

طراحی کنترل کننده بهینه فشار در یک تونل باد فراصوت دمشی با استفاده از الگوریتم ژنتیک

مهرداد بزاززاده^۱، مجتبی دهقان منشادی^۲، امین نظریان شهربابکی^{۳*}، علی شهرباری^۳

اطلاعات مقاله	چکیده
دریافت مقاله: ۱۳۹۲/۰۹/۱۴	
پذیرش مقاله: ۱۳۹۳/۰۸/۲۴	
واژگان کلیدی:	
تونل باد فراصوت دمشی، کنترل فشار، کنترل کننده PI، شیر کنترل جریان، عدد ماخ، الگوریتم ژنتیک.	به منظور کنترل عدد ماخ در محفظه آزمایش یک تونل باد فراصوت دمشی، کنترل فشار در محفظه آرامش توسط یک یا چند شیر کنترل جریان صورت می پذیرد. در این مقاله، ابتدا با بررسی روابط دقیق ریاضی حاکم بر اجزای مختلف یک تونل باد فراصوت دمشی خاص و بهره گیری از اطلاعات سازندگان معتبر تجهیزات و شیرآلات کنترلی، مدل ریاضی غیر خطی سیستم در محیط نرم افزار متلب/سیمولینک برپا شده است. در گام بعد با معرفی الگوریتم کنترلی مناسب، یک کنترل کننده کلاسیک تناسبی-انترگالی (PI) برای کنترل فشار محفظه آرامش به مدل تونل باد اضافه گردیده است. در مرحله بعد با استفاده از نتایج تجربی مربوط به تونل باد دانشگاه تگزاس، صحت گذاری مدل برپا شده صورت گرفته است. در گام نهایی به منظور بهینه سازی پارامترهای کنترل کننده PI، از یک فرآیند تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. بهینه سازی کنترل کننده توسط الگوریتم ژنتیک، منجر به کمینه شدن مقادیر خطای حالت ماندگار، حداکثر جهش و زمان نشست پاسخ کنترلی گردید. نتایج ارائه شده به همراه کنترل کننده بهینه برای عدد ماخ ۳ نشان از دقت قابل ملاحظه سیستم و کنترل آن می باشد.

موضوع بر هیچ پژوهشگری در علم سیالات و آیرودینامیک پوشیده نیست.

یکی از انواع تونل های باد فراصوت، تونل های باد دمشی است که برای ارضای عدد ماخ در محفظه آزمایش، محفظه آرامش آنها در یک فشار ثابت فعالیت می کند. این مهم توسط یک یا چند شیر کنترلی و سیستم کنترل کننده فشار صورت می پذیرد.

امروزه موضوع طراحی سیستم کنترلی هوشمند در تونل باد از نوع دمشی اهمیت بیشتری دارد، چرا که با توجه به محدود بودن مدت زمان اجرای سیستم به دلیل محدودیت حجم مخازن ذخیره هوا، کنترل کننده باید در زمان کوتاهی حالت گذرای شروع را طی کند و جریان

۱- مقدمه

علی رغم پیشرفت های چشمگیر در زمینه شبیه سازی عددی، در حوزه های مختلف علوم مهندسی مانند مکانیک سیالات و آیرودینامیک همچنان استفاده از آزمایش های تونل باد به عنوان پشتوانه ای برای تایید نتایج نرم افزاری بشمار می آید. همچنین تونل باد در علم آیرودینامیک تجربی از جمله وسائلی می باشد که کارایی خود را بصورت کامل به نمایش گذاشته است، بطوریکه اهمیت این

* پست الکترونیک نویسنده مسئول: anazarian@mut-es.ac.ir

۱. دانشیار مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 ۲. استادیار مجتمع دانشگاهی مکانیک و هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر
 ۳. کارشناسی ارشد در مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی مالک اشتر

به کنترل فرآیند، براساس یکپارچه سازی عددی معادلات دیفرانسیل حاکم بر شبیه‌سازی تونل باد فراصوت دمشی طراحی شده است و در مرحله بعد نیز پارامترهای کنترل‌کننده به آن اضافه و به منظور ایجاد شرایط پایدار در تونل باد، تنظیم و بهینه شده‌اند.

همچنین در سال ۲۰۰۷ آقای کامرون (Cameron) و همکاران [۵] به بحث طراحی و بهینه‌سازی کنترل‌کننده شرایط محفظه آرامش در تونل باد فراصوت دمشی ساخته شده در دانشگاه آلاباما (Alabama) پرداخته‌اند. آنها با بهره‌گیری از شبکه‌های عصبی مصنوعی، مدل شبیه‌ساز تونل باد را برپا کرده‌اند. سپس با بهره‌گیری از یک الگوریتم تکاملی مانند الگوریتم ژنتیک (Genetic Algorithm)، بهینه‌سازی عملکرد کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی-مشتق گیر (PID) بکار رفته در تونل باد انجام شده است.

در طراحی کنترل‌کننده‌ها، مبحث بهینه‌سازی پارامترهای قابل تنظیم کنترل‌کننده برای بهبود پاسخ سیستم همواره مورد توجه طراحان بوده است. در این میان بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده PID موضوعی است که تاکنون پژوهش‌های بسیار زیادی در این خصوص صورت گرفته است. برای نمونه هانگ ژانگ (Hang Zhang) و همکاران [۸] به وسیله الگوریتم ژنتیک، جلیوند و همکاران [۹] به وسیله الگوریتم بهینه‌سازی ازدحام ذرات (PSO) به بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده PID پرداخته‌اند. در بسیاری از مسائل کاربردی نیز از بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده استفاده شده‌است. در این راستا آقای ژو کلیانگ (Zhou keliang) و همکارانشان [۱۰] از الگوریتم PSO برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID در کنترل دمای بخار استفاده کرده‌اند. همچنین آقای ال-گمال (El-Gammal) و همکارانشان [۱۱] از همین الگوریتم برای بهینه‌سازی کنترل‌کننده PID موتور برای DC استفاده کرده‌اند.

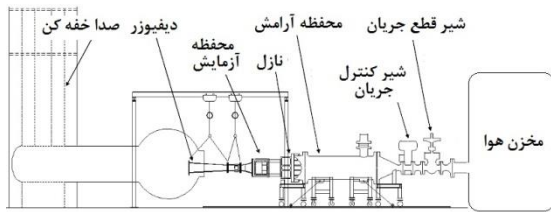
الگوریتم ژنتیک، الهامی از علم ژنتیک و نظریه تکامل داروین است و بر اساس بقای برترین‌ها یا انتخاب طبیعی

مطلوب برای ماخ مورد نظر را سریعاً فراهم آورد. در این راستا، عملکرد کنترل‌کننده باید به نحوی باشد که فشار در محفظه آرامش نوسانی نشود، چرا که در این صورت احتمال وقوع پدیده خطرناک ارگان پایپینگ (Organ piping) یا نوسانی شدن فشار سیستم پیش خواهد آمد [۱ و ۲]. همچنین در طراحی کنترل‌کننده فشار برای کنترل جریان تونل باد فراصوت دمشی، کاهش مدت زمان گذرا در لحظه شروع به کار تونل باد و افزایش کیفیت پاسخ در زمره اهداف کنترلی مورد نظر این پژوهش می‌باشند.

تاکنون در زمینه کنترل تونل‌های باد فراصوت دمشی پژوهش‌های مختلفی با رویکردهای کنترلی متفاوتی انجام شده است [۷-۳]. در این پژوهش‌ها، شبیه‌سازی مدل غیر خطی تونل باد به همراه الگوریتم‌های مختلف کنترل‌کننده فشار مطرح گردیده و بعضاً روش‌هایی به منظور بهینه‌سازی مدل شبیه‌ساز، الگوریتم و یا ثوابت کنترل‌کننده آن ارائه شده است.

در یکی از این پژوهش‌ها در سال ۲۰۰۹، آقای سیلوا (Silva) و همکاران وی [۳] به برپایی یک کنترل‌کننده عدد رینولدز بر پایه روابط آیزنتروپیک و شرایط ایده‌آل (بدون در نظر گرفتن انتقال حرارت) در یک تونل باد فراصوت از نوع دمشی پرداخته‌اند. آنها با ارائه نتایج حاصل از مدل شبیه‌سازی شده، به مقایسه عملکرد تونل باد مجهز به کنترل‌کننده رینولدز در مقایسه با کنترل‌کننده فشار محفظه آرامش پرداخته‌اند.

پژوهشی دیگر که در این زمینه صورت گرفته است مربوط به کنترل یک تونل باد فراصوت دمشی در دانشگاه آریلینگتن تگزاس (UT Arlington) واقع در ایالات متحده آمریکا می‌باشد، که در سال ۲۰۰۸ توسط آقای براون (Braun) و همکاران وی [۴] صورت پذیرفته است. در این پژوهش، یک سیستم کنترل‌کننده تناسبی-انتگرالی که معمولاً برای سیستم‌هایی با یک ورودی و یک خروجی مناسب می‌باشد، در محیط نرم‌افزار لب-ویوو (LabVIEW) برپا شده است. همچنین الگوریتم مربوط



شکل ۱- نمایی از اجزای یک تونل باد فراصوت دمشی [۷]

برای کنترل سرعت جریان (عدد ماخ) در محفظه آزمایش تونل باد فراصوت دمشی، می‌بایست فشار در محفظه آرامش کنترل شود. بدین منظور لازم است یک مدل ریاضی از تونل باد شامل قسمت‌های اصلی مانند: مخزن ذخیره هوا، شیر کنترل جریان، محفظه آرامش و نازل مدلسازی شود. در ادامه این بخش به بررسی عملکرد دینامیکی تک تک اجزای سیستم مورد نظر پرداخته شده است.

۲-۱- مخازن ذخیره هوا

مخازن در یک تونل باد فراصوت دمشی شامل حجم معینی از هوای فشرده در یک فشار مشخص می‌باشند. تعیین حجم مخزن و نسبت فشار راه‌اندازی تونل از جمله مسائل مهم و قابل تأمل در این گونه تونل‌های باد می‌باشد. این موضوع تا حدود زیادی به میزان جریان جرمی مورد نیاز در تونل باد و تعداد دفعات عملکرد آن بستگی دارد. در این راستا، استفاده از تانک‌های ذخیره با حجم و نسبت فشار بالا موجب ایجاد یک حاشیه امنیت از نظر فراهم کردن فشار اولیه لازم برای راه‌اندازی سریع تونل باد (خروج امواج ضربه‌ای از دیفیوزر) و عملکرد مناسب در اعداد ماخ بالا می‌شود.

با فرض گاز ایده‌آل، تغییرات فشار داخل مخزن ذخیره هوا در مدت زمان اجرای تونل باد بصورت رابطه (۱) برآورد می‌گردد [۴].

$$\frac{dP_T}{dt} = - \left(\frac{\gamma RT_T}{V_T} \right) \dot{m}_v \eta \quad (1)$$

در رابطه فوق، P_T فشار هوای داخل مخزن با واحد پاسکال، T_T دمای هوای مخزن با واحد کلوین، V_T حجم مخزن با واحد مترمکعب و R ثابت گازها با واحد $J/Kg.K$ است. همچنین γ نرخ گرمای ویژه، \dot{m}_v دبی

استوار است. یک کاربرد متداول الگوریتم ژنتیک، استفاده از آن بعنوان تابع بهینه‌کننده است. در این پژوهش، از الگوریتم ژنتیک برای بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده PI طراحی شده برای کنترل فشار جریان، در تونل باد فراصوت دمشی استفاده شده است.

ساختار تحقیق پیش رو به این صورت است که در ابتدا با توجه به مشخصات یک تونل باد فراصوت دمشی خاص، مدل ریاضی غیرخطی آن در قالب نرم افزار متلب/سیمولینک برپا می‌گردد. در گام بعد، یک کنترل‌کننده PI برای کنترل زاویه بازشدگی شیر کنترل با هدف کنترل فشار در محفظه آرامش به مدل اضافه خواهد شد. سپس با استفاده از نتایج تجربی و عددی مربوط به یک تونل باد فراصوت دمشی ساخته شده در دانشگاه آریلینگتن تگزاس، صحت گذاری مدل انجام خواهد شد [۴]. در ادامه بحث بهینه‌سازی پارامترهای کنترل‌کننده مطرح می‌شود و در انتها، نتایج شبیه‌سازی تونل باد به همراه کنترل‌کننده بهینه‌سازی شده ارائه خواهد شد.

۲- اجزای تونل باد فراصوت دمشی

به منظور برپایی انواع سیستم‌های کنترل‌کننده در محیط نرم افزاری، مدلی با دقت قابل ملاحظه از مکانیزم مورد نظر لازم می‌باشد. مکانیزم مورد نظر در این پژوهش، یک تونل باد فراصوت دمشی است که در دانشگاه صنعتی مالک اشتر در دست ساخت می‌باشد.

در تحلیل رفتار دینامیکی یک تونل باد فراصوت دمشی، آن را می‌توان به ۶ بخش اصلی شامل، مخازن ذخیره هوا، شیر کنترل جریان، محفظه آرامش، نازل، محفظه آزمایش و دیفیوزر تقسیم کرد. همچنین به منظور برپایی یک مدل شبیه‌ساز از عملکرد دینامیکی سیستم، لازم است تمامی این بخش‌ها به طور دقیق مورد مطالعه قرار گرفته و رفتار سیال در هر بخش به درستی شبیه‌سازی گردد. در شکل ۱ بخش‌های مختلف یک تونل باد فراصوت دمشی نشان داده شده است.

این پارامتر از کاتالوگ‌های شرکت سازنده شیر کنترلی [۱۴]، با توجه به نوع و اندازه شیر استخراج گردیده و در قالب جداول ارجاع (Lookup Table) به مدل شبیه ساز تونل باد اعمال شده است.

۲-۳- محفظه آرامش

جریان هوا بعد از عبور از شیر کنترل به محفظه آرامش می‌رسد. این بخش وظیفه کاهش سرعت هوا و اغتشاشات را بر عهده دارد. در این بخش انرژی جنبشی تا حدود زیادی کاهش یافته و فشار استاتیکی افزایش می‌یابد. با فرض گاز ایده‌آل و نوشتن معادله تغییرات انرژی، فشار در محفظه آرامش به صورت رابطه زیر حاصل خواهد شد [۴ و ۵].

$$\frac{dP_p}{dt} = \left(\frac{\gamma R}{V_T} \right) (T_T \dot{m}_v - T_p \dot{m}_n) \quad (3)$$

در رابطه (۳)، P_p فشار محفظه آرامش، γ نرخ گرمای ویژه، R ثابت گازها، V_T حجم مخزن، T_T و T_p ترتیب دمای هوای درون مخزن و محفظه آرامش، \dot{m}_v دبی جرمی عبوری از شیر کنترل و \dot{m}_n دبی جرمی عبوری از نازل می‌باشد.

۲-۴- نازل

نازل‌های تونل‌های باد فراصوت دمشی از نوع نازل همگرا-واگرا می‌باشند که وظیفه افزایش سرعت جریان را عهده دار می‌باشند. جریان مادون صوت با عبور از محفظه آرامش و گلوگاه نازل، برای رسیدن به سرعت‌های فراصوت مهیا می‌گردد.

برای شبیه‌سازی دبی جرمی عبوری از نازل همگرا-واگرا در سرعت‌های فراصوت از رابطه (۴) استفاده شده است [۴].

$$\dot{m}_N = A_N P_p \sqrt{\gamma \left(\frac{2}{\gamma+1} \right)^{\frac{\gamma+1}{\gamma-1}} \frac{1}{ZRT_p}} \quad (4)$$

در رابطه (۴)، A_N سطح مقطع گلوگاه نازل با واحد m^2 می‌باشد.

۳- کنترل کننده فشار محفظه آرامش

جرمی عبوری از شیر کنترل جریان با واحد (Kg/s) و η ضریب افت مربوط به لوله کشی‌های موجود قبل از شیر کنترل می‌باشد که از راه آزمایش به دست می‌آید.

۲-۲- شیرکنترل

برای مدل‌سازی دبی عبوری از شیر کنترلی دو نوع روش وجود دارد که عبارتند از: روش سنتی و روش استاندارد. بسته به این که شرکت سازنده شیر، کدام روش را برای محصولات خود در نظر گرفته، از یکی از این دو روش استفاده می‌شود. در مقایسه دو روش استاندارد و سنتی برای مدل‌سازی دبی شیر کنترلی، روش استاندارد نسبت به روش سنتی مناسب‌تر به نظر می‌رسد. زیرا در معادلات مربوط به روش استاندارد، فاکتورهای مربوط به هندسه خط لوله، اتصالات و تبدیلات به کار رفته برای اتصال شیر به خط لوله در نظر گرفته شده است. امروزه شرکت‌های سازنده شیرهای کنترلی به استفاده از روش استاندارد تمایل بیشتری دارند لذا مشخصه‌های مربوط به محصول خود را بیشتر در قالب شرایط استاندارد ارائه می‌کنند.

در تونل باد مورد نظر این پژوهش، از یک شیر پروانه‌ای ساخت شرکت بری (Bray) استفاده شده است. مدل‌سازی شیر کنترلی بر اساس روابط استاندارد صورت گرفته است. این روابط دبی جرمی عبوری از شیر کنترل جریان را به صورت رابطه (۲) پیش‌بینی می‌کند [۱۲ و ۱۳].

$$\dot{m}_v = C_v N_s F_p Y P_T \sqrt{\frac{x M_a}{T_T Z}} \quad (2)$$

در رابطه (۲)، C_v ضریب اندازه شیر، N_s ضریب یکسان سازی واحد، F_p ضریب تصحیح هندسه خط لوله، Y فاکتور انبساط، x نرخ افت فشار، M_a جرم مولکولی هوا و Z فاکتور تراکم‌پذیری می‌باشد. لازم به ذکر است که هر یک از پارامترهای رابطه (۲) بصورت جداگانه دارای روابطی خاص می‌باشند که در مرجع [۱۳] ارائه شده است.

با توجه به رابطه (۲)، ضریب اندازه شیر یکی از پارامترهای ورودی به مدل شبیه ساز شیر کنترلی است که در یک زاویه بازشدگی خاص دارای مقداری منحصر بفرد می‌باشد.

در فرآیند ساخت تونل باد مذکور در دانشگاه صنعتی مالک اشتر گردیده است.

الگوریتم کنترل کننده فشار محفظه آرامش در تونل باد فراصوت دمشی مورد نظر در شکل ۲ ارائه گردیده است. در الگوریتم شکل ۲، اختلاف فشار محفظه آرامش و فشار مطلوب در طول مدت زمان عملکرد سیستم، در قالب سیگنال خطا به عنوان ورودی کنترل کننده اعمال می-گردد. خروجی کنترل کننده نیز شامل تابع بازشدگی شیر کنترل جریان می باشد که در یک مسیر حلقه بسته مدل را تحریک می نماید.

تابع تبدیل کنترل کننده PI برای کنترل فشار محفظه آرامش، نسبتی از میزان زاویه بازشدگی شیر کنترل به خطای پارامتر کنترلی در حوزه لاپلاس و به صورت رابطه (۵) می باشد [۱۶ و ۱۷].

$$G(s) = \frac{\theta(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{T_I s}\right) \quad (5)$$

با در نظر گرفتن رابطه (۵) و اعمال معکوس لاپلاس برای تابع تبدیل ارائه شده، تغییرات زاویه بازشدگی شیر کنترل در حوزه زمان را می توان به صورت روابط (۶) و (۷) نمایش داد.

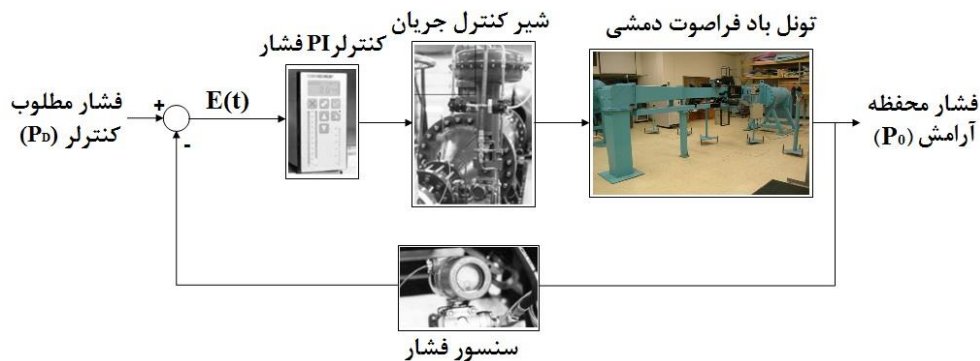
$$\frac{d\theta(t)}{dt} = -K_p \frac{dP_0}{dt} + \frac{K_p}{T_I} (P_D - P_0) \quad (6)$$

$$\Delta\theta = -K_p \frac{\Delta P_0}{\Delta t} + \frac{K_p}{T_I} E, \quad \frac{K_p}{T_I} = K_I \quad (7)$$

تونل های باد فراصوت دمشی برای ارضای عدد ماخ مورد نظر در محفظه آزمایش نیازمند عملکرد در یک فشار ثابت می باشند. بدین منظور، می بایست سیستم های کنترل اتوماتیکی در بالادست تونل های باد دمشی طراحی گردد تا با کنترل مقدار زاویه باز و بسته شدن شیر کنترل جریان در طول زمان کارکرد تونل باد، فشار مورد نیاز برای تامین عدد ماخ مورد نظر را تامین نماید.

همانطور که در بخش مقدمه به آن اشاره شد، تاکنون تلاش های زیادی در جهت بهبود فرآیند کنترلی تونل های باد صورت گرفته است. طراحی کنترل کننده بر مبنای شبکه عصبی [۱۵]، و کنترل کننده از پیش برنامه نویسی شده [۷] از جمله این تلاش ها می باشد.

البته، چه در کنترل کننده های بر مبنای شبکه عصبی و چه کنترل کننده از پیش برنامه نویسی شده احتمال وقوع پدیده ارگان پایپینگ در مرحله به دست آوردن داده برای آموزش شبکه عصبی و اجرای الگوریتم کنترل کننده از پیش برنامه نویسی شده وجود دارد. لازم به ذکر است همچنان مرسوم ترین روش در کنترل تونل های باد فراصوت دمشی، استفاده از کنترل کننده های کلاسیک PID می باشد. بنابراین، استفاده از یک کنترل کننده صنعتی تناسبی- انتگرالی یا کنترل کننده PI، مورد توجه



شکل ۲- الگوریتم کنترل کننده فشار و اجزای آن در تونل باد فراصوت دمشی مورد نظر

مخازن و محفظه آرامش در طول اجرای آزمایشی تونل باد قابل اندازه گیری می باشند.

از دیگر پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی سیستم، عدد ماخ مورد نظر در محفظه آزمایش می باشد. تونل باد دانشگاه صنعتی مالک اشتر با توجه به نیاز کشور، به منظور عملکرد در اعداد ماخ ۱/۵ تا ۳ به مدت زمان حدودی ۷۸ ثانیه طراحی شده است. این تونل باد قادر است با افزایش میزان فشار هوا در مخازن، به عدد ماخ بالاتر نیز دست یابد.

از دیگر پارامترهای مورد نیاز برای طراحی سیستم مورد نظر، شبیه سازی شیر کنترل جریان و اعمال ضریب اندازه شیر در مدل نرم افزاری می باشد. ضریب اندازه شیر از کاتالوگ های سازنده مورد نظر استخراج و در قالب جداول ارجاع به مدل الصاق گردیده است.

پارامترهای مطرح گردیده، از ملزومات برپایی مدل غیر خطی تونل باد فراصوت دمشی مورد نظر می باشند. این پارامترها به همراه مقادیر دقیق در جدول ۱ ارائه شده اند.

جدول ۱- متغیرها و ثوابت طراحی در تونل باد فراصوت دمشی مورد نظر

پارامتر	مقدار	واحد
فشار اولیه مخازن ذخیره هوا	۱/۲	مگا پاسکال
حجم کل مخازن هوا	۲۲۰	متر مکعب
دمای اولیه مخازن ذخیره هوا	۳۰۰	کلوین
قطر گلوگاه نازل برای ماخ ۳	۱۶/۴۵	سانتی متر
حجم محفظه آرامش	۰/۱۲	متر مکعب
قطر هیدرولیکی محفظه آزمایش	۳۰	سانتی متر
اندازه قطر شیر کنترل جریان	۸	اینچ
ضریب افت فشار در مسیر لوله کشی	۳۰	درصد

۲-۴- برپایی مدل نرم افزاری

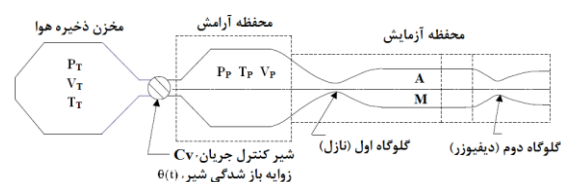
مدل ریاضی یک تونل باد فراصوت دمشی با در نظر گرفتن روابط اصلی توصیف کننده عملکرد دینامیکی تک تک اجزای سیستم و پارامترهای طراحی در نرم افزار متلب/سیمولینک برپا شده است. در برپایی مدل تونل باد، تکنیک شبیه سازی بصورت دیاگرام بلوکی مد نظر قرار

در روابط فوق، θ میزان زاویه بازشدگی شیر کنترل در هر لحظه از زمان عملکرد سیستم، E اختلاف فشار کاری محفظه آرامش و فشار مطلوب ورودی، P_0 فشار لحظه ای محفظه آرامش، P_D فشار مطلوب، T_I زمان انتگرال گیر کنترل کننده، K_P بهره تناسبی و K_I بهره انتگرال گیر کنترل کننده می باشد.

۴- مدل شبیه ساز تونل باد

۴-۱- پارامترهای طراحی

با بررسی روابط ریاضی حاکم بر اجزای مختلف تونل باد فراصوت دمشی مورد نظر، اکنون نوبت به برپایی مدل غیرخطی سیستم برپایه روابط آیزنروویک فرا رسیده است. در برپایی مدل نرم افزاری تونل باد به همراه سیستم کنترل کننده فشار، از یکسری پارامترهای عملکردی تونل باد استفاده شده است. این پارامترها در شکل ۳ ارائه شده است.



شکل ۳- شماتیکی از تونل باد مورد نظر به همراه پارامترهای مورد نیاز در برپایی سیستم کنترل کننده فشار

در شکل بالا، V_T حجم مخازن ذخیره هوا، V_P حجم محفظه آرامش و A سطح مقطع محفظه آزمایش می باشد. این ۳ پارامتر از جمله پارامترهای ثابت در طراحی هستند که قبل از طراحی و ساخت تونل باد و با توجه به نیازمندی های علمی صنعت و دانشگاه مورد بحث و انتخاب قرار گرفته اند. همچنین P_T فشار کل در مخزن ذخیره هوا، P_P فشار کل در محفظه آرامش، T_P و T_T دمای اولیه مخازن ذخیره هوا و M عدد ماخ در محفظه آرامش می باشند. لازم به ذکر است که پارامترهای مربوط به فشار و دما از طریق سنسورهای تعبیه شده در

مدل در فضای نرم افزار متلب/سیمولینک و استفاده از یک کنترل کننده PI برای کنترل فشار محفظه آرامش، مشخصات مربوط به تونل باد مرجع [۴] و شرایط آزمایش صورت گرفته برای اعتبار سنجی در شبیه سازی اعمال شده است.

این تونل باد [۴] برای تامین اعداد ماخ بین ۱/۵ الی ۴ ساخته شده و دارای مساحت مقطع محفظه آرامش برابر 0.252 m^2 ، حجم مخزن $24/5 \text{ m}^3$ و حجم محفظه آرامش برابر 0.62 m^3 ، بیشینه فشار مخزن 5 MPa می باشد. در این تونل باد از یک شیر کنترلی تویی با قطر ۶ اینچ شرکت فیشر (Fisher) با مدل ۷۲۰۰ استفاده شده است. لذا پارامترهای مربوط به شیر کنترلی از کاتالوگ شیر استخراج و در مدل شبیه ساز تونل باد اعمال گردید.

منحنی تغییرات فشار کل در مخزن و محفظه آرامش در در شکل ۷ ارائه شده است. شبیه سازی برای عدد ماخ ۱/۵ و فشار مطلوب ۱۹۰ کیلوپاسکال انجام شده است. همانطور که مشاهده می شود نتایج شبیه سازی مدل ارائه شده در پژوهش حاضر در مقایسه با نتایج تجربی و عددی مرجع [۴] همخوانی دارد. تفاوت اندک مشاهده شده در دلیل عدم تاثیر تاخیر زمانی عملگرهای شیر کنترلی، در دسترس نبودن تمامی پارامترهای مورد نیاز برای شبیه سازی نرم افزاری و خطای حاصل از شبیه سازی سیستم های دینامیکی بصورت روابط کاملاً ریاضی می باشد.

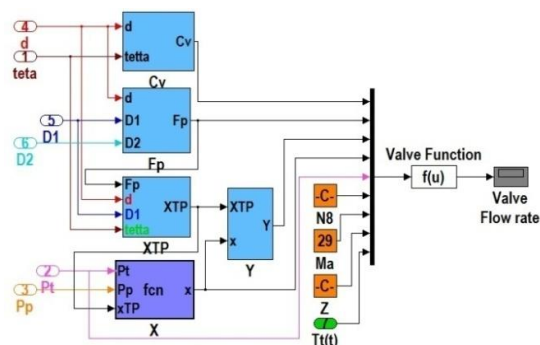
همچنین در دسترس نبودن اطلاعات دقیق مربوط به مسیر لوله کشی جریان از مخزن هوا تا شیر کنترلی، منجر به عدم تطابق کامل تغییرات فشار مخزن در مدل شبیه سازی شده با نتایج تجربی گردیده است.

گرفته است. هر یک از اجزای تونل باد به همراه روابط توصیف کننده عملکردشان بصورت یک بلوک مجزا شبیه سازی شده اند. هر یک از بلوک ها متشکل از یکسری پارامترهای ورودی و خروجی می باشند. بعنوان نمونه، پارامترهای ورودی و خروجی بلوک شبیه ساز شیر کنترلی به همراه زیرسیستم آن که در نرم افزار متلب/سیمولینک برپا شده است، در شکل های ۴ و ۵ ارائه گردیده اند.

با توجه به روابط ریاضی ارائه شده و الگوریتم کنترل کننده فشار، مدل نهایی شبیه ساز تونل باد مورد نظر در محیط نرم افزار متلب/سیمولینک مطابق با شکل ۶ برپا شده است.



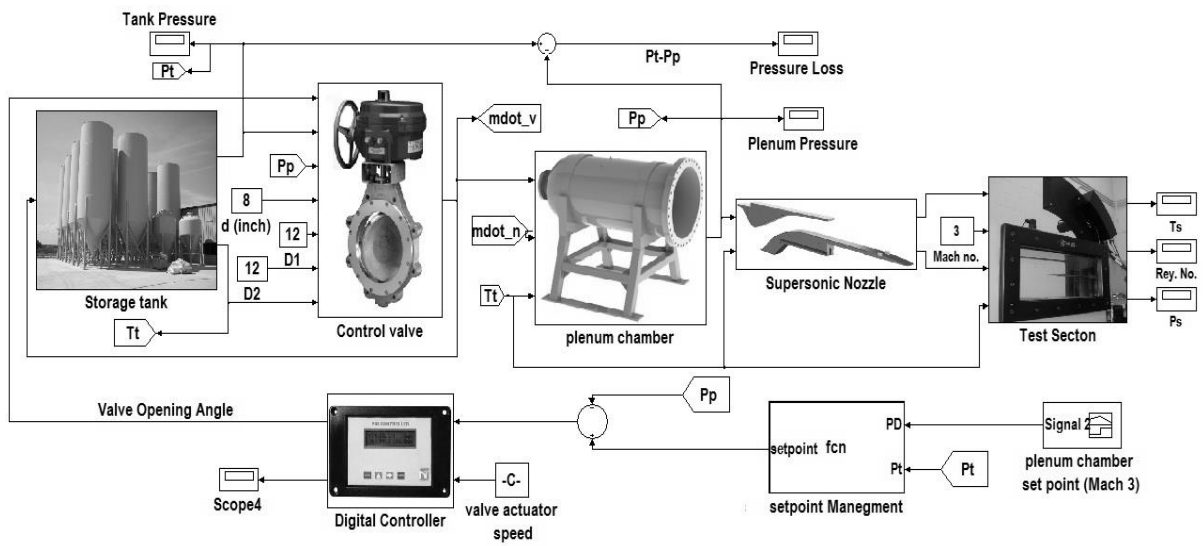
شکل ۴- پارامترهای ورودی/خروجی به/از بلوک شیر کنترلی



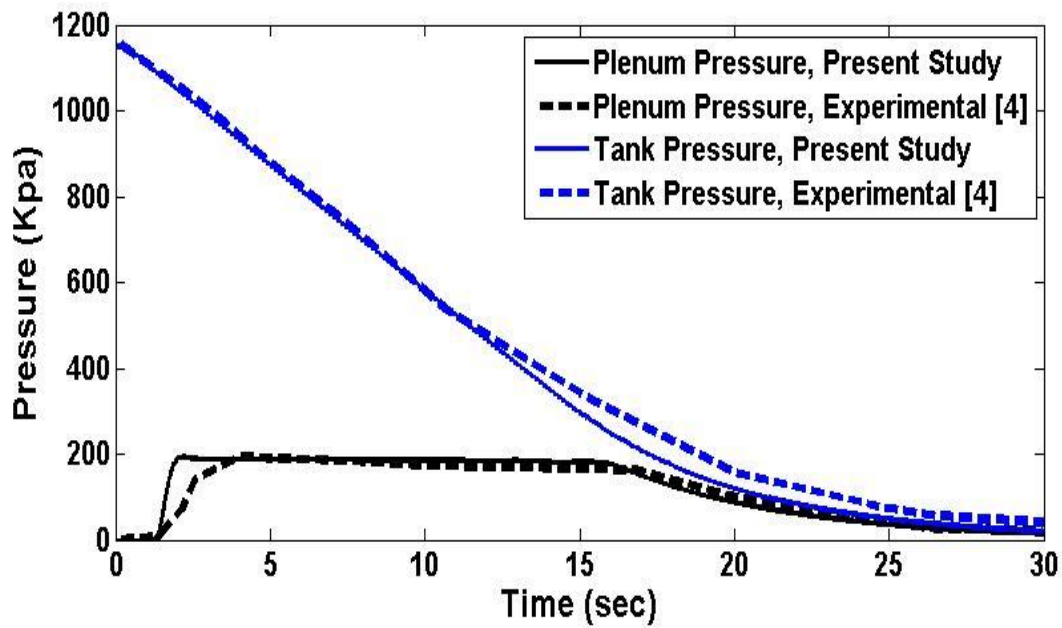
شکل ۵- زیر سیستم شبیه ساز شیر کنترلی در نرم افزار سیمولینک

۵- اعتبار سنجی مدل نرم افزاری

برای اعتبارسنجی مدل ارائه شده برای تونل باد فراصوت دمشی، از نتایج تجربی مرجع [۴] که مربوط به یک تونل باد فراصوت دمشی در دانشگاه ارلینگتن تگزاس می باشد، استفاده شده است. به این صورت که بعد از شبیه سازی



شکل ۶- شبیه سازی مدل دینامیکی تونل باد فراصوت دمشی مورد نظر در نرم افزار سیمولینک



شکل ۷- نتایج تجربی و شبیه سازی مربوط به تونل باد آرلینگتن تگزاس (عدد ماخ ۱/۵)

۶- شبیه‌سازی سیستم

در مرحله قبل، مدل دینامیکی برای تونل باد فراصوت دمشی در حال ساخت در ایران، در فضای سیمولینک نرم افزار متلب پیاده سازی شد. در این تونل باد حجم محفظه آرامش و مخزن ذخیره هوا به ترتیب $1/2$ و 220 متر مکعب می‌باشد، حداکثر فشار مخزن ذخیره 12 بار بوده و از یک شیر کنترلی پروانه‌ای با قطر 8 اینچ در آن استفاده شده است. قطر لوله ورودی و خروجی شیر کنترلی 12 اینچ بوده و برای اتصال شیر کنترل به مسیر لوله کشی، از کاهنده‌های مخروطی (Reducer) و فلنج استفاده شده است.

فرکانس شبیه‌سازی با توجه به مشخصه‌های سنسورها و عملگر شیر کنترلی 100 هرتز می‌باشد. همچنین نازل این تونل باد از نوع هندسه ثابت می‌باشد و برای ایجاد جریان با ماخ‌های مختلف نازل تعویض می‌شود و بسته به سرعت مطلوب در محفظه آزمایش، نازل مربوطه و همچنین فشار لازم در محفظه آرامش تعیین می‌گردد.

رابطه بین سطح مقطع گلوگاه نازل با سرعت جریان در محفظه آرامش به صورت رابطه زیر می‌باشد.

$$A_N = \frac{A}{\sqrt{\frac{1}{M^2} \times \left(\frac{5}{6} \times \left(1 + \frac{M^2}{5} \right) \right)^6}} \quad (8)$$

در رابطه (۸)، M سرعت جریان در محفظه آزمایش بر حسب ماخ بوده و همچنین A مساحت مقطع محفظه آزمایش می‌باشد.

از دیگر پارامترهای مورد نیاز به منظور شبیه‌سازی، فشار مطلوب در محفظه آرامش برای اعداد ماخ مختلف می‌باشد. انتخاب فشار مطلوب بعنوان ورودی کنترل‌کننده فشار می‌بایست بصورت هوشمندانه با در نظر گرفتن فرآیند راه‌اندازی سریع تونل باد صورت پذیرد.

لازم به ذکر است که لحظات اولیه کارکرد تونل در جریان فراصوت با وقوع پدیده موج ضربه‌ای یا شاک جریان در محفظه آزمایش همراه می‌باشد. مادامی که این امواج از محفظه آزمایش و در پی آن از گلوگاه دوم تونل باد (یا

دیفیوزر) خارج نگردد، اصطلاحاً تونل باد در شرایط غیر راه‌اندازی قرار دارد. از طرف دیگر بدلیل محدودیت زمانی در عملکرد تونل‌های باد فراصوت دمشی که معمولاً از 3 تا 80 ثانیه می‌باشند [۱]، فرآیند راه‌اندازی سریع و طی کردن حالت گذرا و رسیدن به حالت پایا در کمترین زمان ممکن از اهمیت بالایی برخوردار است.

بدین منظور برای به دست آوردن فشار مطلوب محفظه آرامش در لحظه راه‌اندازی و اجرای تونل باد برای یک عدد ماخ مشخص از نتایج تجربی استفاده شده است. با توجه به مرجع [۱] برای ایجاد جریانی با ماخ مشخص یک نسبت فشار بیشینه در شروع کار تونل باد لازم است. بعد از گذر موج ماخ از محفظه آزمایش و گلوگاه دوم تونل باد، این نسبت فشار می‌تواند کاهش یابد. بعنوان مثال، جریان با ماخ 3 در شرایط راه‌اندازی نیاز به نسبت فشار در حدود $6/91$ می‌باشد و در شرایط پایا این عدد در حدود $2/45$ می‌باشد. با توجه به ارتفاع 1600 متری شهر شاهین شهر اصفهان از سطح دریا، فشار مطلوب برای محفظه آرامش در شرایط شروع 700 کیلو پاسکال و در شرایط پایا برابر 300 کیلو پاسکال در نظر گرفته شده است. در بسیاری از تونل‌های باد در تمام مدت زمان اجرای تونل باد، فشار محفظه آرامش را در فشار بیشینه شروع نگه می‌دارند، اما این امر از طرفی سبب کم شدن مدت زمان اجرای تونل می‌شود. در شبیه‌سازی‌های صورت گرفته فشار در محفظه آرامش به مدت 1 ثانیه در فشار شروع بکار نگه داشته شده است و بلافاصله فشار به فشار حالت پایا تنزل می‌یابد.

از دیگر پارامترهای شبیه‌سازی، ضریب افت مربوط به مخزن و سیستم لوله کشی تا شیر کنترل است که به صورت آزمایشی به دست می‌آید. مقدار این پارامتر در شبیه‌سازی‌ها برابر 30 درصد در نظر گرفته شده است. یکی از فرضیاتی که در شبیه‌سازی در نظر گرفته شده این است که در طول مدت زمان اجرای تونل میزان دمای مخزن ذخیره و محفظه آرامش برابر مقدار ثابت 300 کلوین می‌باشد. فرض دمای ثابت در کنترل سرعت جریان

کمینه کردن میزان حداکثر جهش و زمان نشست پاسخ کنترلی از محدودیت‌ها می‌باشد. در نتیجه تابع هزینه برای مساله بهینه‌سازی به صورت زیر در نظر گرفته شده است.

$$\Psi = W_1 \times MP + W_2 \times TS \quad (9)$$

در رابطه (۹)، MP و TS به ترتیب حداکثر جهش و زمان نشست پاسخ کنترلی می‌باشد، W_1 و W_2 نیز وزن هر کدام می‌باشد. با توجه به این که مقادیر مربوط به MP و TS هر دو در یک محدوده می‌باشند، به همین دلیل وزن این پارامترها برابر با یکدیگر و مساوی یک قرار داده شده است. متغیرهای طراحی بهینه‌سازی عبارتند از بهره‌های تناسبی و انتگرالی کنترل کننده یعنی K_P و K_I ، که از نوع متغیرهای پیوسته می‌باشند. در اینجا قیدی برای مساله وجود ندارد، تنها برای کم شدن زمان بهینه‌سازی، کمینه و بیشینه دامنه تغییرات متغیرها بین صفر و یک در نظر گرفته شده است. فرآیند بهینه‌سازی به این صورت است که در هر بار اجرای الگوریتم پارامترهای حاصل شده به کنترل کننده داده می‌شود. شبیه‌سازی صورت می‌گیرد. حداکثر جهش و زمان نشست به دست می‌آید و تابع هزینه محاسبه می‌شود. در این روند بهترین جواب‌ها در هر تکرار انتخاب می‌شوند تا نسل بعدی را تولید کنند. در الگوریتم بهینه‌سازی تعداد جمعیت کروموزوم‌ها ده برابر تعداد مجهولات، یعنی ۲۰ در نظر گرفته شده است. تنظیمات دیگر مربوط به الگوریتم ژنتیک عبارتند از میزان آمیزش و میزان جهش که به ترتیب برابر 0.7 و 0.2 در نظر گرفته شده است. بدین ترتیب بهینه‌سازی برای به دست آوردن ضرایب بهینه کنترل کننده برای اجرای تونل-باد در عدد ماخ ۳ صورت گرفت. در شکل ۱۰، تغییرات تابع هزینه در فرآیند بهینه‌سازی برای سرعت ۳ ماخ نشان داده شده است.

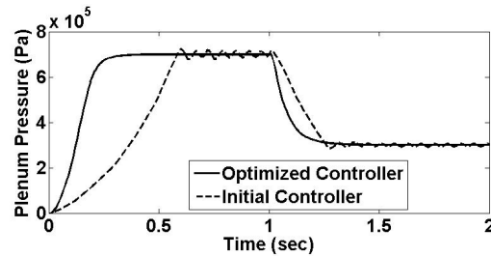
مشکل‌ساز نخواهد بود چرا که قبل از شیر کنترلی گرمکنی قرار می‌گیرد که دمای هوا را به دمای مورد نظر می‌رساند.

اکنون نوبت انتخاب ثوابت کنترل کننده PI به عنوان حساس‌ترین مرحله طراحی سیستم کنترل در تونل‌باد رسیده است. عملکرد نامناسب کنترل کننده فشار منجر به نوسانی شدن پاسخ سیستم کنترلی و فشار در محفظه آرامش می‌گردد. در این راستا، کاهش جهش و زمان نشست پاسخ سیستم کنترلی می‌تواند در روند انتخاب اندازه شیر کنترل جریان و همچنین انتخاب تجهیزات و عملگرهای دیگر تونل باد در فاز طراحی مقدماتی موثر باشد. زیرا کوچکترین جهش و خطا در پاسخ سیستم کنترلی، می‌تواند منجر به ایجاد اغتشاشات، نویز و عملکرد ناصحیح شیر در لحظه جهش گردد. بنابراین در ادامه با در نظر گرفتن الگوریتم ژنتیک به بهینه‌سازی ثابت‌های کنترل کننده دیجیتال مورد نظر در عدد ماخ ۳ پرداخته شده است.

۷- بهینه‌سازی کنترل کننده

الگوریتم ژنتیک یکی از الگوریتم‌های جستجوی تصادفی است که ایده‌ی آن برگرفته از طبیعت می‌باشد. این الگوریتم برای روش‌های کلاسیک بهینه‌سازی در حل مسائل خطی و غیرخطی بسیار موفق بوده است. در اینجا با هدف یافتن مقادیر بهینه ضرایب کنترلی از این روش استفاده شده است. به بطور کلی در انجام یک فرآیند بهینه‌سازی سه بخش اصلی وجود دارد که عبارتند از: تابع هزینه، متغیرهای طراحی و قیود مساله. همانطور که پیش‌تر گفته شد در مساله حاضر کنترل کننده می‌بایست با کنترل بازکردن شیر کنترل، در زمان کمی فشار مطلوب در محفظه آرامش را تأمین نماید. محدودیتی که در مساله کنترلی وجود دارد این است که فشار کل در محفظه آرامش نباید نوسانی شود. لذا در مساله کنترلی حاضر

شکل ۱۱- منحنی تغییرات بازشدگی شیر کنترل در حضور کنترل کننده بهینه و اولیه در طول زمان راهاندازی تونل باد



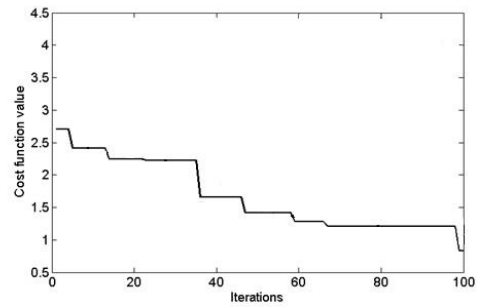
شکل ۱۲- منحنی تغییرات فشار کل محفظه آرامش در حضور کنترل کننده بهینه و اولیه در طول زمان راهاندازی تونل باد

با توجه به منحنی‌های ارائه‌شده در شکل‌های ۱۱ و ۱۲، قابل مشاهده است که زمان نشست و جهش پاسخ کنترلی سیستم کاهش یافته است.

کاهش مدت زمان نشست سیستم منجر به تسریع در فرآیند راهاندازی تونل باد و گذر به مرحله اجرا در مدت زمان کوتاهی شده است. لازم به ذکر است که کاهش زمان نشست پاسخ سیستم منجر به افزایش مدت زمان اجرای تونل باد به مدت حدودی ۴ ثانیه گردیده است.

همچنین نوسانات پاسخ کنترلی در کنترل کننده غیربهینه می‌تواند منجر به وقوع پدیده خطرناک ارگان پایپینگ یا ناپایداری سیستم از نظر فشار گردد. عملکرد کنترل کننده در حالت بهینه و بدون هیچگونه نوسانی می‌تواند عدم رخداد این پدیده را تضمین نماید. کاهش جهش پاسخ سیستم در روند بازشدن شیر کنترل و منحنی تغییرات فشار محفظه آرامش برای عدد ماخ ۳ نشان از عملکرد مناسب و درخور توجه کنترل کننده بهینه می‌باشد.

در جدول ۳، بهترین نتایج بدست آمده برای عدد ماخ ۳ در مقایسه با کنترل کننده اولیه ارائه شده است. با توجه به نتایج به دست آمده از فرآیند بهینه‌سازی کنترل کننده فشار، مشاهده می‌شود که میزان حداکثر جهش پاسخ کنترلی صفر گردیده و همچنین میزان زمان نشست و خطای حالت ماندگار پاسخ نیز نسبت به نتایج کنترل کننده اولیه کاهش قابل ملاحظه‌ای یافته است.

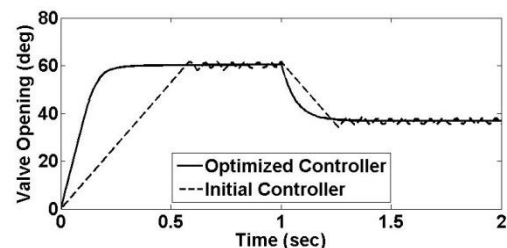


شکل ۱۰- تغییرات تابع هزینه در طول فرآیند بهینه‌سازی

۸- ارائه نتایج

عملکرد کنترل کننده بهینه در مقایسه با کنترل کننده اولیه در شکل ۱۱ و ۱۲ ارائه گردیده است. در این شکل-ها، نحوه تغییرات بازشدگی شیر کنترل جریان و تغییرات فشار محفظه آرامش در لحظات اولیه کارکرد تونل باد مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج شبیه‌سازی برای عدد ماخ ۳، نشان از کاهش زمان نشست، خطای حالت ماندگار و حداکثر جهش پاسخ کنترلی می‌باشند.

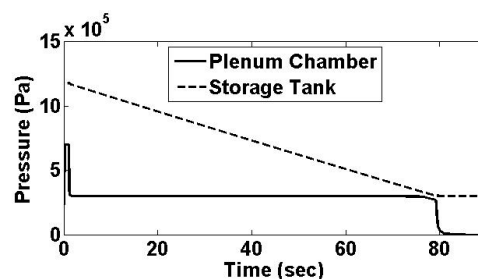
لازم به ذکر است که کاهش زمان نشست پاسخ کنترل کننده منجر به کاهش مدت زمان راهاندازی و گذرای تونل باد و دستیابی سریع به فشار و عدد ماخ مطلوب در محفظه آزمایش تونل باد خواهد شد. همچنین کاهش جهش پاسخ سیستم کنترلی می‌تواند در روند انتخاب نوع و اندازه شیر کنترل و عملگر آن در مرحله طراحی مقدماتی موثر باشد. زیرا کوچکترین جهش و خطا در پاسخ سیستم می‌تواند منجر به ایجاد اغتشاشات و عملکرد ناصحیح شیر در لحظه جهش پاسخ گردد و عملکرد تونل باد را در یک حالت ناپایدار و نوسانی قرار دهد.



تغییرات فشار کل در محفظه آرامش نیز، بصورت جداگانه در شکل ۱۴ ارائه شده است. فشار محفظه آرامش در مدت زمان کوتاهی با کمترین میزان جهش و خطا به نسبت فشار راه اندازی تونل باد دست یافته است. در ادامه، فشار محفظه با کاهش سریع، تونل باد را در شرایط اجرا برای عدد ماخ ۳ قرار می‌دهد. همچنین بهینه‌سازی پارامترهای کنترل کننده PI منجر به افزایش مدت زمان اجرای تونل باد (در حدود ۴ ثانیه) گردیده است. بطوریکه تونل باد قادر است جریان مورد نیاز برای عدد ماخ ۳ را به مدت ۷۸ ثانیه با کیفیت بالا تامین نماید.

نحوه باز شدن شیر کنترل جریان نیز یکی دیگر از پارامترهای مهم در عملکرد گذرای تونل باد می‌باشد که در شکل ۱۵ ارائه شده است. در یک ثانیه اول از عملکرد تونل باد (و در لحظه راه‌اندازی) به منظور خارج راندن موج ضربه‌ای از محفظه آزمایش و گلوگاه دیفیوزر، شیر کنترل به مقدار ۶۰ درجه باز شده و بعد از آن به شدت کاهش می‌یابد. در طول مدت زمان اجرا، شیر کنترل با شیبی ملایم باز شده و در ثانیه ۷۴ به حداکثر باز شدگی خود می‌رسد. همچنین در ثانیه ۷۸ با توجه به نزدیک شدن فشار مخازن به فشار محفظه آرامش و با بسته شدن شیر کنترل، عملکرد تونل خاتمه یافته است.

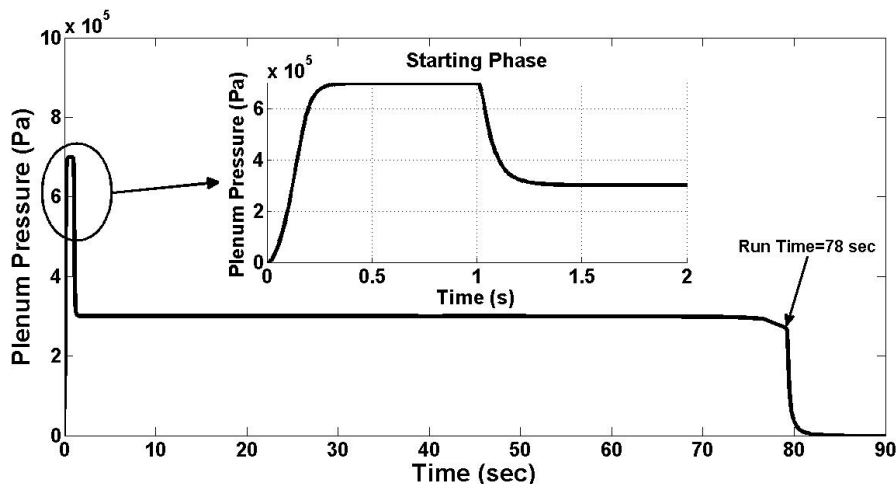
اکنون با توجه به اتمام فرآیند بهینه‌سازی کنترل کننده فشار و دستیابی به مناسب‌ترین پاسخ کنترلی، نوبت به بررسی دیگر پارامترهای عملکردی تونل باد فرا رسیده است. اولین پارامتر، مربوط به بررسی نحوه تغییرات فشار کل در مخازن ذخیره هوا و محفظه آرامش می‌باشد که در شکل ۱۳ نشان داده شده است. نحوه تغییرات فشار کل در مخازن ذخیره و محفظه آرامش نشان از عملکرد صحیح سیستم کنترل کننده ارائه شده می‌باشد. لازم به ذکر است، سیستم کنترلی مورد نظر بنحوی برپا شده است که در لحظه نزدیک شدن فشار مخازن به فشار محفظه آرامش، فرمان بسته شدن شیر کنترل را صادر نماید. این مهم که در حدود ثانیه ۷۸ ام از عملکرد تونل باد رخ داده است، به منظور جلوگیری از ناپایداری سیستم و صرفه جویی در هوای ذخیره شده مخازن صورت گرفته است.



شکل ۱۳- منحنی تغییرات فشار محفظه آرامش و مخازن برای شبیه‌سازی تونل باد در عدد ماخ ۳

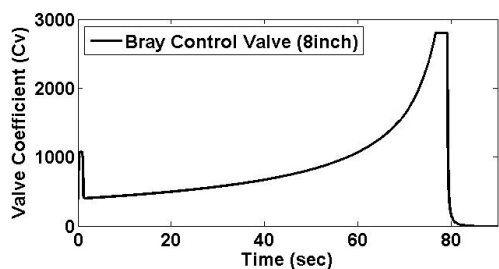
جدول ۳- مشخصه‌های بهترین پاسخ کنترلی در عدد ماخ ۳

پارامترها کنترل کننده	عدد ماخ شبیه- سازی	فشار مطلوب در لحظه راه اندازی (KPa)	ضریب تناسبی کنترل کننده	ضریب انگرالی کنترل کننده	درصد فراجهش	زمان نشست (s)	درصد خطای ماندگار
کنترل کننده اولیه	۳	۷۰۰	۱/۶* ^۴ -۱۰	۱/۱* ^۶ -۱۰	۴/۷۲	۰/۵۷	۳/۵
کنترل کننده بهینه	۳	۷۰۰	۱/۳* ^۵ -۱۰	۱/۰۱* ^۷ -۱۰	۰	۰/۳۱	۰/۰۲۷



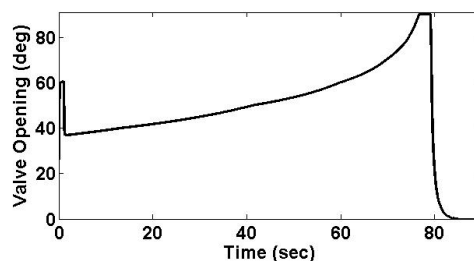
شکل ۱۴- منحنی تغییرات فشار کل محفظه آرامش برای شبیه‌سازی تونل باد در عدد ماخ ۳

شدن حداکثری شیر کنترل، در بالاترین مقدار خود قرار می‌گیرد. این موضوع نشان از عملکرد صحیح شیر کنترل شبیه‌سازی شده می‌باشد.

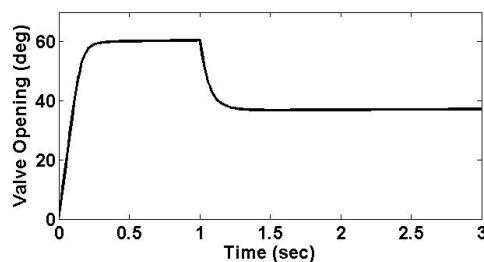


شکل ۱۶- منحنی تغییرات ضریب اندازه شیر کنترل پروانه‌ای بکار رفته در تونل باد مورد نظر

در نهایت نحوه تغییرات ورودی مرجع کنترل‌کننده (فشار مطلوب) و فشار کل محفظه آرامش در شکل ۱۷ ارائه شده است. همچنین فاز راه‌اندازی، فاز انتقال از حالت گذار به اجرا و فاز اجرا نیز در این شکل نشان داده شده است. فشار محفظه آرامش با پیروی دقیق از ورودی‌های مرجع کنترل‌کننده، منجر به کاهش خطای حالت ماندگار، حداکثر جهش و زمان نشست پاسخ کنترلی گردیده است. این موارد باعث افزایش مدت زمان اجرای تونل باد، عملکرد مناسب شیر کنترلی، راه‌اندازی سریع و در نتیجه کاهش هزینه مالی و زمانی برای هر اجرا گردیده است.



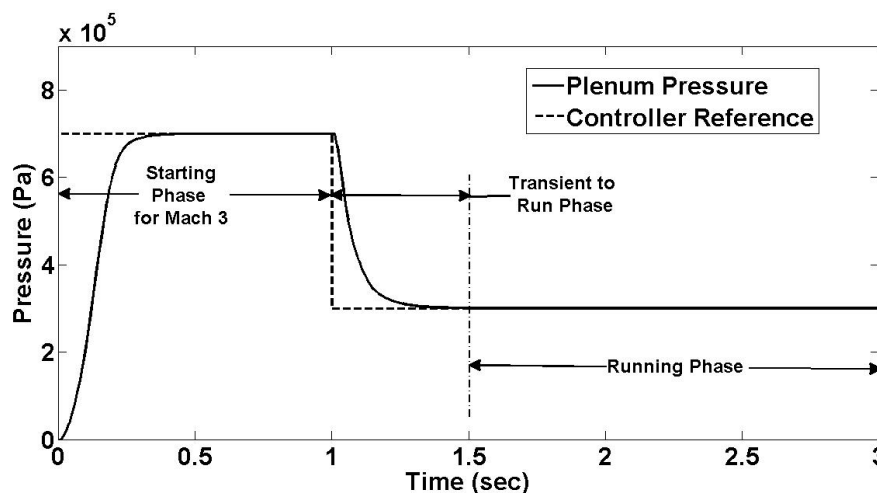
(الف)



(ب)

شکل ۱۵- منحنی تغییرات بازشدگی شیر کنترل، (الف) در عملکرد کامل تونل باد، (ب) در لحظات ابتدایی کارکرد تونل باد

از دیگر پارامترهای مورد بررسی، نحوه تغییرات ضریب اندازه شیر در زوایای بازشدگی مختلف می‌باشد. همانطور که بیان شد، از جداول ارجاع برای الصاق داده‌های سازنده شیر کنترل در مدل شبیه‌ساز تونل باد استفاده شده است. در این راستا، نحوه تغییرات ضریب جریان شیر کنترل در مدت زمان شبیه‌سازی سیستم در شکل ۱۶ ارائه شده است. با مقایسه شکل‌های ۱۵-الف و ۱۶ قابل مشاهده است که ضریب اندازه شیر در ثانیه ۷۴ و در لحظه باز



شکل ۱۷- منحنی تغییرات ورودی مرجع کنترل کننده فشار و تغییرات فشار محفظه آرامش برای عدد ماخ ۳

عملکرد مناسب کنترل کننده بهینه فشار در تونل باد فراصوت دمشی مورد نظر منجر به راه اندازی سریع، کاهش مدت زمان عملکرد گذرای سیستم و افزایش مدت زمان اجرای تونل باد گردیده است. همگی این موارد تضمین کننده عملکرد پایدار سیستم به دور از نوسانات فشاری در محفظه آرامش تونل باد می باشد. لذا اهداف کنترلی مطرح در کنترل سرعت جریان در یک تونل باد فراصوت دمشی، با به کارگیری یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی حاصل شده است.

۹- نتیجه گیری

در پژوهش حاضر برای کنترل عدد ماخ در یک تونل باد فراصوت دمشی از یک کنترل کننده تناسبی-انتگرالی یا کنترل کننده PI استفاده شد. این کنترل کننده با تنظیم میزان بازشدگی شیر اتوماتیک، میزان فشار محفظه آرامش و در نتیجه سرعت جریان در محفظه آزمایش را کنترل می کند. در این راستا بعد از ارائه یک مدل جامع از عملکرد دینامیکی تونل باد مورد نظر و صحنه گذاری آن توسط داده های تجربی یک تونل باد مشابه، شبیه سازی مدل صورت گرفت. نتایج شبیه سازی در پژوهش پیش رو در مقایسه با داده های حاصل از اجرای آزمایشی تونل باد مرجع [۴]، نشان از دقت قابل قبول مدل شبیه ساز و کنترل کننده آن می باشد.

در ادامه با بهره گیری از روش بهینه سازی با الگوریتم ژنتیک و معرفی یک تابع هزینه شامل مقدار زمان نشست و حداکثر جهش پاسخ کنترلی، ضرایب کنترل کننده فشار طراحی شده بهینه سازی شد. نتایج مربوط به عملکرد کنترل کننده با پارامترهای بهینه سازی شده برای سرعت ماخ ۳ بسیار عالی ارزیابی می شود. ملاحظه شد که درصد حداکثر جهش پاسخ، برابر با صفر و زمان نشست نیز بسیار کوتاه است.

۱۰- مراجع

- [1] Pope, A., Goin, K. L. (1965), "High-speed wind tunnel testing". John Wiley & Sons INC.
- [2] Barlow, J. B., Rae, W. H., Pope, A. (1999), "Low-Speed Wind Tunnel Testing". John Wiley and Sons, 3rd Edition.
- [3] Silva, M. G., Gamarra, O. R., Koldaev, V. (2009). "Control of Reynolds Number in High Speed Wind Tunnel". The International Journal of Aerospace of Technology and Management, Vol. 1, pp. 69–77.
- [4] Braun, E. M., Lu, F. K., Panicker, P. K., Mitchell, R. R., Wilson, D. R. (2008). "Supersonic Blowdown Wind Tunnel Control Using LabVIEW". 46th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, USA, January 7–10.
- [5] Cameron, R. N., Ölçmen, S. M., Lewis, D. R., Williams, K. (2008). "Supersonic, variable-throat, blow-down wind tunnel control using genetic algorithms, neural networks, and gain scheduled PID". Springer Science, Vol. 29, pp. 79–89.
- [6] Jacob, V., Binu, L.S. (2009). "Adaptive Fuzzy PI controller for Hypersonic Wind Tunnel Pressure Regulation". 10th National Conference on Technological Trends, Trivandrum, Kerala, India, November 6–7.
- [7] Lu, F.K., Wilson, D.R., Matsumoto, J. (2009). "Rapid valve opening technique for supersonic blow-down tunnel". Experimental Thermal and Fluid Science Journal, Vol. 33, pp. 551–554.
- [8] Zhang, H., Cai, Y., Chen, Y. (2010). "Parameter optimization of PID controllers based on genetic algorithm". 2010 International Conference on E-Health Networking, Digital Ecosystems and Technologies (EDT), Shenzhen, China, April 17–18.
- [9] Jalilvand, A., Kimiyaghalam, A., Ashouri, A., Mahdavi, M. (2008). "Advanced particle swarm optimization-based PID controller parameters tuning". The IEEE International Multitopic Conferenc, Pakistan, December 23–24.
- [10] Zhou, K., Qin, J. (2011). "PID controller parameters tuning of main steam temperature based on chaotic particle swarm optimization". 2011 IEEE International Conference on Computer Science and Automation Engineering (CSAE), Shanghai, China, June 10–12.
- [11] El-Gammal, A. A., El-Samahy, A. (2009). "A modified design of PID controller for DC motor drives using Particle Swarm Optimization PSO". International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Lisbon, Portugal, March 18–20.
- [12] Thomas, Ph. J., (1990), "Simulation of Industrial Process for Control Engineers". Elsevier Science & Technology Book.
- [13] Driskell, L., (1983), "Control-Valve Selection and Sizing". Instrument Society of America, Research Triangle, 1st Edition.
- [14] Bray International, Inc., Document on the www.bray.com.
- [15] Wang, X., Yang, H. (2006). "Hierarchical multiple models adaptive feedforward decoupling controller applied to wind tunnel system". Lecture Notes in Control and Information Sciences, Vol. 344, pp. ۲۸۷–۲۹۸.
- [16] Franklin, G., Powell, J., Workman, M. (1998), "digital control of dynamic systems". Addison Wesley Longman, 3rd Edition.
- [17] Ogata, K. (2010), "Modern Control Engineering". Prentice Hall.