

کنترل هوشمند تهویه مطبوع خودرو و مدل‌سازی حرارتی آن

یداله فرزانه^۱، علیرضا اکبرزاده توتونچی^۲^۱ دانشجوی دکتری، دانشگاه فردوسی، دانشکده مهندسی، ya_farzaneh@yahoo.com^۲ استادیار، دانشگاه فردوسی مشهد؛ ali_akbarzadeh_t@yahoo.com

چکیده

تهویه مطبوع خودرو امری حیاتی در آسایش سرنشینان خودرو می‌باشد. با کنترل مناسب این سیستم علاوه بر برقراری آسایش می‌توان ضریب ایمنی سفر را نیز افزایش داد. برای کنترل سیستم، ابتدا مدل‌سازی حرارتی کابین مورد توجه قرار گرفته‌است و تمامی پارامترهای مهم در کنترل تهویه مطبوع در نظر گرفته شده‌اند. قدرت دمنده و محل قرارگیری دریچه دما به عنوان متغیرهای کنترلی انتخاب شده‌اند. عملکرد کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی به عنوان محبوب‌ترین کنترلر صنعتی روی سیستم بررسی شده است. برای بهبود عملکرد آن کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی ساختار متغیر فازی مورد استفاده قرار گرفته است. در این کنترلر از منطق فازی به عنوان وزن‌دهی بهره‌های فیدبک استفاده می‌شود. از کنترلر فازی سوگینو نیز به عنوان کنترلر هوشمند در کنترل سیستم بهره گرفته شده‌است. نتایج نشان می‌دهد که کنترلر فازی سوگینو در دستیابی به دمای مطلوب در کابین، نسبت به سایر کنترلرها عملکرد بهتری دارد و مصرف انرژی را نیز کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: آسایش سرنشین، تهویه مطبوع خودرو، کنترل هوشمند، کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی، مدل‌سازی حرارتی.

مقدمه

دمای کابین خودرو یکی از فاکتورهای مهم در تصادفات می‌باشد [۱]. با تحقیقی که توسط زلاتوپر^۱ [۲] روی ده فاکتور مؤثر در تصادفات در ایالات متحده انجام شده‌است؛ دما به عنوان سومین عامل مؤثر در تصادفات شناخته شده‌است. علاوه بر این که دمای کابین با تصادفات رابطه مستقیم دارد، توجه به دمای داخل و تهویه مطبوع مناسب در خودرو آسایش حرارتی را افزایش می‌دهد و موجب هوشیاری راننده و افزایش کارایی رانندگی می‌شود. در نتیجه ایمنی سفر در شرایط مختلف آب و هوایی افزایش می‌یابد [۱].

تأمین دمای مناسب در تابستان به عهده کولر و در زمستان به عهده بخاری می‌باشد که در مجموع این دو به عنوان سیستم تهویه مطبوع شناخته شده‌اند. تقریباً تمام خودروهای جدید به صورت استاندارد به این سیستم مجهز می‌باشند. با توجه به فراگیر شدن استفاده از این سیستم، لازم است که اجزاء آن و شرایط کابین با دقت کافی بررسی شود تا از این طریق سیستم تهویه مطبوع به گونه

ای طراحی و کنترل شود که در بدترین شرایط آب و هوایی راحتی سرنشینان را فراهم آورد و در ضمن انرژی کمتری مصرف کند. کنترل سیستم تهویه مطبوع مهمترین عامل تأمین دمای مطلوب در کابین خودرو می‌باشد. این کار اغلب به صورت دستی انجام می‌گیرد. در تحقیقی که دانن^۲ و همکارانش (۲۰۰۳) [۱] روی کارایی رانندگی در شرایط مختلف آب و هوایی انجام دادند، این نتیجه حاصل شد که استفاده از کنترل دستی تهویه مطبوع در شرایط گرم و سرد کابین باعث تداخل در کار رانندگی و در نتیجه کاهش ضریب ایمنی رانندگی می‌شود. بنابراین کنترل اتومات سیستم تهویه مطبوع کاملاً ضروری است و باعث افزایش کارایی و بهینه‌سازی سیستم می‌شود.

در این مقاله در ابتدا مدل‌سازی حرارتی کابین خودرو به شکلی ساده و با در نظر گرفتن فرضیات مناسب، انجام گرفته‌است. سه کنترلر برای کنترل خودکار این سیستم طراحی شده است (کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی^۳، کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی ساختار متغیر فازی^۴ [۳] و کنترلر فازی سوگینو^۵ [۴]). کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی کارایی مناسبی در کنترل سیستم ندارد. به همین دلیل کنترلر دوم طراحی شده است و از منطق فازی به عنوان تعیین کننده بهره‌های کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی استفاده شده است. با شبیه سازی، کارایی بهتر این کنترلر نسبت به کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی نشان داده شده است. کنترلر سوگینو توافق مناسبی با سیستم‌های غیرخطی دارد و در مرحله بعد برای کنترل این سیستم مورد استفاده قرار گرفته است. این کنترلر نسبت به دو کنترلر قبلی دمای مطلوب را سریع‌تر و با مصرف انرژی کمتری ایجاد می‌کند.

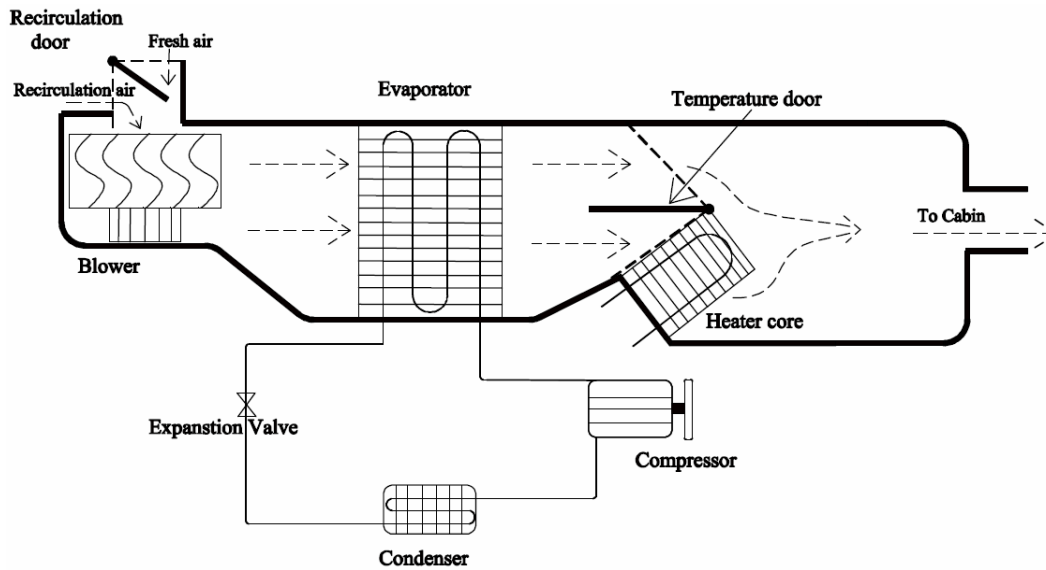
مدلسازی حرارتی کابین

جهت مدل‌سازی از معادله انرژی استفاده شده‌است و فرضیات مناسبی برای ساده‌سازی معادلات؛ در نظر گرفته شده است. مدل سرمایه‌گذاری خودرو به دلیل پیچیده‌گی بیشتر مورد توجه قرار گرفته‌است. شمای کلی این مدل در شکل ۱ آورده شده است.

اصل بقاء انرژی برای چنین سیستمی به صورت معادله ۱ است.

$$\frac{dE_{c.v}}{dt} = \dot{Q}_{c.v} - \dot{W}_{c.v} + \sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} \quad (1)$$

^۲ Danean^۳ PID^۴ Fuzzy Variable Structure PID (FVSPID)^۵ Sugeno Fuzzy controller^۱ Zlatoper



شکل ۱: نمای شماتیک سیستم حرارتی خودرو

تغییرات انرژی تولیدی \dot{E}_{gen}

انرژی تولیدی بارهای سرمایش می‌باشند که سیستم کولر باید بر آن-ها غلبه کند. در این تحقیق مهمترین آن‌ها در نظر گرفته می‌شوند. بار سرنشینان: با استفاده از اطلاعات اشرفی^۶ [۵] برای یک نفر در حالت نشسته و کارکم، این بار حرارتی معادل ۲۲۳,۳ Btu/hr است. فرض می‌شود خودرو دارای ۴ سرنشین است. بار تشعشع: با توجه به شرایط آب و هوایی، زمان، جهت حرکت خودرو، رنگ خودرو،... تغییر می‌کند. اما بنا به توصیه [۶] مقدار آن متناسب با اختلاف دمای محیط و کابین خودرو است. بار جابجایی و هدایت: این بار نیز با توجه به [۶] خطی در نظر گرفته شده است.

تغییرات انرژی ورودی به کابین \dot{E}_{in}

انرژی ورودی، بر بارهای سرمایش غلبه می‌کند. با کنترل مناسب این انرژی می‌توان دمای داخل کابین را در حد مورد نظر نگاه داشت. این انرژی شامل دو بخش است که با توجه به محل قرارگیری در پیچه دما میزان هر بخش معین می‌شود.

- ۱- بخشی از هوا که بعد از اواپراتور مستقیماً وارد کابین می‌شود.
 - ۲- بخشی از هوا که بعد از اواپراتور با هسته حرارتی (بخاری) تبادل انرژی می‌کند و دوباره گرم می‌شود.
- دمای هوا بعد از اواپراتور و بخاری برحسب روابط کارایی مبدل-های حرارتی به دست می‌آیند. این روابط در معادلات ۸ و ۹ نشان داده شده‌اند.

محل در پیچه دما تعیین کننده میزان اختلاط هوای سرد و گرم است. ضریب ptd این میزان را تعیین می‌کند و به عنوان یکی از پارامترهای کنترلی انتخاب شده است. با فرض اختلاط ایده‌آل دمای هوای خروجی از سیستم تهویه مطبوع محاسبه می‌شود. با قراردادن

معادله فوق با توجه به فرضیات زیر ساده می‌شود [۷].

- ۱- رفتار گاز ایده‌آل؛
- ۲- اختلاط ایده‌آل در فرآیندهای مختلف؛
- ۳- صرف نظر از ذخیره سازی انرژی در بدنه؛
- ۴- اتلاف انرژی بین اجزاء قابل صرف نظر؛
- ۵- هوا به صورت خشک در نظر گرفته شده است؛
- ۶- از رفتار گذرا در کانال صرف نظر می‌شود؛
- ۷- هوای خروجی از کابین با شرایط کابین خارج می‌شود؛
- ۸- کار مکانیکی در حجم کنترل تولید نمی‌شود.

فضای داخل کابین به عنوان حجم کنترل در نظر گرفته شده است. معادله کلی انرژی برای این سیستم به صورت معادله ۲ ساده می‌شود.

$$\dot{E}_1 - \dot{E}_2 + \dot{E}_{gen} = \dot{E}_{st} \quad (2)$$

پیدا کردن رابطه تغییرات دمای کابین در طول زمان هدف اصلی از اعمال معادله انرژی به این سیستم می‌باشد. برای این منظور لازم است جملات معادله ۲ با دقت بیشتری بررسی شوند.

تغییرات انرژی داخلی \dot{E}_{gen}

دبی هوای ورودی با دبی هوای خروجی برابر است، بنابراین تغییر حجم در کابین وجود ندارد.

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = 0 \Rightarrow m_{cv} = const \quad (3)$$

$$\dot{E}_{st} = \frac{d}{dt} (m_{cv} h_{st}) = \rho V_{cabin} (c_p \frac{dT_{cabin}}{dt}) \quad (4)$$

تغییرات انرژی خروجی \dot{E}_2

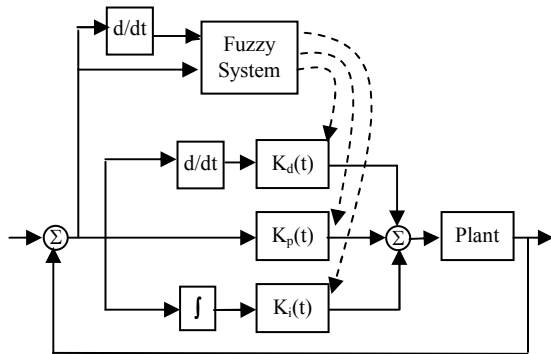
هوای خروجی از کابین با شرایط کابین خارج می‌شود. بنابراین دمای خرجی از کابین مساوی با دمای کابین می‌باشد.

$$\dot{E}_2 = \dot{m} h_2 = (\rho \dot{V})(c_p T_{cabin}) \quad (5)$$

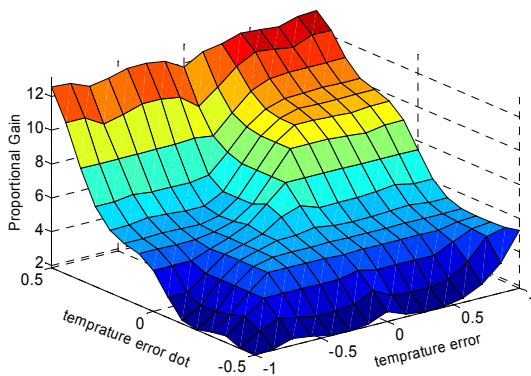
⁶ ASHRAE

کنترلر کلاسیک به کار بست. در این بخش از روش دوم استفاده خواهد شد.

کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی ساختار متغییر فازی، کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی است که ضرائب آن توسط یک کنترلر هوشمند تعیین می‌شود. به این ترتیب حتی در حین اجرای کنترلر نیز امکان تصحیح و تغییر ضرائب وجود دارد. به واسطه این که ضرائب با توجه به ورودی‌ها و خروجی‌ها تغییر می‌کنند؛ این کار نوعی خود ساماندهی است. ساختار کلی این کنترلر در شکل ۲ آمده- است [۳].



شکل ۲: ساختار کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی ساختار متغییر فازی
کنترلر فازی مورد استفاده در این قسمت، از نوع استاندارد مددانی با دو ورودی و شش خروجی ضرائب کنترلرهای تناسبی- مشتقی- انتگرالی می‌باشد. توابع فازی متغییرهای ورودی و خروجی از نوع گوسی انتخاب شده‌اند. به عنوان نمونه‌ای از کارایی کنترلر فازی، سطح کنترل برای تعیین ضریب تناسبی در شکل ۳ آورده شده است.



شکل ۳: سطح کنترل برای ضریب تناسبی

کنترلر فازی سوگینو

کنترلر فازی سوگینو اخیراً به عنوان یک ابزار قوی برای کنترلر و مدل‌سازی سیستم‌های پیچیده مورد توجه قرار گرفته‌است. این روش با توسعه مفهوم جدول بندی بهره‌ها، یک انتقال مناسب بین روش‌های کلاسیک و کنترلر بر مبنای قواعد را فراهم کرده‌است. الگوی جدول بندی بهره‌ها [۴] بر مبنای این فرض استوار است که سیستم غیر-خطی به صورت محلی با مدل‌های خطی تقریب زده می‌شود. کنترلر سوگینو ایده خطی‌سازی را در یک فضای فازی به کار می‌گیرد. با

معادلات استخراج شده در معادله ۲ می‌توان تغییرات دمای داخل کابین را پیشگویی نمود.

$$A.T_{cabin} + B.T_{cabin} = C.T_{amb} + D.T_{eR,i} + E.T_{w,i} + F \quad (6)$$

$$A = \rho_{air} V_{cabin} \dot{m}_{air} C_{p_a}^2$$

$$B = \dot{m}_{air} C_{p_a} \{ \dot{m}_{air} C_{p_a} - (1 - pf)(1 - \epsilon_e) [\dot{m}_{air} C_{p_a} + (1 - ptd)\epsilon_H C_{min,H}] + 0.1202 \}$$

$$C = pf(1 - \epsilon_e) \dot{m}_{air} C_{p_a} [\dot{m}_{air} C_{p_a} + (1 - ptd)\epsilon_H C_{min,H}] + \dot{m}_{air} C_{p_a} 0.1202$$

$$D = \dot{m}_{air} C_{p_a} \epsilon_e [\dot{m}_{air} C_{p_a} ptd + (1 - ptd)(\dot{m}_{air} C_{p_a} + \epsilon_H C_{min,H})]$$

$$E = -\epsilon_e [\dot{m}_{air} C_{p_a} ptd + (1 - ptd)(\dot{m}_{air} C_{p_a} + \epsilon_H C_{min,H})] (1 - ptd) \epsilon_H C_{min,H}$$

$$F = \dot{m}_{air} C_{p_a} 0.2618$$

دبی هوا یکی از مهمترین پارامترها در دسترسی به دمای مطلوب در کابین است. دبی هوا با توجه به قدرت دمنده (p) تغییر می‌کند و میزان آن از منحنی عملکرد دمنده قابل محاسبه است. تعیین قدرت دمنده دومین پارامتر کنترلی سیستم است.

کنترلر سیستم

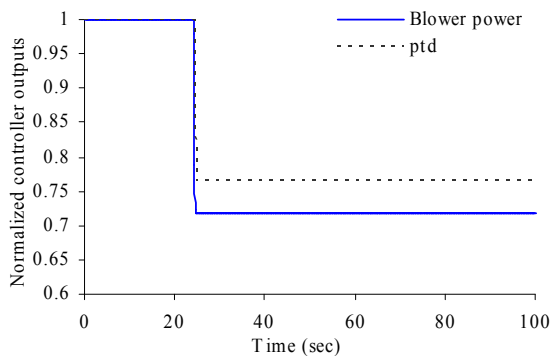
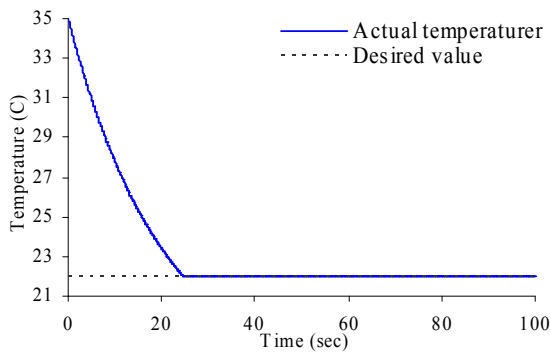
در این مقاله، ورودی‌های کنترلرها خطای ردیابی دما، مشتق خطا و انتگرال خطا در نظر گرفته شده و خروجی‌ها؛ محل دریچه دما و قدرت دمنده می‌باشند.

کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی

کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی محبوب‌ترین کنترلر صنعتی می‌باشد. این کنترلر در محدوده وسیعی از شرایط رفتار مناسبی دارد و ساختار آن بسیار ساده است. بنابراین مهندسی می‌توانند به راحتی از آن جهت کنترل سیستم‌های صنعتی استفاده کنند. برای پیاده‌سازی چنین کنترلی باید سه پارامتر معین شود. بهره تناسبی، بهره انتگرالی و بهره مشتقی. مشکل‌ترین کار در طراحی کنترلر تناسبی-مشتقی-انتگرالی تعیین مناسب این سه بهره است. این کار معمولاً با سعی و خطا انجام می‌شود. برای کنترل همزمان محل دریچه دما و قدرت دمنده از دو کنترلر تناسبی-مشتقی-انتگرالی استفاده شده- است.

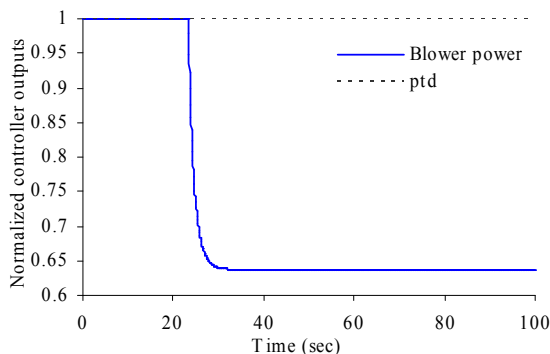
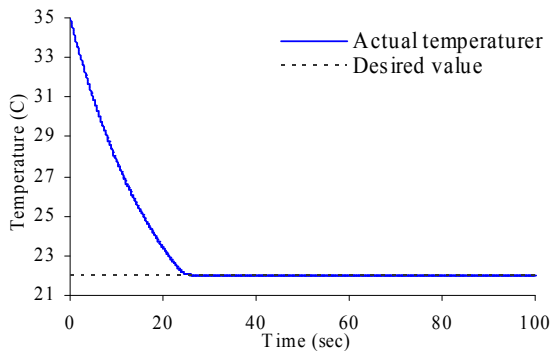
کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی ساختار متغییر فازی

به طور کلی برای طراحی کنترلر هوشمند دو رویکرد وجود دارد. می‌توان یک کنترلر هوشمند را از ابتدای امر با روش‌های هوشمند طراحی کرد؛ و یا کنترلر هوشمند را برای برطرف کردن ضعف‌های



شکل ۵: کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی ساختار متغییر فازی

دمای مطلوب به سرعت در کابین به دست آمده است. خروجی های کنترل نیز نسبت به کنترلر قبلی رفتار بهتری دارند و دمنده در حالت پایدار با قدرت کمتری کار می کند. کنترلر فازی سوگینو کنترل غیرخطی را در یک فضای فازی به صورت مدل چند ساختاری خطی انجام می دهد. پاسخ این کنترلر در شکل ۶ نمایش داده شده است.

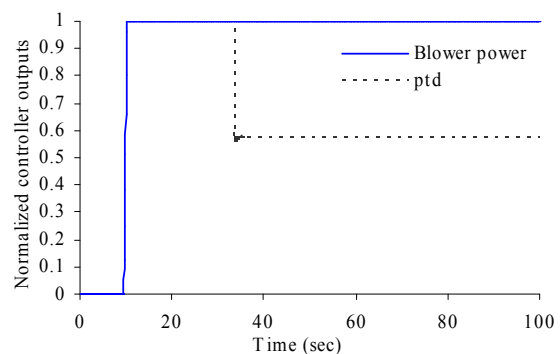
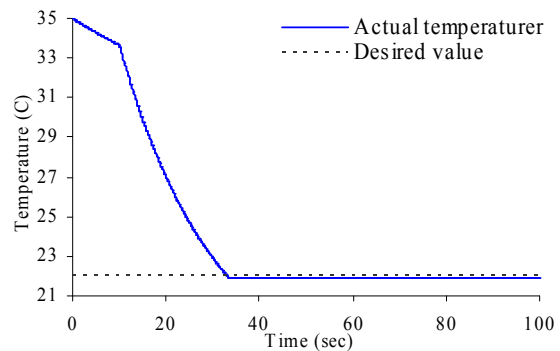


شکل ۶: کنترلر فازی سوگینو

توجه به فضای فازی، سیستم غیرخطی به مدل چند ساختاری خطی تجزیه می شود. در حقیقت کنترل به صورت محلی خطی است. ورودی های این کنترلر خطا، تغییرات خطا و انتگرال خطای دما با پنج تابع فازی گوسی برای هر ورودی می باشد. خروجی های کنترلر قدرت دمنده و محل قرارگیری دریچه دما با پنج تابع خطی برای هر خروجی می باشد.

شبیه سازی و بررسی پاسخ ها

در طول زمان شبیه سازی، دمای محیط 35°C فرض شده است. دمای اولیه کابین مساوی با دمای محیط در نظر گرفته شده است. سیستم تهویه مطبوع از هوای برگشتی از کابین استفاده می کند و هوای تازه به سیستم وارد نمی شود. درجه حرارت مطلوب توسط راننده معین می شود. این دما در فصول گرم در حدود 22°C است. همین دما به عنوان مرجع در نظر گرفته شده است. کنترلر تلاش می کند با تنظیم قدرت دمنده و محل قرارگیری دریچه دما، هر چه سریع تر به دمای مطلوب برسد. پاسخ کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی در شکل ۴ آورده شده است.



شکل ۴: کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی

دمای مطلوب در کابین برقرار شده است. قدرت دمنده برای مدت کوتاهی صفر است و بعد از آن به حداکثر مقدار خود می رسد. این تغییر مطلوب نمی باشد. دمنده در حالت پایدار با حداکثر قدرت کار می کند که باعث افزایش مصرف انرژی در سیستم می شود. علاوه بر آن سر و صدای زیاد دمنده باعث ناراحتی سرنشینان می شود. انتظار می رود کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی ساختار متغییر فازی پاسخ بهتری داشته باشد (شکل ۵).

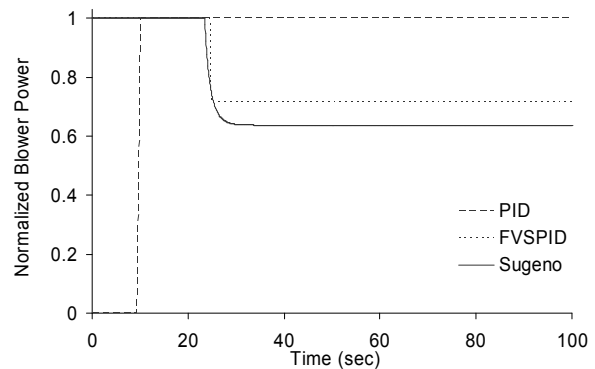
فهرست علائم

C_p	گرمای ویژه در فشار ثابت، $J/kg^{\circ}C$
pf	درصد هوای تازه
ptd	محل قرارگیری دریچه دما
علائم یونانی	
ε	ضریب عملکرد مبدل حرارتی
زیرنویس	
amb	فضای خارج
e	اواپراتور
eR	مبرد اواپراتور
gen	تولیدی
H	هسته حرارتی
in	ورودی
out	خروجی
in	ورودی
w	آب

مراجع

- [1]- Daanen, H. A. M., Vliert, E., and Huang, X., "Driving performance in cold, warm, and thermoneutral environments," *Applied Ergonomics*, Vol. 34, pp. 597-602, 2003.
- [2]- Zlatoper, T., "Determinants of motor vehicle deaths in the United States: a cross-sectional analysis. special issue: theoretical models for traffic safety," *Accid. Anal. Prev.*, Vol. 23, pp. 431-436, 1991.
- [3]- Farrokhi, M., and Taghavi M.R., "Designing Fuzzy VSPID controller for vehicle speed control," 12th Annual mechanical engineering conference, 2004.
- [4]- Du, H., and Zhang, N., "Application of evolving Takagi-Sugeno fuzzy model to nonlinear system identification," *Applied Soft Computing*, Vol. 8, pp. 676-686, 2008.
- [5]- *ASHRAE handbook—fundamentals*, Chap. 8, Thermal comfort, 2001.
- [6]- Kalteh, A. M., Kakai, A.H., and Farhani, B., "Investigate the performance of Peugeot 206 cooler in different climate condition," 8th International and 12th Annual mechanical engineering conference, Tehran, 2004 (in Persian).
- [7]- یداله فرزانه، کنترل آسایش حرارتی در خودرو با استفاده از کنترلر فازی بهینه شده، پایان نامه کارشناسی ارشد، دانشگاه فردوسی مشهد، ۱۳۸۶.

دمای کابین به سرعت به درجه حرارت مطلوب می‌رسد. قدرت دمنده در حالت پایدار نسبت به دو کنترلر قبلی به مقدار کمتری می‌رسد. جهت مقایسه بهتر تغییرات قدرت دمنده در سه کنترلر، به شکل ۷ توجه شود.



شکل ۷: تغییرات قدرت دمنده

کاهش قدرت دمنده باعث کاهش مصرف انرژی، کاهش سر و صدا و کاهش سرعت هوا در کابین می‌شود که نهایتاً افزایش راحتی سرنشینان را به همراه دارد. بنابراین این کنترلر علاوه بر این که دمای مطلوب را به سرعت ایجاد می‌کند؛ نسبت به دو کنترلر قبلی انرژی کمتری مصرف می‌کند. عملکرد بهتری دارد و برای کنترل سیستم تهویه مطبوع خودرو پیشنهاد می‌شود.

نتایج

هدف اصلی این تحقیق، کنترل تهویه مطبوع خودرو برای دستیابی به دمای مطلوب در کابین می‌باشد. برای این منظور مدل‌سازی حرارتی کابین با استفاده از معادلات انرژی انجام گرفته‌است. این مدل به شکلی استخراج شده‌است که با داشتن قدرت دمنده، محل قرارگیری دریچه دما و نسبت هوای تازه به هوای برگشتی؛ می‌توان دمای کابین در هر لحظه را محاسبه کرد.

قدرت دمنده و محل دریچه دما به عنوان متغیرهای کنترلی انتخاب شده‌اند. از سه کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی، کنترلر تناسبی- مشتقی- انتگرالی ساختار متغییر فازی و کنترلر فازی سوگینو برای تنظیم این متغیرها و دستیابی به دمای مطلوب استفاده شده‌است.

با شبیه‌سازی این نتیجه به دست آمد که کنترلر فازی سوگینو دمای مطلوب را در کابین سریع‌تر و با مصرف کمتر انرژی ایجاد می‌کند. بنابراین نسبت به دو کنترلر دیگر کارایی بهتری دارد.

نتیجه‌گیری و جمع‌بندی

در این مقاله عملکرد سه کنترلر مختلف که به نوعی خطی هستند برای دستیابی به دمای مناسب، بررسی شده است. با شبیه‌سازی مشخص شد که کنترلر فازی سوگینو دمای مطلوب را در کابین سریع‌تر و با مصرف کمتر انرژی ایجاد می‌کند. بنابراین این کنترلر برای کنترل سیستم تهویه مطبوع خودرو پیشنهاد می‌شود.