکل (۱۳۰): نمودار جابجایی نوک روتور نسبت به زمان در سرعت ورودی ۱/۵۷.



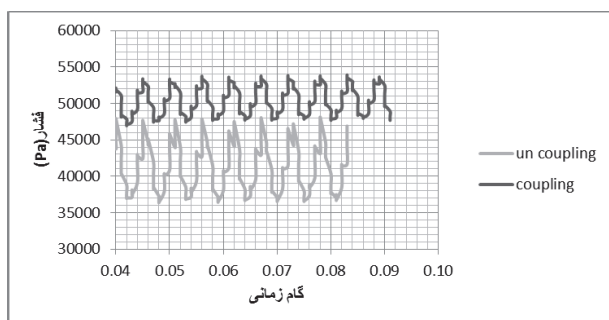
مرحله به علت جابجایی زیاد نوک روتور اختلاف محدوده فشار در حالت کوپل و غیرکوپل افزایش یافته است.



شکل (۱۸): تغییرات فشار در نقطه‌ای در جلوی نوک روتور برای سرعت ورودی ۱/۵V در دو حالت کوپل و بدون کوپل.

شکل ۱۸ تغییرات فشار در نقطه‌ای در جلوی نوک روتور برای سرعت ورودی ۱/۵V در دو حالت کوپل و بدون کوپل نشان می‌دهد.

این نمودار، تغییرات فشار در نقطه‌ای در جلوی نوک روتور برای سرعت ورودی ۱/۵V در حالت کوپل بین ۲۲۷۸۷- تا ۱۱۷۳۰- و در حالت غیرکوپل بین ۲۸۲۲۰- تا ۱۰۱۱۰- نشان می‌دهد.

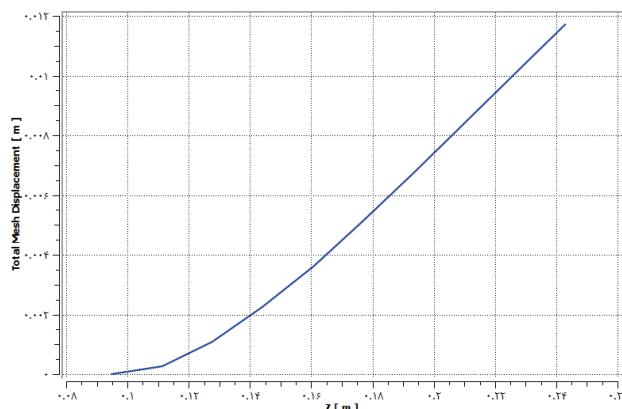


شکل (۱۹): تغییرات فشار در نقطه‌ای روی سطح پایین روتور برای سرعت ورودی ۱/۵V در دو حالت کوپل و بدون کوپل.

شکل ۱۹ تغییرات فشار در نقطه‌ای در صفحه پایین روتور برای سرعت ورودی ۱/۵V در دو حالت کوپل و بدون کوپل نشان می‌دهد.

این شکل تغییرات فشار در نقطه‌ای روی سطح پایین روتور برای سرعت ورودی ۱/۵V در حالت کوپل بین ۴۷۸۸۱ تا ۵۳۷۴۶ و در حالت غیرکوپل ۳۶۶۸۰ تا ۴۸۰۹۰ پاسکال نشان می‌دهد که میزان فشار در حالت کوپل نسبت به حالت غیرکوپل افزایش یافته است.

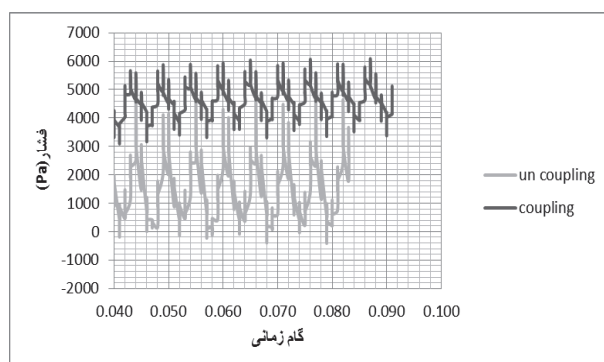
میزان جابجایی عرضی و تغییر شکل در طول پره به صورت خطی می‌باشد.



شکل (۱۶): نمودار تغییر شکل در طول پره توربین.

در شکل ۱۶ تغییر شکل در طول پره توربین را به صورت نمودار نشان داده است همان‌طور که مشاهده می‌کنید، این تغییر شکل در طول پره توربین خطی می‌باشد و نزدیک به ۱۲ میلی‌متر تغییر شکل دارد.

۳- بررسی تغییرات فشار بر روی روتور در حالت سوم: اکنون به بررسی تغییرات فشار در نقاط مختلف برای سرعت ورودی ۱/۵V پرداخته شده است. شکل ۱۷ تغییرات فشار در نقطه مرکزی رو نوک روتور برای سرعت ورودی ۱/۵V در دو حالت کوپل و بدون کوپل نشان می‌دهد.



شکل (۱۷): تغییرات فشار در نقطه‌ای روی نوک روتور برای سرعت ورودی ۱/۵V در دو حالت کوپل و بدون کوپل.

طبق شکل ۱۷ تغییرات فشار نقطه‌ای نوک روتور برای سرعت ورودی ۱/۵V در حالت کوپل بین ۳۳۵۲ تا ۶۰۸۸ و در حالت غیرکوپل ۳۵۳- تا ۴۸۰۳ پاسکال نشان می‌دهد. در این

- Mechanics and Fluid-Structure Interaction", pp.1833-1839, 2010.
- Farhat, C. "Parallel and Distributed Solution of Coupled Nonlinear Dynamic Aeroelastic Response. In: Papadrakakis M, Editor. Parallel Solution Methods in Computational Mechanics", Chichester: John Wiley & Sons, 1997.
  - Rifai, S., Johan, Z., Wang W.P., Grisval, J.P., Hughes, T.J.R. and Ferencz M. "Multiphysics Simulation of Flow Induced Vibrations and Aeroelasticity on Parallel Computing Platforms. Comp Meth Appl MechEng", Vol.174, No's. 3-4, pp.393-417, 1999.
  - Pahlke, K., "Berechnung Von Strömungsfeldern um Hubschrauberrotoren im Vorwärtsflug Durch Die Lösung Der Euler-Gleichungen". DLR Forschungsbericht 1999-22, ISSN 1434-8454, 1999
  - Hierholz, K.H. "Ein Numerisches Verfahren Zur Simulation der Strömungs-Struktur-Interaktion am Hubschrauberrotor, PhD Thesis, Universit at Stuttgart, 1999.
  - Dubini, G., Pietrabissi, R. and Montevecchi F.M. "Fluid-Structure Interaction in Biofluid Mechanics. Med Eng Phys", Vol. 17, No.2, pp. 609-617, 1995.
  - Michler, C., Hulshoff, S.J., Van Brummelen, E.H. and Borst, R. "A Monolithic Approach to Fluid-Structure Interaction", Vol. 33, No's. 5-6, pp.839-848, 2004.
  - Hubner, B., Walhorn, E. and Dinkler, D. "A Monolithic Approach to Fluid-Structure Interaction Using Space-Time Finite Elements", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 193, No's. 23-26, pp. 2087-2104, 2004.
  - Chakrabarti, S.K. "Numerical Models in Fluid Structure Interaction, Advances in Fluid Mechanics", Vol. 42, WIT Press, 2005.
  - Dowell, E.H. and Hall, K.C. "Modeling of Fluid-Structure Interaction, Annual Review of Fluid Mechanics", Vol. 33, No.1, pp. 445-490, 2001.
  - Morand, H.J.P. and Ohayon, R. "Fluid-Structure Interaction: Applied Numerical Methods", Wiley, 1995.
  - Mittal, R. and Iaccarino, G. "Immersed Boundary Methods, Annual Review of Fluid Mechanics", Vol. 37, No.8, pp. 239-261, 2005.
  - Hou, G. and Wang, J. "Layton A Numerical Methods for Fluid-Structure Interaction A Review", Vol. 12, No. 2, pp. 337-377, 2012.
  - Peskin, C.S. "The Immersed Boundary Method, Acta Numerica", Vol. 11, pp. 479-517, 2002
  - Alshroof, O.N., Forbes, G.L., Sawalhi, N., Randall, R.B. and Yeoh, G.H. "Computational Fluid Dynamic Analysis of a Vibrating Turbine Blade", International Journal of Rotating Machinery, Vol. 2012, No.1, pp. 1-15, 2012.

سه نوار (۲ تا ۴) شکل‌های ۱۷ تا ۱۹ نشان می‌دهند که افزایش سرعت باعث افزایش فشار بر سطح روتور می‌گردد. همچنین، در حالت کوپل فشار وارده بر سطح زیرین روتور نسبت به حالت غیرکوپل افزایش یافته است.

#### ۷- نتیجه‌گیری

در کوپل یک‌طرفه سیال بر سازه تاثیر می‌گذارد، ولی در کوپل دوطرفه سیال و سازه هر دو بر هم تاثیر می‌گذارند. در نتیجه جابجایی روتور کانتورهای فشار نیز در اطراف روتور تغییر می‌کنند که در نمودارهای تغییرات فشار نسبت به زمان در حالت کوپل و غیرکوپل نشان داده شده است. همچنین، نتایج حاصل از کوپل دوطرفه نشان می‌دهد که فشار وارده بر سطح روتور از جلو روتور به مرکز روتور حرکت کرده است. در کل، فشار در حالت کوپل در سطح زیرین افزایش و در سطح بالای روتور کاهش می‌یابد.

تغییرات فشار بر روی روتور در حالت کوپل کم‌تر و ملایم‌تر از حالت غیرکوپل می‌باشد و تغییرات فشار حتی با بیش از ۵۰٪، کاهش همراه می‌باشد. که این نشان می‌دهد روتور خود را با جریان هماهنگ‌تر کرده است تا برخوردهای شدید با جریان سیال نداشته باشد.

تعامل سیال - سازه بر روی پره توربین در سه شرایط مختلف سرعت ورودی بررسی گردیده و میزان انحراف نوک پره برای حالت اول ۲/۲ میلی‌متر، حالت دوم ۴/۵ میلی‌متر و حالت سوم ۱۱ میلی‌متر شده است. میزان این انحراف‌ها نسبت به طول پره توربین به ترتیب ۱/۴۲٪، ۳٪ و ۷/۳٪ می‌باشد.

نتایج حاصل همچنین نشان می‌دهد که، پره علاوه بر انحراف اولیه در جای خود نوساناتی با دامنه ۰/۲ میلی‌متر دارد.

جابجایی ابتدا و انتهای نوک روتور بررسی شد و این جابجایی نسبت به طول آن بسیار ناچیز بوده و در نتیجه پیچش پره قابل چشم پوشی می‌باشد.

جابجایی پره توربین در راستای طولی آن نیز بررسی گردیده و نتایج نشان می‌دهد که این جابجایی و تغییر شکل خطی می‌باشد.

#### ۸- مراجع

- Bazilevs, Y., Takizawa, K. and Tezduyar, T.E. "Computational Fluid-Structure Interaction Methods and Applications", John Wiley, 2013.
- Brummelen, H.E. and Geuzaine, P. "Fundamentals of Fluid-Structure Interaction Computational Solid