



وزارت نیرو

پژوهشگاه نیرو

NRI

Niroy Research Institute



## خبرنامه تخصصی

## گروه پژوهشی پایش و کنترل نیروگاه

شماره ۱، زمستان ۱۳۹۶

«خبرنامه تخصصی گروه پژوهشی پایش و کنترل نیروگاه»

با هدف معرفی و ترویج دانش تخصصی گروه، مستندسازی یافته های نوین پژوهشی و انتشار به

موقع دستاوردهای علمی و عملی گروه، به صورت داخلی منتشر می شود.

موقع دستاوردهای علمی و عملی گروه، به صورت داخلی منتشر می شود.



NRI Combined Cycle Power Plant Simulator  
Developed by NRI © 2013.  
All rights reserved.



[www.nri.ac.ir](http://www.nri.ac.ir)

[M&C@nri.ac.ir](mailto:M&C@nri.ac.ir)





صاحب‌امتیاز: پژوهشگاه نیرو

مدیرمسئول: ادوارد غریبیان

سردبیر: ادوارد غریبیان

مدیر اجرایی: نوذر ایرانی

ویراستار و صفحه‌آرا: بهدخت امیدزاده



#### اهداف:

«بروندادهای تخصصی گروه پژوهشی پایش و کنترل نیروگاه» با هدف معرفی و ترویج دانش تخصصی گروه، مستندسازی یافته‌های نوین پژوهشی و انتشار به موقع دستاوردهای علمی و عملی گروه، به صورت داخلی منتشر می‌شود.

#### ناشر:

نشانی الکترونیکی: TC&HX @nri.ac.ir

نشانی: تهران، شهرک غرب، انتهای بلوار شهید دادمان،

پژوهشگاه نیرو، گروه پایش و کنترل نیروگاه

تلفن: ۰۲۱-۸۸۰۷۴۷۳۴

دورنگار: ۰۲۱-۸۸۵۹۰۱۷۱

#### همکاران این شماره:

علی پوره

امید بزاز

نوذر ایرانی



۱	مدلسازی آئرودینامیک توربین‌های بادی محور افقی
۱۳	شبیه‌سازی زمان-حقیقی
۲۸	تغییر تعریف چهار یکای پایه SI



## مدلسازی آئرو دینامیک توربین های بادی محور افقی

بخش اول: تئوری های پایه

نویسنده: علی پوره<sup>۱</sup>

چکیده:

در این مقاله، تئوری های مدل سازی مرسوم برای بخش آئرو دینامیک توربین های بادی محور افقی مرور می شود. مطالب ارائه شده به نحوی است که در نهایت به کاربردی ترین تئوری مورد استفاده در مدل سازی یعنی تئوری BEM بینجامد. بدین منظور، بعد از معرفی مفاهیم و قضایای پایه، ابتدا تئوری دیسک-محرك و دیسک-روتور معرفی خواهند شد. با کمک این دو تئوری، خواننده با مفاهیم موجود در آئرو دینامیک توربین بادی، همچون تئوری ممتنم، ضریب توان، پیشرانه و ضرایب القایی سرعت آشنا خواهد شد. سپس تئوری المان پره معرفی می گردد. در انتها نیز تشریح خواهد شد که چگونه ترکیب تئوری های المان پره و تئوری ممتنم به فرمول بندی تئوری BEM می انجامد.

کلیدواژه: توربین بادی، مدل سازی، آئرو دینامیک، تئوری BEM

مقدمه

ممتنم تشریح می شود که در واقع فرم تعمیم یافته قانون دوم نیوتن برای سیالات است. این تئوری شامل انتگرال هایی روی یک حجم کنترلی است که بیان کننده بقای جرم، تعادل بین ممان های زاویه ای و محوری و بقای انرژی هستند.

در ادامه چند مفهوم و قضیه پایه از مکانیک سیالات به صورت خلاصه ارائه می گردد. در ارائه این مفاهیم و قضایا، فرض بر این است که خواننده با مفاهیم پایه مکانیک نیوتنی آشناست.

حجم کنترلی: حجمی که نسبت به یک دستگاه مرجع اینرسی ثابت است و یا نسبت به آن با سرعت ثابت حرکت می کند و در داخل آن جریان

داشتن درک مناسب از آئرو دینامیک توربین بادی، مستلزم درک مفاهیمی مرتبط با فیزیک سیالات و آئرو دینامیک است. در این مقاله سعی خواهد شد، تئوری های مورد استفاده، حداقل امکان به زبان ساده بیان شوند؛ به نحوی که بتوان پدیده های اساسی در آئرو دینامیک توربین را توجیه نمود.

بخش آئرو دینامیک متصل به مدل دینامیکی توربین، تداخل بین جریان هوای محیط با توربین بادی را مدل سازی می کند. در این مدل سازی، استخراج انرژی باد توسط توربین، بر مبنای تئوری

۱- کارشناس پژوهشی گروه پایش و کنترل نیروگاه، پژوهشگاه نیرو، پست الکترونیک: [apoureh@nri.ac.ir](mailto:apoureh@nri.ac.ir)



قضیه برنولی: تحت شرایط دائمی، در یک حجم کنترلی، انرژی کل در سیال که شامل انرژی جنبشی (حاصل از فشار دینامیکی)، انرژی فشار استاتیکی و انرژی پتانسیل جاذبه‌ای می‌باشد، به شرطی که روی یا توسط سیال واقع در حجم مذکور کاری انجام نشود، ثابت باقی خواهد ماند. بنابراین مطابق با این قضیه، رابطه زیر بر واحد حجم شار برقرار خواهد بود:

$$\frac{1}{2}\rho V^2 + p + \rho gh = \text{constant} \quad (4)$$

برای استخراج مدل آئرو دینامیکی توربین بادی، بسته به هدف، می‌توان از دیدگاه‌های مختلف که سطوح پیچیدگی و فرض‌های ساده شونده متفاوتی دارند، استفاده نمود. در ادامه تئوری‌های مطرح در این زمینه ارائه می‌گردد.

### تئوری دیسک-محرك رانکین-فروید<sup>۱</sup>

این تئوری ارائه دهنده اولین مدلی بوده است که نیروهای آئرو دینامیکی توربین بادی را به صورت ریاضی بیان نموده است. در این مدل، روتور توربین با یک دیسک جایگزین می‌شود. این دیسک یک سطح دایره‌ای با ضخامت صفر است که می‌تواند اختلاف فشار ایجاد نماید و در نتیجه باعث افت سرعت جریان هوای عبوری از خود گردد. از لحاظ فیزیکی، دیسک می‌تواند توسط یک روتور با تعداد بی‌نهایت تیغه بسیار باریک که با سرعتی بسیار بالاتر از سرعت باد در حال چرخش هستند، تقریب زده شود. بنابراین مدل

پیوسته‌ای از مایع یا گاز وجود دارد. سطحی که حجم کنترلی را در بر دارد، سطح کنترلی نامیده می‌شود.

نرخ شار ممتم خطی: در یک حجم کنترلی ثابت، بردار نرخ شار ممتم خطی، مشابه با مکانیک اجسام صلب، به صورت زیر تعریف می‌شود:

$$\begin{aligned} \vec{P} &= \text{ممتم} \times \text{نرخ شار جرم} = \text{نرخ شار ممتم} \\ &= m\vec{V} = \rho A(\vec{V} \cdot \vec{n})\vec{V} \\ &= \rho A V_n \vec{V} \end{aligned} \quad (1)$$

که در معادله فوق،  $\vec{V}$  بردار سرعت شار و  $\vec{n}$  بردار عمود بر سطح می‌باشد.

تئوری بقای ممتم: برای هر سیال در حالت دائم، در هر لحظه از زمان، برآیند نیروی وارده بر شار در حال حرکت در داخل یک حجم ثابت، برابر با نرخ خالص ممتم شار خارج شونده از آن حجم می‌باشد. به عبارت دیگر

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \frac{d\vec{P}}{dt} + \vec{P}_{out} - \vec{P}_{in} \\ &= \vec{P}_{out} - \vec{P}_{in} \end{aligned} \quad (2)$$

که  $\vec{P}$  ممتم لحظه‌ای در داخل شار می‌باشد که از رابطه  $\iiint \rho \vec{V} dV$  محاسبه می‌شود. نرخ این ترم در حالت دائم صفر است. با توجه به تعریف نرخ ممتم،  $\vec{P}_{out} - \vec{P}_{in}$  از یک انتگرال سطح به شکل زیر محاسبه خواهد شد.

$$\begin{aligned} \vec{F} &= \vec{P}_{out} - \vec{P}_{in} \\ &= \iint \rho(\vec{V} \cdot \vec{n})\vec{V} dA \end{aligned} \quad (3)$$

<sup>۱</sup> Rankine-Froude actuator-disc theory



بلافاصله بعد از پره ها قرار دارد (۴) ناحیه *wake* دور دست

به دلیل پیوستگی سرعت می توان گفت  $V_2 = V_3 = V_D$ . مطابق با فرضیات فوق، نرخ شار جرمی در هر جایی از تیوب باید یکسان باشد.

یعنی

$$\rho A_{\infty} V_{\infty} = \rho A_D V_D = \rho A_{-\infty} V_{-\infty} \quad (5)$$

بخشی از انرژی باد توسط دیسک جذب خواهد شد. بنابراین بایستی سرعت باد بالادستی  $V_{\infty}$  از سرعت باد پایین دستی،  $V_{-\infty}$  بزرگتر باشد. در نتیجه مطابق با (۵) مساحت سطح مقطع عرضی تیوب جریان دربرگیرنده شار، در سمت بالادستی کمترین و ناحیه پایین دستی بیشترین خواهد بود. به عبارت دیگر، دیسک محرک باعث ایجاد تغییر در سرعت شار خواهد شد. به اختلاف بین سرعت شار بالادستی با سرعت شار در دیسک اصطلاحاً سرعت القایی محوری می گویند. این افت سرعت با یک ضریب افت القایی محوری شار  $a$  مشخص می گردد، به نحوی که در محل دیسک، سرعت باد از رابطه زیر محاسبه می شود.

$$V_D = V_{\infty}(1 - a) \quad (6)$$

محاسبه پیشرانه وارده بر روتور توسط تئوری

ممتنم

در این بخش، نیروی پیشرانه وارده بر روتور توسط تئوری ممتنم تخمین زده می شود. حجم

دیسک-محرک برای توربین بادی واقعی که تنها تعداد محدودی تیغه دارد، یک مدل تقریبی خواهد بود. در واقع این مدل به شکل ساده ای فرآیند استخراج انرژی از توربین را تشریح می کند. همچنین با استفاده از این روش می توان حد بالایی برای کارایی تبدیل انرژی در توربین نیز به دست آورد. فرضیاتی که این تئوری در استخراج معادلات مورد استفاده قرار می دهد از قرار زیر می باشند [1].

۱. باد همگن و یکنواخت است.

۲. هیچ مانعی بر سر راه جریان هوا در جریان بالادستی<sup>۱</sup> و پایین دستی<sup>۲</sup> وجود ندارد.

۳. سرعت شار در دیسک، یکنواخت است.

۴. شار عبوری از دیسک با استفاده از یک تیوب جریان، قابل جداسازی از باقی شار می باشد.

۵. چگالی هوا ثابت است. به عبارت دیگر شار باد غیرقابل فشرده شدن می باشد.

۶. توسط دیسک هیچ جریان چرخشی ای ایجاد نخواهد شد.

فرض سوم به این معناست که سرعت باد در هر شعاعی ثابت می باشد. یعنی بار پیشرانه روی دیسک یکنواخت بوده که معادل با در نظر گرفتن بی نهایت پره در توربین بادی است. حجم کنترلی شکل ۱ را در نظر بگیرید. در این حجم چهار ناحیه، مورد توجه است. (۱) ناحیه جریان آزاد (۲) ناحیه ای که درست قبل از پره ها قرار دارد (۳) ناحیه ای که

<sup>۱</sup> Axial flow induction factor

<sup>۱</sup> Upstream flow

<sup>۲</sup> Downstream flow

کنترلی در کناره‌ها می‌باشد. این شار به شکل زیر محاسبه می‌شود.

$$\varphi_f = V_\infty[(S - A_\infty) - (S - A_{-\infty})] \quad (۸)$$

$$= V_\infty(A_{-\infty} - A_\infty)$$

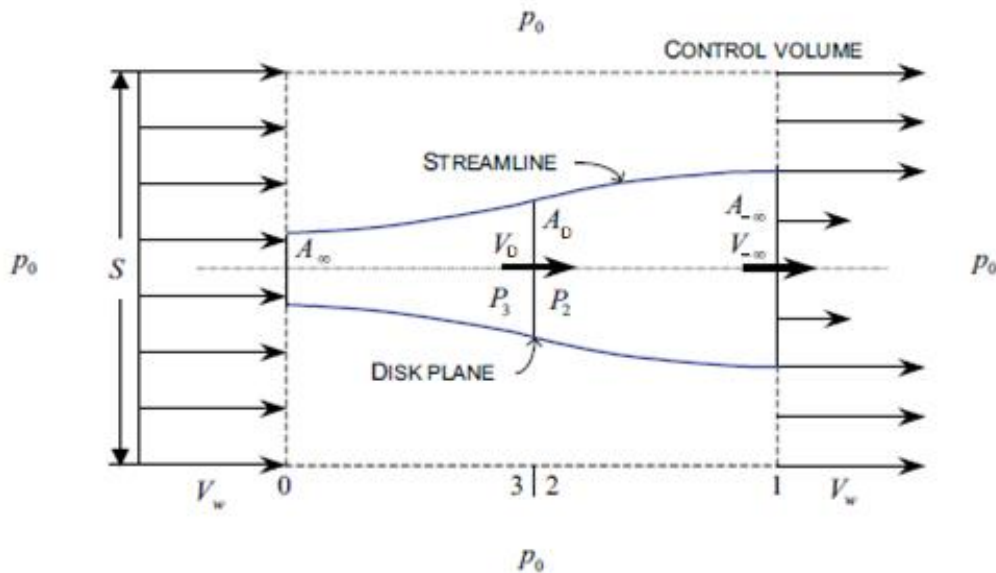
با جایگذاری این رابطه در (۷) به همراه استفاده از تساوی  $V_\infty A_\infty = V_{-\infty} A_{-\infty}$  معادله ممتم به شکل زیر ساده خواهد شد.

$$F_t = \rho A_{-\infty} V_{-\infty} (V_\infty - V_{-\infty}) \quad (۹)$$

کنترلی شکل ۱ را در نظر بگیرید. با تعریف  $F_t$  به عنوان نیروی پیشرانه وارده بر روتور، رابطه زیر را برای قانون ممتم می‌توان نوشت:

$$F_t = \rho V_\infty^2 S - \rho V_\infty^2 (S - A_{-\infty}) - \rho V_{-\infty}^2 A_{-\infty} - \rho \varphi_f V_\infty \quad (۷)$$

در این تساوی، سرعت شار درون حجم کنترلی و خارج از تیوب با  $V_\infty$  نمایش داده شده است. همچنین  $\varphi_f$  شار خالص خارج‌شونده از حجم



شکل ۱- نمایش شار یک بعدی گذرنده از دیسک در حجم کنترلی [۱]

### محاسبه میزان افت سرعت در شار پایین دستی

مطابق با تعریف فشار استاتیکی و به دلیل پیوستگی سرعت شار (و در نتیجه عدم مشارکت فشار دینامیکی در نرخ ممتم در دو طرف دیسک)، بین پیشرانه وارده بر روتور، با اختلاف فشار استاتیکی، رابطه زیر برقرار است.

$$F_t = A_d(p_d^+ - p_d^-) \quad (۱۰)$$

با کمک معادله برنولی، اختلاف فشار و در نتیجه میزان افت سرعت، محاسبه می‌شود:

$$\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2 + p_\infty + \rho_\infty g h_\infty = \frac{1}{2}\rho_d V_d^2 + p_d^+ + \rho_d g h_d \quad (۱۱)$$



$$p_d^+ - p_d^- = \frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V_{-\infty}^2) \quad (14)$$

با استفاده از روابط فوق، تساوی زیر حاصل می شود.

$$\frac{1}{2}\rho(V_\infty^2 - V_{-\infty}^2)A_d = \rho A_d V_\infty (1 - a)(V_\infty - V_{-\infty}) \quad (15)$$

بنابراین

$$V_{-\infty} = (1 - 2a)V_\infty \quad (16)$$

این رابطه به طور شماتیک در شکل ۲ نشان داده شده است.

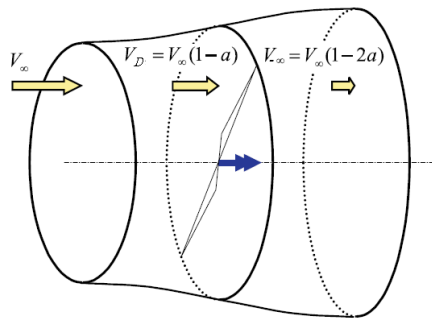
از طرفی، مطابق با فرض ۵،  $\rho_\infty = \rho_d = \rho$  می باشد. همچنین با فرض،  $h_\infty = h_d$  تساوی زیر حاصل می شود.

$$\frac{1}{2}\rho V_\infty^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho V_d^2 + p_d^+ \quad (12)$$

که فشار استاتیکی جریان آزاد است. به شکل مشابه برای جریان پایین دستی نیز رابطه زیر به دست خواهد آمد.

$$\frac{1}{2}\rho V_{-\infty}^2 + p_\infty = \frac{1}{2}\rho V_d^2 + p_d^- \quad (13)$$

با تفاضل این دو رابطه از یکدیگر معادله زیر به دست می آید.



شکل ۲- نمایش تغییرات سرعت در شار عبوری از دیسک محرک

$$C_p = \frac{P}{P_w} = \frac{2\rho A_d V_\infty^3 a(1-a)^2}{0.5\rho A_d V_\infty^3} = 4a(1-a)^2 \quad (19)$$

که در این رابطه  $0.5\rho A_d V_\infty^3$  در واقع انرژی جنبشی جریان آزاد بادی است که از سطحی مساوی با ناحیه دیسک عبور می کند.

با استفاده از رابطه (۱۹) می توان دید که ماکزیمم ضریب توان در  $a = \frac{1}{3}$  رخ می دهد که معادل با ضریب توان  $C_{pmax} = \frac{16}{27} = 0.59$  می باشد. بنابراین ماکزیمم مقدار استخراج انرژی از باد برابر با ۰/۵۹ انرژی جنبشی باد خواهد بود. این

### محاسبه ضریب توان

توان دریافتی از باد توسط روتور از رابطه زیر بدست می آید.

$$P = F_t V_d = (p_d^+ - p_d^-) A_d V_d = 2\rho A_d V_\infty^2 a(1-a) \times V_\infty(1-a) \quad (17)$$

بنابراین

$$P = 2\rho A_d V_\infty^3 a(1-a)^2 \quad (18)$$

اگر ضریب توان به صورت نسبت توان تولیدی توسط توربین به توان باد تعریف شود، در این صورت





با دیسک، ضریب درگ  $1/28$  است که ۳۰ درصد بیشتر از ضریب پیشرانه دیسک می‌باشد.

بایستی توجه داشت که روابط استخراج شده برای  $a \geq \frac{1}{2}$  برقرار نیست. چرا که تحت این شرایط، سرعت *wake* صفر یا منفی می‌گردد و تئوری ممتنم دیگر برقرار نخواهد بود.

### تئوری دیسک روتور<sup>۱</sup>

در توربین بادی، با چرخش روتور اختلاف فشار در طرفین دیسک ایجاد می‌شود که منجر به کاهش ممتنم محوری در *wake* می‌گردد. با کاهش ممتنم محوری انرژی باد گرفته شده و از طریق شفت روتور به ژنراتور ارسال می‌شود. شفت روتور در مقابل گشتاوری که از باد دریافت می‌کند، در جهت مخالف گشتاوری مساوی به شار هوا وارد می‌کند. سرانجام کاری که توسط گشتاور آئرو دینامیکی انجام می‌شود، در ژنراتور تبدیل به انرژی الکتریکی می‌گردد.

با اعمال گشتاور عکس‌العملی روی شار، هوا در جهت مخالف روتور شروع به چرخش می‌کند. یعنی جریان هوا ممان زاویه‌ای کسب می‌کند و در نتیجه جریان *wake* دیسک روتور علاوه بر مولفه محوری، دارای مولفه سرعتی در جهت مماس بر چرخش می‌باشد. این مولفه باعث افزایش انرژی جنبشی باد می‌شود که البته اثر آن با افت فشار استاتیکی جبران می‌شود.

محدودیت، به حد *Betz* یا *Lanchester-Betz* مشهور می‌باشد.

مطابق با تعریف بازده  $\eta$  (نسبت توان خروجی به توان ورودی)، می‌توان نتیجه گرفت که بازده دیسک برابر است با

$$\eta = \frac{P}{P_D} = \frac{2\rho A_d V_\infty^3 a(1-a)^2}{0.5\rho A_d V_d^3} = 4a(1-a) \quad (20)$$

بنابراین ماکزیمم بازده دیسک در  $a = 0.5$  رخ می‌دهد که در آن سرعت باد پایین دستی صفر و ضریب توان  $0/5$  است. در ضریب توان ماکزیمم، بازده دیسک،  $0/889$  می‌باشد که البته بدیهی که چنین شرایطی ممکن نیست.

### ضریب پیشرانه

مشابه با ضریب پیشرانه برای یک ملخ قرار گرفته در مقابل جریان باد، برای دیسک-محرك نیز می‌توان ضریب بی‌بعد آئرو دینامیکی پیشرانه *CT* را به شکل زیر تعریف نمود.

$$C_T = \frac{F_t}{\bar{Q}A} = \frac{F_t}{0.5\rho V_\infty^2 A_d} = 4a(1-a) \quad (21)$$

که در این رابطه  $\bar{Q}$  فشار دینامیکی جریان آزاد و  $A_d$  مساحت دیسک می‌باشد. به دلیل شتاب صفر دیسک، ضریب پیشرانه معادل با ضریب درگ دیسک خواهد بود. در ماکزیمم ضریب توان، ضریب پیشرانه برابر با  $0/889$  است. البته مطابق با تئوری‌های آئرو دینامیکی موجود، برای سطح مشابه

<sup>۱</sup> Rotor disc theory



مطابق با تئوری بقای ممتنم زاویه ای (مشابه با تئوری بقای ممتنم خطی)، گشتاور وارده بر رینگ، مساوی با نرخ تغییرات ممتنم زاویه ای هوای عبوری از هر رینگ می باشد. بنابراین

$$dQ = \text{شعاع} \times \text{سرعت مماسی} \times \text{نرخ شار جرم} \quad (22)$$

$$= \rho V_{\infty} (1-a) dA_d \times \frac{2\Omega ar}{\text{سرعت مماسی}} \times r$$

که در این رابطه  $dQ$  نشان دهنده گشتاور وارده بر رینگ و  $dA_d$  مساحت رینگ می باشد. بنابراین المان توان خروجی شفت حاصل از این رینگ برابر است با

$$dP = dQ\Omega = \rho V_{\infty} (1-a) dA_d \times 2\Omega^2 ar^2 \quad (23)$$

از طرف دیگر مطابق با تئوری دیسک-محرك، توان کل جذب شده از باد، برابر با نرخ تغییر ممان محوری است. یعنی

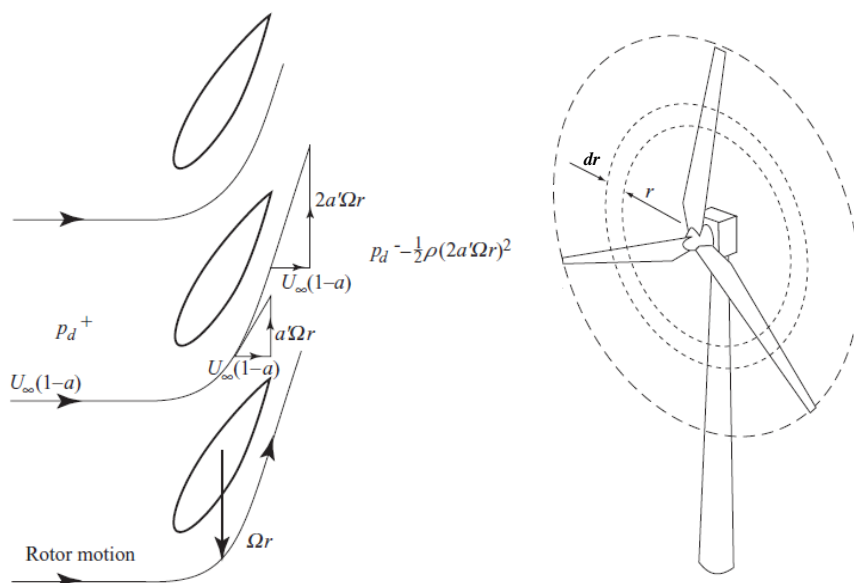
$$dP = 2\rho V_{\infty}^3 a(1-a)^2 dA_d \quad (24)$$

ایجاد حرکت دورانی در هوا در طول ضخامت دیسک انجام می شود که در تئوری قبل صفر در نظر گرفته شده بود. تغییر در سرعت مماسی توسط فاکتور القایی مماسی شار<sup>۱</sup> بیان می شود. بلافاصله بعد از دیسک، مولفه مماسی سرعت القایی برابر با  $2\Omega ra$  خواهد بود. در وسط ضخامت دیسک این سرعت برابر با  $\Omega ra$  می باشد. این نکته در شکل ۳ نشان داده شده است [3] [6].

سرعت مماسی همانند سرعت محوری در همه موقعیت های شعاعی یکسان نخواهد بود. بنابراین در دیسک روتور در شعاع  $r$ ، رینگی با عرض  $dr$  مطابق شکل ۴ بگیری.

افزایش گشتاور روتور اعمالی بر این رینگ منجر به ایجاد مولفه مماسی سرعت می شود و نیروی محوری اعمالی بر رینگ عهده دار کاهش سرعت محوری می باشد. در این نحوه مدل سازی در واقع هر رینگ به طور مستقل ممتنمی بر هوای گذرنده از خود وارد می کند و ممتنم کل از انتگرال گیری روی شعاع دیسک محاسبه می گردد.

<sup>۱</sup> Tangential flow induction factor



شکل ۳- نمایش تغییرات سرعت مماسی در طول ضخامت دیسک

شکل ۴- رینگ انتخاب شده در دیسک روتور

ترم اول داخل پرانتز نشانگر توان جریان آزاد عبوری از سطحی مساوی با سطح رینگ است. بنابراین با تعریفی که از بازده ارائه گردید، می‌توان گفت

$$\eta_r = 4a(1-a)\lambda_r^2 \quad (29)$$

مطابق با رابطه (۲۸)

$$\frac{dP}{dr} = \left(\frac{1}{2}\rho(2\pi r)V_\infty^3\right)(1-a)4a\lambda_r^2 \quad (30)$$

با دانستن نحوه تغییرات  $a$  و  $\lambda_r$  و انتگرال‌گیری از عبارت فوق می‌توان به صورت زیر توان  $P$  را به دست آورد. بنابراین می‌توان گفت که تغییرات ضریب توان با شعاع برابر است با

$$\frac{dC_p}{dr} = \frac{\left(\frac{1}{2}\rho(2\pi r)V_\infty^3\right)(1-a)4a\lambda_r^2}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^3 \pi R^2} = \frac{8r(1-a)4a\lambda_r^2}{R^2} \quad (31)$$

که با مساوی قرار دادن دو رابطه فوق، تساوی زیر به دست می‌آید.

$$V_\infty^2 a(1-a) = \Omega^2 r^2 \dot{a} \quad (25)$$

تعریف: نسبت سرعت مماسی رینگ چرخان در شعاع  $r$  به سرعت جریان آزاد را نسبت سرعت محلی<sup>۱</sup> ( $\lambda_r$ ) می‌گویند. این نسبت در لبه دیسک نسبت سرعت راس ( $\lambda$ ) نامیده می‌شود. بنابراین

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_\infty}, \quad \lambda = \frac{\Omega R}{V_\infty} \quad (26)$$

با استفاده از این تعریف رابطه (۲۵) به شکل زیر ساده می‌شود.

$$a(1-a) = \lambda_r^2 \dot{a} \quad (27)$$

بنابراین

$$dP = dQ\Omega = \rho(2\pi r dr)V_\infty(1-a)2\dot{a}\lambda_r^2 V_\infty^2 = \left(\frac{1}{2}\rho(2\pi r dr)V_\infty^3\right)(1-a)4\dot{a}\lambda_r^2 \quad (28)$$

<sup>۱</sup> Local speed ratio



### تئوری المان پره

در تئوری المان پره، با در نظر گرفتن المان پره در شعاع  $r$  به طول  $\delta r$  نیروهای لیفت و درگ آئرو دینامیکی که منجر به تغییر ممتهم محوری و زاویه ای می شوند، محاسبه می گردند. در نهایت با جمع این نیروها و ممان ها، نیرو و ممان کل وارد بر پره محاسبه می شود.

در این تئوری فرض می شود که نیروهای وارد بر یک المان پره می توانند توسط مشخصات یک ایرفویل دوبعدی و با استفاده از زاویه حمله که زاویه بین وتر ایرفویل با باد برآیند می باشد، محاسبه شوند. در واقع با دوبعدی فرض نمودن ایرفویل، از مولفه سرعت در راستای پره صرف نظر می شود. با مشخص شدن مولفه های سرعت بر حسب سرعت باد، فاکتورهای شار و سرعت چرخشی روتور، می توان زاویه حمله را به دست آورد.

توربینی با  $N$  پره، هر یک به شعاع  $R$  را در نظر بگیرید. المان ایروفویل دوبعدی در شکل ۵ ترسیم شده است. در این شکل  $\alpha$  زاویه حمله و  $\beta$  زاویه پیچ می باشد. بدلیل اینکه پره دارای سرعت زاویه ای  $\Omega$  است و شار دارای سرعت مماسی  $\dot{a}\Omega r$  در جهت عکس می باشد، سرعت شار از دید پره برابر با  $(1 + \dot{a})\Omega r$  خواهد بود. در نتیجه سرعت برآیند شار هوا نسبت به پره برابر است با

$$W = \sqrt{V_{\infty}^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1+\dot{a})^2} \quad (37)$$

با نرمالیزه کردن  $r$  به کمک تعریف متغیر  $\mu = \frac{r}{R}$  رابطه فوق به صورت زیر ساده می شود:

$$\frac{dC_p}{d\mu} = 8(1-a)\dot{a}\lambda^2\mu^3 \quad (32)$$

برای یافتن ماکزیمم توان می توان در هر یک از رینگ ها مقدار توان را ماکزیمم نموده و سپس مجموع توان ها را با انتگرال گیری به دست آورد. اگر از رابطه (۲۹) دیفرانسیل گرفته شده و حاصل مساوی صفر قرار داده شود، نتیجه به شکل زیر خواهد بود.

$$(1-a)d\dot{a} - \dot{a}da = 0 \quad (33)$$

به همین ترتیب اگر از طرفین رابطه (۲۷) نیز دیفرانسیل گرفته شود، معادله دیگری به صورت زیر به دست می آید.

$$da - 2ada = \lambda_r^2 d\dot{a} \quad (34)$$

با در نظر گرفتن همزمان دو معادله اخیر،  $\dot{a}$  و  $a$  به شکل زیر خواهند شد.

$$\dot{a}\lambda_r^2 = (1-a)(1-2a) \quad (35)$$

حال اگر این مقادیر در (۲۷) جایگذاری شود  $a = \frac{1}{3}$  و  $\dot{a} = \frac{a(1-a)}{\lambda_r^2}$  حاصل می شود. در نتیجه ضریب توان ماکزیمم از رابطه زیر حاصل می شود:

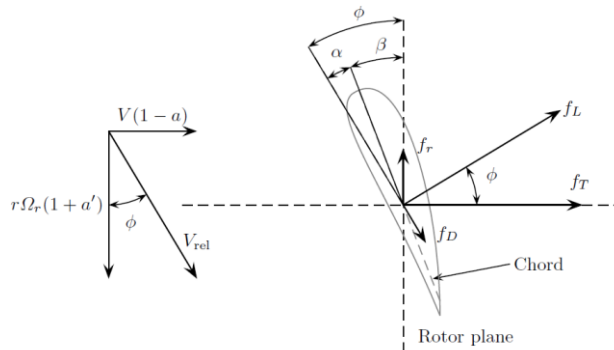
$$\begin{aligned} C_p &= \int_0^1 8(1-a) \frac{a(1-a)}{\lambda^2 \mu^2} \lambda^2 \mu^3 d\mu \\ &= \int_0^1 8a(1-a)^2 \mu d\mu \quad (36) \\ &= 4a(1-a)^2 = \frac{16}{27} \end{aligned}$$

بنابراین ماکزیمم ضریب توان، دقیقاً مشابه با حالت دیسک-محرك بدون  $wake$  چرخان است.



$$\phi = \arctg\left(\frac{V_{\infty}(1-a)}{\Omega r(1+a')}\right) \quad (38)$$

که نسبت به صفحه دارای زاویه  $\phi$  برابر با مقدار زیر است.



شکل ۵- نمایش نیروها روی المان پره

$$\begin{aligned} dQ &= (df_L \sin\phi - df_D \cos\phi) r \\ &= \frac{N}{2} \rho W^2 cr (C_L \sin\phi - C_D \cos\phi) dr \\ &= \frac{N}{2} \rho W^2 cr C_y dr \end{aligned} \quad (42)$$

که در روابط فوق  $N$  تعداد پره‌های توربین است.

### تئوری المان پره - ممتتم (BEM)

مطابق با تئوری ممتتم، تشریح گردید که افت فشار یا ممتتم در روتور به دلیل کاری است که شار عبوری از المان پره روی آن انجام می‌دهد. حال اگر این تئوری با تئوری المان پره ترکیب گردد، تئوری جدیدی به نام  $BEM$  شکل خواهد گرفت که متداول‌ترین تئوری برای مطالعه آئرو دینامیک توربین می‌باشد. لازم به توجه است که این تئوری مشابه با تئوری استریپ‌ها<sup>۱</sup> در صنایع هوایی است [7].

فرض اساسی در تئوری  $BEM$  این است که نیروی هر المان تنها عامل ایجاد تغییر در ممتتم

نیروی لیفت در این المان پره، نیرویی است که در راستای عمود بر سرعت باد وارد می‌شود. بنابراین

$$df_L = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_L(\alpha) dr \quad (39)$$

که در این رابطه  $\frac{1}{2} \rho W^2$  فشار دینامیکی،  $c$  طول وتر ایرفویل و  $CL$  ضریب آئرو دینامیکی بی‌بعد شده لیفت می‌باشد. به همین ترتیب با استفاده از تعریف ضریب بی‌بعد آئرو دینامیکی برای نیروی درگ در راستای سرعت باد، رابطه زیر را می‌توان نوشت.

$$df_D = \frac{1}{2} \rho W^2 c C_D(\alpha) dr \quad (40)$$

بنابراین پیش‌رانه افقی و گشتاور روی رینگ انتخابی با روابط زیر حاصل می‌شود:

$$\begin{aligned} dF_t &= df_L \cos\phi + df_D \sin\phi \\ &= \frac{N}{2} \rho W^2 c (C_L \cos\phi + C_D \sin\phi) dr \\ &= \frac{N}{2} \rho W^2 c C_x dr \end{aligned} \quad (41)$$

<sup>1</sup>. Strips theory



زاویه، خطی است. برای محاسبه این نیروها در رینگ موردنظر، باید سرعت باد مشخص گردد. سرعت باد محلی شامل چهار مولفه زیر است.

$$1. \text{سرعت باد غیرآشفته } (V_{\infty})$$

۲. سرعت المان پره (شامل سرعت چرخش شفت روتور، حرکت *flap* پره، حرکت های *lead-lag* و سرعت بالای برج، مطابق با مدل سازه توربین)

۳. سرعت القایی محوری

۴. سرعت القایی مماسی

برای محاسبه سرعت های القایی، باید ضرایب  $a$  و  $\dot{a}$  به دست آیند که این ضرایب از حل دو رابطه (۴۴) و (۴۶) با روش های بازگشتی قابل محاسبه هستند. با حل همزمان این دو معادله روابط زیر حاصل می شود:

$$\frac{a}{1-a} = \frac{\sigma_r}{4\sin^2\phi} C_x \quad (47)$$

$$\frac{\dot{a}}{1+\dot{a}} = \frac{\sigma_r}{4\sin\phi\cos\phi} C_y \quad (48)$$

که در این روابط  $\sigma_r$  پارامتر سختی وتر می باشد که از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\sigma_r = N \frac{c}{2\pi r} = N \frac{c}{2\pi \mu R} \quad (49)$$

برای حل بازگشتی، ابتدا فرض می شود که این فاکتورهای القایی محوری و مماسی صفر هستند و بر مبنای آن  $\phi$ ،  $C_l$  و  $C_d$  محاسبه می شوند. سپس بر مبنای این مقادیر و حل معادلات فوق، مقادیر جدید فاکتورهای القایی حاصل می شوند. این روند تا زمانی که همگرایی لازم حاصل شود، ادامه می یابد.

هوای عبوری از همان رینگ است و هیچ تداخل شعاعی بین شار رینگ های همسایه وجود ندارد. این فرض بدین معناست که ضریب القای محوری شار به طور شعاعی تغییر نمی کند.

حال اگر روابط (۴۱) از تئوری المان پره و (۹) از تئوری ممتهم با  $A_d = 2\pi r dr$  مساوی با هم قرار داده شوند:

$$\frac{1}{2}\rho W^2 N c C_x dr = 4\pi\rho V_{\infty}^2 a(1-a)rdr \quad (43)$$

یا به شکل ساده تر

$$\frac{W^2}{V_{\infty}^2} N \frac{c}{R} C_x = 8\pi a(1-a)\mu \quad (44)$$

برای المان گشتاور محوری روتور نیز با مساوی قرار دادن (۴۲) و (۲۲) با  $A_d = 2\pi r dr$  می توان رابطه مشابهی نوشت:

$$\frac{1}{2}\rho W^2 N c C_y r dr = 4\pi\rho V_{\infty} (\Omega r) \dot{a} (1-a)r^2 dr \quad (45)$$

با ساده کردن این عبارت، تساوی زیر به دست می آید.

$$\frac{W^2}{V_{\infty}^2} N \frac{c}{R} C_y = 8\pi \dot{a} (1-a)\lambda \mu^2 \quad (46)$$

ضرایب بی بعد آئرو دینامیک تابعی از زاویه حمله، عدد رینولدز و عدد ماخ هستند. این ضرایب معمولاً توسط آزمایشات تونل باد یا با محاسبات *CFD* و یا با استفاده از پایگاه های داده آماده محاسبه می شوند. عدد رینولدز در عمل بسته به وتر و سرعت باد بین صفر تا  $2 \times 10^6$  تغییر می کند؛ اما عموماً از این ارتباط صرف نظر می شود.

آزمایشات نشان می دهد که ارتباط بین نیروهای لیفت و درگ و زاویه حمله، به ازای مقادیر کم این



- [5]. J. N. Sørensen, “Aerodynamic Aspects of Wind Energy Conversion,” The Annual Review of Fluid Mechanics, pp. 19-28, 2010.
- [6]. G .Ingram, “Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method,,” Durham University, 2011.
- [7]. A. Gómez, J. R. Seume, “Aerodynamic coupling of rotor and tower in HAWTs,” in Proceedings of the EWEC, Marseille, France, 2009.

## منابع

- [1]. D. P. Molenaar, “Cost-effective design and operation of variable speed wind turbines”, Ph.D. dissertation, Delft University of Thechnology, Netherland, 2003.
- [2]. F. D. Bianchi et al., “Wind Turbine Control Systems, Principles,Modelling and Gain Scheduling Design”, Advances in Industrial Control, Springer, 2007.
- [3]. T. Burton, et al., “Wind Enegy Handbook”, 2nd Edition, John Wiley & Sons, Ltd, 2011.
- [4]. I. Munteanu, et al., “Optimal Control of Wind Energy Systems - Towards a Global Approach”, Springer, 2008.



## شبیه‌سازی زمان - حقیقی

نویسنده: امید بزاز<sup>۱</sup>

**چکیده:** شبیه‌سازی زمان-حقیقی ابزاری کم هزینه برای تست سیستم‌های پیچیده و اطمینان از عملکرد صحیح آن قبل از راه‌اندازی است. در این شبیه‌سازی حل معادلات دینامیکی و تأثیر ورودی‌ها و ارتباط داده میان اجزاء یک سیستم بگونه‌ای انجام می‌گیرد که وضعیت تمامی متغیرهای یک سیستم در زمان واقعی و مطابق با واقعیت تغییر می‌کند. شبیه‌سازی سخت‌افزار-در-حلقه، یکی از اشکال شبیه‌سازی زمان-حقیقی است که تمامی ارتباطات میان کنترل‌کننده و سخت‌افزار کنترلی با مدل کامپیوتری سیستم به صورت واقعی برقرار می‌گردد. نرم‌افزارهای گوناگونی نظیر Labview، Matlab/Simulink، Maplesim، Dymola و ... از قابلیت اجرای زمان-حقیقی شبیه‌سازی برخوردارند، که هر یک دارای ویژگی‌های خاص خود می‌باشند. **کلیدواژه:** شبیه‌سازی، زمان-حقیقی، سخت‌افزار-در-حلقه

### مقدمه

یک سیستم و روابط میان این بخش‌ها بصورت نرم‌افزاری محیطی را فراهم می‌آورد تا به دور از خطرات فیزیکی و هزینه‌های مالی بتوان به آزمایش سیستم و بررسی رفتار آن در شرایط مختلف پرداخت.

با پیچیده‌تر شدن سیستم‌ها، انجام شبیه‌سازی نه تنها یکی از مراحل اجتناب‌ناپذیر پروسه طراحی محسوب می‌شود بلکه پروسه شبیه‌سازی خود به بخش‌های مختلفی نظیر شبیه‌سازی مدل-در-حلقه، شبیه‌سازی نرم‌افزار در حلقه، شبیه‌سازی پرسسور در حلقه و شبیه‌سازی سخت‌افزار در حلقه تقسیم می‌گردد که هر بخش در بازه‌ای از پروسه طراحی

امروزه با پیشرفت تکنولوژی، سیستم‌های مورد استفاده بشر از ساختار پیچیده‌تر با پارامترهای فراوان و بعضاً نامعین و غیر قابل شناسایی دقیق برخوردار است. پیش‌بینی رفتار این سیستم‌ها که عموماً از ورودی‌های متعددی تأثیر می‌پذیرند تحت عوامل محیطی و شرایط کاری مختلف براحتی ممکن نیست. از این رو اطمینان از صحت عملکرد یک سیستم قبل از راه‌اندازی آن خصوصاً برای مهندسين کنترل از اهمیت بالایی برخوردار است. استفاده از شبیه‌ساز، یک ابزار مناسب برای ارزیابی عملکرد سیستم‌ها در شرایط مختلف می‌باشد. شبیه‌ساز با مدل کردن بخش‌های مختلف

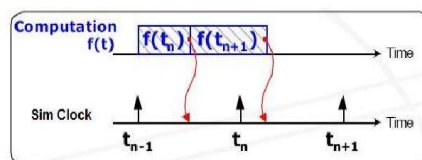
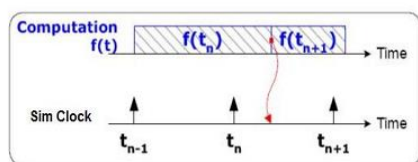
<sup>۱</sup>- کارشناس گروه پایش و کنترل نیروگاه، پژوهشگاه نیرو، پست الکترونیک: [obazzaz@nri.ac.ir](mailto:obazzaz@nri.ac.ir)



چالش‌های شبیه‌سازی زمان-حقیقی و چالش‌های آن در سیستم‌های الکتریکی اشاره می‌گردد. پس از آن نرم‌افزارهای مرسوم در زمینه شبیه‌سازی سیستم‌های دینامیکی مورد بررسی قرار می‌گیرند.

ویژگی‌های یک شبیه‌ساز زمان-حقیقی شبیه‌سازی زمان-حقیقی بطور کلی عبارت است از اجرای مدل کامپیوتری یک سیستم فیزیکی در زمانی برابر با زمان واقعی. در شبیه‌سازی زمان-حقیقی، شبیه‌ساز باید در مدت زمانی که از قبل تعیین می‌شود و به عنوان گام زمانی معرفی می‌گردد، ورودی‌ها را بخواند و محاسبات لازم را انجام دهد. در صورتی که بازه زمان شبیه‌سازی کمتر یا بیشتر از مقدار زمان-حقیقی مورد نیاز برای محاسبه توابع باشد (شکل ۶)، شبیه‌ساز را بیرون خط<sup>۱</sup> می‌گویند [۳].

انجام می‌گیرد. همچنین بسته به نحوه گردش اطلاعات و مدت زمان بکار رفته برای محاسبات و تغییر حالات سیستم در یک گام زمانی از اجرای شبیه‌سازی، شبیه‌سازی به دو نوع زمان-حقیقی و غیر زمان-حقیقی تقسیم می‌شود. در شبیه‌سازی زمان-حقیقی که در ادامه مفصل‌تر بحث خواهد شد، حل معادلات و به‌روزرسانی حالات سیستم از نظر زمانی دقیقاً مشابه با زمان واقعی سپری شده خواهد بود. بنابراین تقدم و تأخر ارسال و دریافت اطلاعات میان قسمت‌های مختلف یک سیستم نظیر عملگرها، سنسورها، سیستم کنترل و مدل پلنت اصلی بطور دقیق در نظر گرفته می‌شود. در ادامه ابتدا به مفاهیم شبیه‌سازی زمان-حقیقی پرداخته شده و کاربردها و دلایل استفاده از آن بیان می‌گردد و مراحل انجام یک شبیه‌سازی زمان-حقیقی شرح داده می‌شود. سپس به

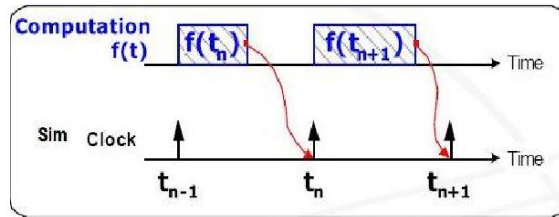


شکل ۶- شبیه‌سازی بیرون خط

حالت شبیه‌ساز، زمان-حقیقی است.

شکل ۷ حالتی را نشان می‌دهد که شبیه‌ساز در طول گام زمانی محاسبات را انجام می‌دهد، در این

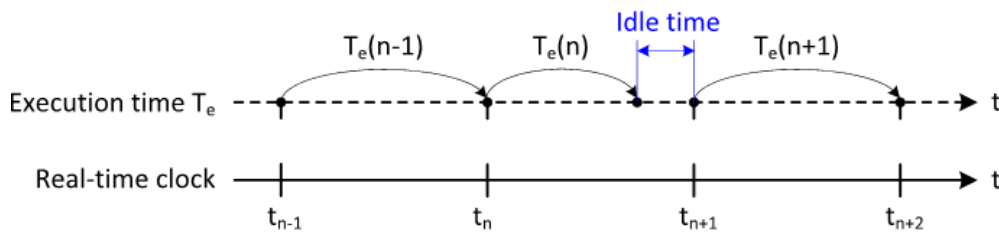
<sup>۱</sup>. offline



شکل ۷- شبیه‌سازی زمان-حقیقی

ندهد. به این مدت زمانی که شبیه‌ساز برای شروع گام بعدی منتظر می‌ماند، زمان بی‌کار شده<sup>۱</sup> گفته می‌شود (شکل ۸).

اگر بازه زمانی مورد نیاز برای انجام محاسبات کمتر از طول گام زمانی در نظر گرفته شده باشد، در صورتی شبیه‌ساز زمان-حقیقی است که تا شروع گام بعدی صبر کند و محاسبات را انجام



شکل ۸- شبیه‌سازی زمان-حقیقی با وجود زمان تلف شده [۴]

وسیله عوامل مختلف ایجاد عیب در سیستم، در شرایط گوناگون، تعیین گردند. همچنین کنترل‌کننده‌ها می‌توانند در شبیه‌ساز زمان-حقیقی پیاده‌سازی گردند و یا از شبیه‌ساز برای تست کنترل‌کننده سخت‌افزاری استفاده شود. در این حالت‌ها نیازی به استفاده از سیستم واقعی برای تست عملکرد کنترل‌کننده نمی‌باشد که در نتیجه باعث کاهش هزینه و کاهش آسیب به سیستم‌ها می‌شود.

شبیه‌سازهای زمان-حقیقی به علت توانایی در مدل کردن دقیق رفتار سیستم‌ها در بستری نرم‌افزاری و آزمایشگاهی، از کاربرد وسیعی در صنایع مختلف نظیر هوا فضا، رباتیک، سیستم‌های تولید نیرو، درایوهای الکتریکی، و ... برخوردارند. این کاربردها را می‌توان در دو دسته ۱- طراحی، تست و ارزیابی و ۲- آموزش جای داد.

➡ به دلیل افزایش پیچیدگی سیستم‌های جدید، نیاز برای شبیه‌سازی آن‌ها به صورت زمان-حقیقی رو به افزایش است تا بدین

<sup>۱</sup> Idle time



آسانتر عملیات برای انجام محاسبات به کار گرفته می‌شود.

در حل کننده های با گام متغیر، گام زمانی حل معادلات بسته به میزان همگرایی الگوریتم حل عددی معادلات متغیر است. به عبارت دیگر در هر گام حل کننده آنقدر منتظر می ماند و تکرار را ادامه می دهد تا شاخص همگرایی از یک حد معین کمتر شود. این تکنیک موجب افزایش دقت حل معادلات می شود و چالش انتخاب ثابت زمانی در حل کننده های با گام ثابت را مرتفع می کند. اما هرچند در حل معادلات با پیچیدگی پایین می تواند سرعت حل را بطور محسوسی بالا ببرد اما در حل معادلات پیچیده در شرایط خاص می تواند برای رسیدن به دقت تعیین شده سرعت را کاهش دهد. به این ترتیب این روش حل برای شبیه سازی زمان-حقیقی کمتر استفاده می شود اما در مواردی با بکارگیری الگوریتم های پیچیده می توان از این روش نیز در شبیه سازی زمان-حقیقی بهره برد.

### عملیات انجام شده در طول یک گام شبیه سازی

یک گام زمانی اجرای شبیه سازی، شامل انجام عملیات مختلفی از جمله خواندن ورودی ها، حل معادلات مدل، تبادل نتایج با نود های دیگر شبیه سازی، تولید خروجی و انتظار برای شروع گام بعدی می باشد. ترتیب و صحت انجام این عملیات بسیار اهمیت دارد و چنانچه انجام هر

از شبیه ساز زمان-حقیقی در صنایع مختلف برای آموزش اپراتورها استفاده می شود، تا توسط شبیه سازی با عملکرد دستگاه و شرایط ایجاد اغتشاش آگاهی یابند.

### انواع حل کننده های<sup>۱</sup> مورد استفاده در شبیه سازی

شبیه سازی در یک فضای گسسته-زمان صورت می گیرد. بطور کلی برای حل عددی معادلات از دو تکنیک می توان استفاده نمود: ۱- حل با گام ثابت و ۲- حل با گام متغیر. حل کننده های با گام ثابت در کل زمان شبیه سازی از یک گام زمانی ثابت برای انجام محاسبات مانند حل معادلات استفاده می کنند. در طول این گام یک سیکل از کلیه فرآیندهای موجود در شبیه سازی اجرا شده و مقادیر متغیرها به روزرسانی می گردد. تعیین طول گام بهینه از مسائلی است که در این نوع حل کننده ها اهمیت دارد، چرا که به منظور اطمینان از همگرایی حل معادلات باید طول گام به اندازه کافی کوچک انتخاب شود اما از طرفی طول گام باید به اندازه کافی بزرگ باشد که بتوان کلیه محاسبات و عملیات یک سیکل از اجرای شبیه سازی را در این بازه زمانی انجام داد. عموماً در نظر گرفتن ۵ تا ۱۰ برابر بیشترین فرکانس تغییرات کلیه سیگنال های درون یک سیستم به عنوان فرکانس حل معادلات مناسب می باشد. در شبیه سازی زمان-حقیقی معمولاً روش گام ثابت به علت پیچیدگی های کمتر و قابلیت مدیریت

<sup>1</sup> Solver



مقادیر برای استفاده در حل معادلات مدل‌های دیگر به این مدل‌ها انتقال می‌یابند.

۴. تولید خروجی: در نهایت با حل معادلات تمامی مدل‌ها و مقدار دهی کلیه متغیرها، مقادیر خروجی بر روی بافر خروجی نوشته می‌شود. این مقادیر می‌توانند برای نمایش و یا فرماندهی به یک عملگر استفاده شوند.

۵. انتظار برای شروع گام بعدی: عموماً گام زمانی به گونه‌ای تنظیم می‌گردد که کلیه عملیات بالا بتواند در تمامی شرایط در طول یک گام انجام گیرد. در زمان باقی‌مانده از گام، مقادیر متغیرها حفظ شده و در شروع گام بعد این مقادیر به عنوان مقادیر لحظه شروع گام مورد استفاده قرار می‌گیرد [8].

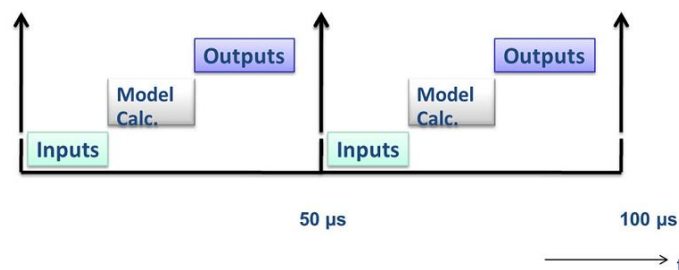
در شکل ۹ این عملیات برای یک گام زمانی ۵۰ میکرو ثانیه نشان داده شده است.

یک از این عملیات با اختلال صورت گیرد، نتیجه کل گام نادرست می‌باشد. این عملیات در ادامه شرح داده شده‌اند.

۱. خواندن ورودی‌ها: در مرحله اول از اجرای یک گام، مقادیر متغیرهایی نظیر اندازه‌گیری‌ها و اغتشاشات که از خارج از شبیه‌سازی تاثیر می‌پذیرد مقداردهی می‌گردد.

۲. حل معادلات مدل: پس از مقداردهی متغیرهای ورودی و تخصیص مقادیر اولیه از گام زمانی قبل، معادلات مدل توسط یک الگوریتم عددی مناسب حل می‌شود. حل معادلات مقادیر متغیرهای مدل را برای زمان  $t_0+dt$  مشخص می‌کند که در آن  $dt$  طول گام زمانی می‌باشد.

۳. تبادل نتایج با نودهای دیگر شبیه‌سازی: یک شبیه‌سازی می‌تواند شامل چندین مدل با معادلات مختلف باشد که از یکدیگر تاثیر می‌پذیرند. پس از حل معادلات یک مدل و بدست آمدن مقادیر جدید متغیرهای آن، این



شکل ۹- عملیات انجام گرفته در طول یک گام شبیه‌سازی [8]



### چالش‌های شبیه‌سازی زمان-حقیقی

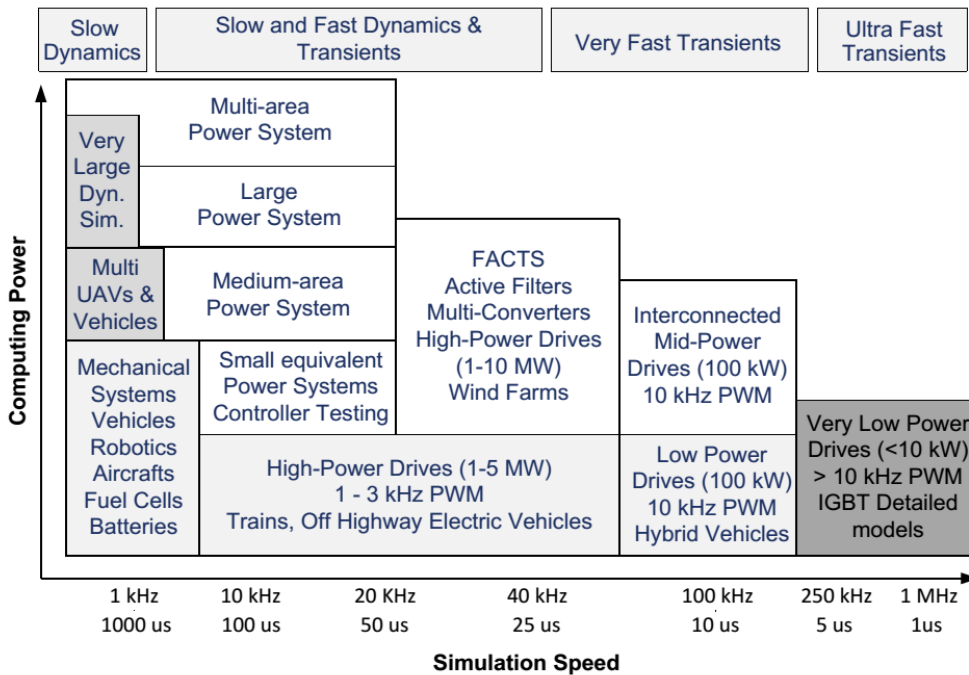
دقت محاسبات در شبیه‌سازی زمان-حقیقی تنها به دقت معادلات دینامیکی توصیف کننده مدل بستگی ندارد، بلکه به طول گام زمانی مورد استفاده برای حل معادلات نیز وابسته است که باعث می‌شود شبیه‌سازی زمان-حقیقی با چالش‌های گوناگونی نظیر تعیین طول گام مناسب در شبیه‌سازی، قدرت محاسبات مورد نیاز در شبیه‌سازی، حل کننده مورد استفاده در شبیه‌سازی و... مواجه گردد. در ادامه چالش‌های مهم شرح داده می‌شود.

۱. تعیین طول گام مناسب که باید بیانگر فرکانس سیستم واقعی باشد و معمولاً تا حدود ۵ برابر بیشترین فرکانس گذرای سیستم در نظر گرفته می‌شود. در دیاگرام شکل ۱۰ فرکانس و سرعت شبیه‌سازی مورد نیاز برای کاربردهای مختلف نشان داده شده است. همانطور که در این دیاگرام دیده می‌شود فرکانس مناسب برای اجرای شبیه‌سازی دینامیک‌های کند نظیر سیستم‌های مکانیکی و رباتیکی 1kHz و برای دینامیک‌های سریع نظیر سوئیچ زنی‌های سیستم‌های قدرت تا مرتبه MHz بالا می‌رود.

۲. پیچیدگی یا سباز سیستم که میزان قدرت محاسبات مورد نیاز توسط شبیه‌سازی را بیان می‌کند. هر چه تعداد اجزا و ارتباط این اجزای سیستم بیشتر باشد شبیه‌سازی باید قدرت محاسباتی بالاتری داشته باشد. طول گام زمانی باید با افزایش پیچیدگی سیستم بیشتر شود تا شبیه‌سازی بتواند محاسبات را انجام دهد، اما همان‌گونه که گفته شده فرکانس اجرا باید از بیشترین فرکانس گذرای سیستم بیشتر باشد که این یک چالش برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی ایجاد می‌کند [4].

۳. تعداد کانال‌های ورودی و خروجی مورد نیاز برای شبیه‌سازی سیستم که بر روی میزان پیچیدگی و هزینه شبیه‌سازی اثر می‌گذارد.

۴. زمانی که سیستم از دینامیک‌های سریع و کند تشکیل می‌شود، می‌توان از شبیه‌سازهای با نرخ چندگانه استفاده نمود که بخشی از مدل را با نرخ (طول گام) متفاوت شبیه‌سازی می‌کند، اما استفاده از این روش دارای مشکلاتی مانند همزمان‌سازی و پایداری می‌باشد.

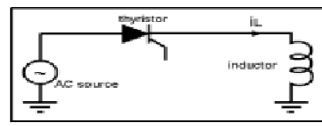


شکل ۱۰- سرعت مورد نیاز شبیه‌سازی برای کاربردهای گوناگون [۱]

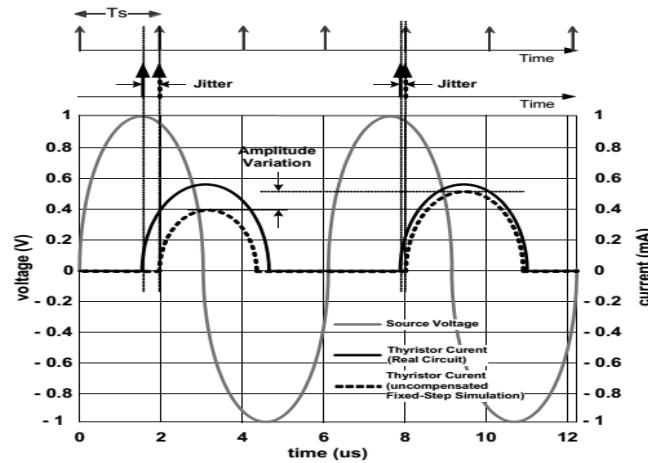
در زمان‌های گسسته مورد نظر در شبیه‌سازی اتفاق بیفتد. این اختلاف اندک همانطور که در شکل نشان داده شده سبب اختلاف سطح قابل توجه جریان مدار می‌گردد. برای حل این مشکل از تکنیک‌های جبران ساز زمان-گسسته نظیر الگوریتم درون یابی<sup>۱</sup> که در آن با استفاده از داده‌های گسسته موجود یک سری داده‌های جدید تولید می‌کند، استفاده می‌شود [۱].

۵. نیاز به حل‌کننده گسسته زمان، یک محدودیت ذاتی را به ویژه در شبیه‌سازی زمان-حقیقی سیستم‌های غیرخطی ایجاد می‌کند. رویدادهای غیرخطی مانند سوئیچ‌زنی ترانزیستور، باعث ایجاد ناپایداری عددی می‌شوند. به عنوان مثال برای مدارهای یکسوساز که در شکل ۱۱ نشان داده شده‌است، به علت فرکانس بالای سوئیچ‌زنی تضمینی وجود ندارد که سوئیچ‌زنی

<sup>1</sup> interpolation



(a) Thyristor Converter Circuit

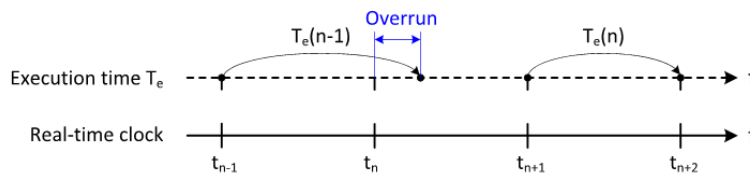


(b) Thyristor Converter Voltages

شکل ۱۱- سیستم یکسوساز [۱]

اصطلاح عملیات به گام بعد سرازیر می‌شود [۴]. در شکل ۱۲ این حالت نشان داده شده است.

۶. وجود مشکل سرازیر شدن<sup>۱</sup>: زمانی که شبیه‌ساز نتواند تمام محاسبات مورد نیاز را در طول گام زمانی از پیش تعیین شده انجام دهد به



شکل ۱۲- مشکل سرازیر شدن در شبیه‌سازی

استفاده نمود. به عنوان مثال، می‌توان با استفاده از شبکه عصبی توابع را تخمین زد، اگرچه زمان آموزش این شبکه‌ها زیاد است ولی می‌توان آموزش را به صورت آفلاین انجام داد. برای افزایش سرعت الگوریتم می‌توان از الگوریتم گام‌های چندگانه<sup>۲</sup> استفاده کرد، به این صورت که

برای حل این مشکل می‌توان از یکی از راه‌های افزایش سایز گام و یا تخمین سریع‌تر توابع و بکارگیری ابزار محاسباتی سریع استفاده کرد. برای ایجاد پایداری و افزایش دقت، محدودیتی روی سایز گام قرار داده می‌شود. پس نمی‌توان سایز گام را تا اندازه دلخواه افزایش داد. در روش دوم باید از الگوریتم‌های سریع برای تخمین توابع

<sup>2</sup> Multi step method

<sup>1</sup> Overrun

ایده‌آل است که در آن زمان شبیه‌سازی از زمان-حقیقی کمتر است، که به شبیه‌سازی‌های سریع معروف‌اند و باعث می‌شوند تست‌های زیادی در طول زمان کوتاهی انجام گیرند. این ساختار به عنوان مثال برای شبیه‌سازی‌های آماری، مانند مونت کارلو<sup>۱</sup> مناسب می‌باشد [2].

### پردازشگر در حلقه (PIL)

در این ساختار، کنترل‌کننده در یک پلتفرم مستقل اجرا می‌شود. آزمایش در این سطح مانند ساختار نرم‌افزار در حلقه است با این تفاوت که نرم‌افزار تعبیه شده؛ بر روی پردازنده اجرا می‌شود و تمامی ارتباطات بین این دو بطور فیزیکی برقرار می‌گردد. در شکل ۱۳ این حالت برای شبیه‌سازی کنترل یک موتور PM نشان داده شده است [5]. همانطور که در شکل مشخص است، موتور PM و مبدل آن مدل شده و سیگنال‌های اندازه‌گیری شده از مدل جهت محاسبه فرمان PWM از طریق کارت ورودی به یک پردازشگر خارجی فرستاده می‌شود. پردازشگر که حاوی الگوریتم کنترلی اصلی است پس از انجام محاسبات لازم، فرمان کنترلی را از طریق یک کارت خروجی به مدل اعمال می‌کند. در نهایت پاسخ موتور الکتریکی به کنترل اعمالی در حالتیکه محدودیت‌های مختلفی نظیر تاخیر ارسال و دریافت، رزلوشن داده‌ها و فرکانس نمونه‌برداری در نظر گرفته شده است، قابل مشاهده است. در اینجا از آنجاکه فرامین کنترلی از یک بستر

از اطلاعات گام قبل برای محاسبه تخمین با درجه بالا استفاده می‌شود [7].

### انواع ساختار شبیه‌سازی

شبیه‌سازی بسته به هدف و کاربرد آن و میزان پیچیدگی سیستم تحت شبیه‌سازی می‌تواند به یکی از ساختارهای مدل در حلقه، نرم‌افزار در حلقه، پردازشگر در حلقه و سخت‌افزار در حلقه انجام گیرد. در ادامه به شرح هر یک از این ساختارها پرداخته می‌شود.

### شبیه‌سازی مدل در حلقه (MIL)

در این ساختار مدلی از سیستم واقعی و زیر سیستم‌های آن و ارتباطات بین آن‌ها همگی در یک محیط شبیه‌سازی واحد ایجاد می‌شود. این شبیه‌سازی معمولاً برای ارزیابی طراحی‌های مقدماتی یک پروژه و بررسی و مقایسه روش‌های مختلف کنترلی به کار می‌رود.

### نرم‌افزار در حلقه (SIL)

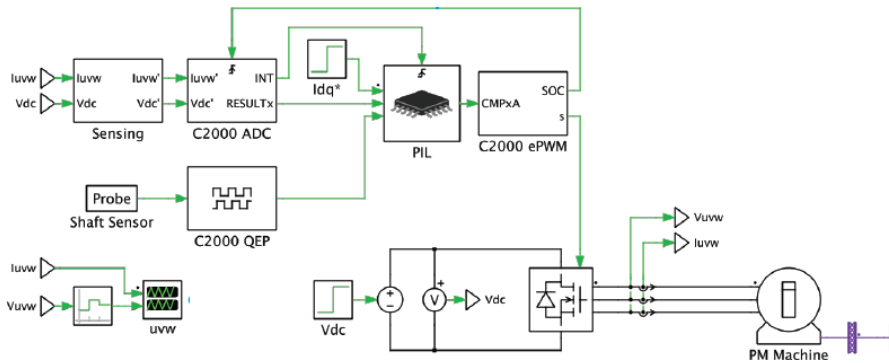
در شبیه‌سازی نرم‌افزار در حلقه، کنترل‌کننده به کدهایی که قابلیت پیاده‌سازی واقعی دارند، تبدیل شده و در کنار مدل سیستم در یک کامپیوتر اجرا می‌گردد. در این شرایط، زمان و فضای بیرونی اهمیتی بر روی ارزش نتایج ندارد و زمان شبیه‌سازی می‌تواند کمتر یا بیشتر از زمان واقعی باشد. این روش برای کلاسی از شبیه‌سازی‌ها

<sup>1</sup> Monte-Carlo



واقعیت سیستم می‌توان شبیه‌سازی را بصورت زمان-حقیقی اجرا نمود.

فیزیکی (کارت‌های ورودی-خروجی) به مدل منتقل شده و اطلاعات وضعیت سیستم را از مدل دریافت می‌کند، برای مشاهده رفتار نزدیک به



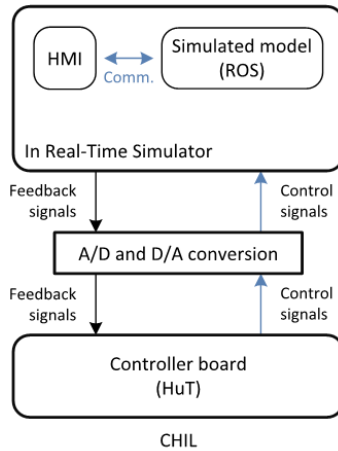
شکل ۱۳- شماتیک شبیه‌سازی در حالت پردازشگر در حلقه

تست نهایی کنترل‌کننده، قبل از تست فیزیکی بر روی سیستم واقعی زمانی که انجام تست‌های واقعی هزینه‌بر است، صورت می‌گیرد [6]. در شرایطی که کنترل‌کننده به صورت سخت‌افزاری با سیستم شبیه‌سازی شده در ارتباط باشد، به آن اختار، سخت‌افزار در حلقه کنترل<sup>۱</sup> نیز گفته می‌شود. شماتیک این حالت در شکل ۱۴ نشان داده شده است. همانطور که در این شکل مشخص است، کنترلر بر روی برد اصلی خود و از طریق کارت‌های ورودی و خروجی با مدل سیستم در ارتباط است.

### سخت‌افزار در حلقه (HIL)

در این ساختار، شبیه‌سازی به صورت زمان-حقیقی اجرا شده و با ایجاد یک مدل مجازی برای محیط پیرامون و دینامیک سیستم و برقراری ارتباط بین آن و سایر سخت‌افزارها (کنترلر، سنسورها و عملگرها) امکان تست و اعتبار‌سنجی سیستم‌های کنترلی در یک محیط شبه واقعی فراهم می‌گردد. به عبارتی دیگر، تمامی ارتباطات میان کنترل‌کننده و مدل (در صورت امکان سنسورها و عملگرها) به صورت واقعی برقرار می‌گردد. این ساختار برای

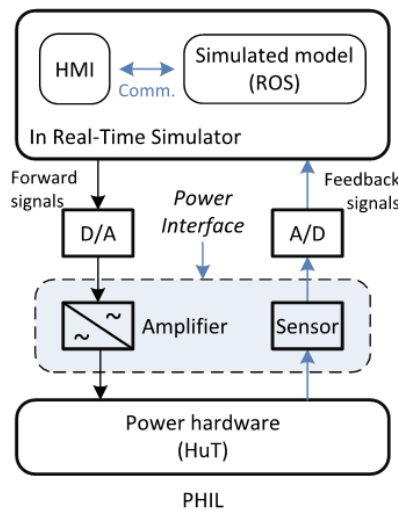
<sup>۱</sup> Controller hardware-in-the-loop (CHIL)



شکل ۱۴- شماتیک روش CHIL

عنوان مثال برای تست عملکرد کنترل‌کننده موتور، تست عملکرد وسایل محافظ مانند رله به کار گرفته می‌شود. شماتیک این حالت در شکل ۱۵ نشان داده شده است [۶].

چنانچه، سخت‌افزار قدرت از طریق سنسورها و تقویت‌کننده‌های قدرت به مدل متصل باشد، به این ساختار، سخت‌افزار در حلقه قدرت<sup>۱</sup> می‌گویند. این ساختار کاربردهای بسیار گوناگونی دارد که به



شکل ۱۵- شماتیک روش PHIL

می‌گیرد از قبیل خواندن ورودی‌ها، حل معادلات، انتقال داده‌ها میان نودها و مقداردهی خروجی‌ها بر عهده نرم‌افزار شبیه‌سازی می‌باشد. علاوه بر آن تحلیل و نمایش نتایج و ایجاد یک رابط کاربری

**ساختار نرم‌افزاری شبیه‌سازهای زمان-حقیقی**

همانطور که گفته شد، مدیریت کلیه عملیاتی که در یک گام شبیه‌سازی زمان-حقیقی صورت

<sup>1</sup> Power hardware-in-the-loop (PHIL)



مناسب نیز از وظایف نرم‌افزار می‌باشد. بطور کلی بستر نرم‌افزاری شبیه‌سازی از دو بخش تشکیل می‌شوند: ۱. نرم‌افزار سیستم عامل، ۲. نرم‌افزار کاربردی. بر اساس نوع شبیه‌ساز ممکن است سیستم عامل خاصی نیاز باشد اما معمولاً در سیستم عامل ویندوز قابل اجرا هستند. نرم‌افزارهای کاربردی، محیطی را برای مدل‌سازی سیستم تحت شبیه‌سازی فراهم می‌کنند. به عنوان مثال محیط Matlab\Simulink، نرم‌افزار Labview و نرم‌افزارهای دیگر مانند Maple و Dymola نمونه‌هایی از نرم‌افزارهای کاربردی هستند که برای ایجاد مدل‌های مختلف مکانیکی، قدرت و سیستم‌های کنترلی به منظور شبیه‌سازی استفاده می‌شود. ابزارهای مدل‌سازی دیگر مانند RT-Events، PT-XSG، RT-Drive نیز نمونه‌هایی از توسعه محیط Matlab\Simulink می‌باشند، که به منظور اجرای زمان-حقیقی مدل‌های توسعه داده شده مورد استفاده قرار گیرند [۴].

بطور کلی از ویژگی‌های یک نرم‌افزار کاربردی مناسب برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

- ↪ برخورداری از کتابخانه‌های وسیع برای مدل‌سازی سیستم‌ها.
- ↪ برخورداری از حل‌کننده‌های عددی قوی با طول گام ثابت و متغیر.
- ↪ برخورداری از ابزارهای مدیریت داده برای مدیریت فایل‌های مدل و داده.

↪ برخورداری از ابزارهای آنالیز مدل برای بهبود دادن ساختار مدل و افزایش سرعت شبیه‌سازی.

↪ برخورداری از ابزارهای گرافیکی برای نمایش اطلاعات و ارتباط با کاربر.

↪ برخورداری از ابزارهای ارتباطی متنوع جهت ارتباط داده‌ای با پروتکل‌های مختلف.

↪ برخورداری از قابلیت ارتباط با نرم‌افزارهای کاربردی دیگر و تبادل داده.

### بررسی نرم‌افزارهای کاربردی مرسوم برای شبیه‌سازی

در این قسمت مقایسه‌ای از جنبه‌های گوناگون نظیر زبان و نحوه برنامه‌نویسی، ارتباط گرافیکی با کاربر، ارتباط با کارت‌های ورودی و خروجی و... بین نرم‌افزارهای شبیه‌سازی متداول Labview، Matlab\Simulink، Maplesim و Dymola انجام می‌گیرد.

#### زبان و نحوه برنامه‌نویسی

زبان برنامه‌نویسی نرم‌افزار Labview، زبان گرافیکی می‌باشد، که به وسیله آیکون‌های گرافیکی و بلوک دیاگرام نوشته می‌شود و به صورت مستقیم به کد ماشین تبدیل می‌گردد. این زبان برنامه‌نویسی شامل تمامی مفاهیم موجود در زبان‌های برنامه‌نویسی سنتی مانند حلقه، متغیر، نوع داده و ... می‌باشد. همچنین این زبان برخلاف زبان‌های دیگر که به صورت ترتیبی اجرا می‌شوند، بر اساس گردش داده اجرا می‌گردد. فهمیدن این زبان



می کند و شامل مجموعه وسیعی از نمایشگرها می باشد که کاربر می تواند از آن ها استفاده کند.

### ارتباط با کارت های ورودی و خروجی و سخت افزارهای جانبی

تمامی ۴ نرم افزار مورد بررسی از قابلیت ارتباط با کارت های PCI و سخت افزارهای جانبی با پروتکل های ارتباطی مختلف برخوردارند. اما در این میان نرم افزار LabVIEW به علت ماهیت صنعتی آن و پشتیبانی از کارت های شرکت NI از کیفیت ارتباطی و قابلیت اطمینان بالاتری برخوردار است. همچنین نرم افزار Matlab به علت گستردگی استفاده از آن در کاربردهای مختلف آکادمیک و آزمایشگاهی، عموماً درایورهای آماده برای محدوده وسیعی از شرکت ها برای این نرم افزار توسعه داده شده است.

### ارتباط با نرم افزارهای دیگر

نرم افزار Labview می تواند از طریق ابزار Simulation Interface Toolkit با محیط سیمولینک از نرم افزار Matlab ارتباط برقرار کند. شبیه ساز Maplesim نیز می تواند با نرم افزارهای Matlab، Labview، Vissim و Motion solve ارتباط برقرار نماید. با استفاده از ارتباط دهنده با سیمولینک، مدل های شبیه سازی شده در Maplesim به صورت اتوماتیک به بلوک های S-Function تبدیل می شوند. این بلوک ها برای اجرای سریع و زمان-حقیقی توسط سیمولینک مناسب هستند. همچنین با ارتباط این شبیه ساز با Labview مدل های آن به صورت اتوماتیک به

برنامه نویسی نسبت به زبان های دیگر بسیار آسان تر است و زمان کمتری برای درک آن نیاز است. علاوه بر این مزایا، LabVIEW قابلیت اجرای کدهای نوشته شده به زبان های C و کدهای m. از Matlab را نیز دارد. زبان برنامه نویسی در Matlab\Simulink زبان گرافیکی می باشد که دارای کتابخانه های بسیار متنوع برای پردازش اطلاعات و مدل سازی در زمینه های مختلف است. نحوه برنامه نویسی به صورت بلوک دیاگرام است و می تواند کدهای m. را نیز در ساختار خود اجرا کند. مدل سازی و برنامه نویسی در نرم افزار Maple و Dymola با استفاده از زبان برنامه نویسی Modelica است که یک زبان برنامه نویسی به صورت شی گرا است. در نتیجه علاوه بر سهولت برنامه نویسی برای کاربر، توسعه و یا تغییر مدل ها نیز بسیار آسان تر است و از اطمینان بالایی برخوردار می باشد. این زبان همانند زبان های برنامه نویسی C++ و یا جاوا از یک ساختار الگوریتمیک و به صورت دستورات جمله ای برخوردار است اما جمله های برنامه در آن به صورت معادلات جبری و یا دیفرانسیلی و یا در فرم ماتریس دیده می شوند و می توانند کاملاً به فرم پارامتری و سمبولیک نوشته شوند [10].

### ارتباط گرافیکی با کاربر در حین انجام برنامه

در بین نرم افزارهای شبیه سازی، Labview امکان ارتباط آسان تر با کاربر را ایجاد می کند. این نرم افزار با ایجاد ارتباط گرافیکی با کاربر امکان مشاهده داده و وارد کردن ورودی را در حین انجام برنامه، فراهم



به Dymola وارد نمود. این توانایی باعث می‌گردد تا مدل‌های فیزیکی در Dymola بتوانند به سیستم‌های کنترلی پیاده‌سازی شده در Simulink کوپل شوند [9]. در **Error! Reference source not found.** ویژگی‌های نرم‌افزارهای شبیه‌سازی با یکدیگر مقایسه شده‌اند.

بلوک‌هایی برای استفاده آسان در Labview تبدیل می‌گردند و کدهای مدل برای شبیه‌سازی زمان-حقیقی با سرعت بالا، بهینه می‌شوند. نرم افزار Dymola می‌تواند مدل‌های توسعه داده شده در نرم‌افزارهای CAD را خوانده و در محیط خود اجرا نماید. همچنین می‌توان مدل‌های Dymola را در سیمولینک وارد کرد و یا مدل‌های سیمولینک را

جدول ۱- مقایسه ویژگی‌های نرم‌افزارهای کاربردی شبیه‌سازی

نرم‌افزارهای شبیه‌سازی	زبان برنامه‌نویسی	قابلیت ارتباط گرافیکی با کاربر در حین اجرای برنامه	پشتیبانی از پروتکل‌های ارتباطی
Matlab/Simulink	گرافیکی	✓	✓
Labview	گرافیکی	✓	✓
Maplesim	Modelica	×	✓
Dymola	Modelica	×	✓

### منابع

- [1] J. Belanger, "The what, where and why of real time simulation" IEEE International Conference, 2010.
- [2] E. Bringmann, "Model based testing of automotive systems," International Conference on Software Testing, Verification, and Validation, 2008
- [3] P. M. Menghal, "Real time simulation: recent progress and challenges," IEEE International Conference on Power, Signals, Controls and Computation (EPSCICON), 2012.
- [4] M. O. Faruque, "Real-time simulation technologies for power systems design, testing and analysis," IEEE Power and Energy Technology Systems Journal, 2015
- [5] "Processor-in-the-Loop (PIL)" Internet: <https://www.plexim.com/plecs/pil>

### نتیجه‌گیری

در این مقاله مروری جامع بر مفاهیم شبیه‌سازی زمان-حقیقی و مراحل مورد نیاز در این شبیه‌سازی صورت گرفت و چالش‌های شبیه‌سازی زمان-حقیقی و به طور خاص مشکلات شبیه‌سازی زمان-حقیقی سیستم‌های الکتریکی شرح داده شد. همچنین انواع ساختارهای قابل اجرا در یک شبیه‌سازی شامل ساختارهای مدل-در-حلقه، نرم‌افزار-در-حلقه، پردازشگر-در-حلقه و سخت افزار-در-حلقه تشریح گردید. در پایان بسترهای نرم‌افزارهای مرسوم جهت شبیه‌سازی زمان-حقیقی مورد بررسی و مقایسه قرار گرفت.



- [8] S. Mikili, “Review of real time simulator and the steps involved for implementation of a model from Matlab/Simulink to real-time,” Springer, 2014.
- [9] Dymola and Simulink” <http://www.claytex.com/products/dymola/features/simulink-interface>
- [10] J. J. V. Boekel, “SimMechanics, MapleSim and Dymola: a first look on three multibody packages”, DCT, 2009
- [6] W. Li, “Real-time simulation of a wind turbine generator coupled with a battery super capacitor energy storage system,” IEEE Transactions On Industrial Electronics, VOL. 57, NO. 4, 2010.
- [7] F. E. Cellier and E. Kofman, “Continues time simulation,” Springer, 2006.

## تغییر تعریف چهار یکای پایه SI

### نوذر ایرانی

تعریف چهار یکای پایه سیستم SI مورد بازنگری و بروزرسانی قرار می‌گیرند. بر اساس طرحی که از سال ۲۰۱۱ در حال پیگیری است، نتیجه تحقیقات و اقدامات در این رابطه در کنفرانس بین‌المللی اوزان‌ها و مقیاس‌ها (CGPM) در پاریس سال ۲۰۱۸ به رأی گذاشته می‌شود، مبنا و روش اندازه‌گیری یکاهای آمپر، کیلوگرم، کلون و مول تغییر خواهد کرد و مقادیر جدید در ماه مه سال ۲۰۱۹ میلادی (بهار سال ۱۳۹۸) به صورت رسمی اعمال خواهند شد. البته باید در نظر داشت که این تغییرات بیشتر به قابلیت اطمینان این یکاها و بهبود عدم قطعیت اندازه‌گیری مراجع بین‌المللی این کمیت‌ها منجر خواهد شد و به پژوهشگران در انجام پروژه‌های مربوط به اندازه‌شناسی علمی کمک خواهد کرد.

همچنین لازم به ذکر است که برای انجام تغییرات مورد اشاره، نحوه اندازه‌گیری بعضی از ثابت‌های فیزیکی از جمله ثابت پلانک، بار الکترون، ثابت بولتزمن و عدد آوگادرو مورد بازنگری قرار می‌گیرند. بی‌تردید باز تعریف یکاهای اصلی مانند جرم، دما، جریان الکتریکی و مقدار ماده گام بلندی در راستای بهبود عدم قطعیت اندازه‌گیری‌ها و حل مشکل مرجع بین‌المللی جرم که تعریف فیزیکی دقیقی برای باز تولید آن وجود ندارد خواهد بود.

