پنجمین کنفرانس سیستمهای فازی ایران
هفدهم الی نوزدهم شهریورماه ۱۳۸۳

کاربرد منطق فازی در مهندسی خودرو

رضا بنی رضی مطلق[۱]
گروه کنترل, مرکز تحقیقات مهندسی جهاد
banirazi@karun3.com

چکیده

مهندسی خودرو یکی از زمینه‌های جذاب کاربرد منطق فازی محسوب می شود و این مقاله قصد دارد آخرین دستاوردهای موجود در این زمینه را شناسایی و معرفی نماید. تأکید مقاله بر روشن سازی قابلیت های منطق فازی در مواجهه با سیستم های متنوع مطرح در مهندسی خودرو و نقش آن در ارتقاء و توسعه این سیستم ها می باشد. خواهیم دید که در سایه استفاده از منطق فازی می توان, ضمن برخوردار نمودن این سیستم ها از قابلیت های هوشمند, سبب کاهش حجم برنامه های کنترل نهایی شده و در نتیجه سرعت اجرای حلقه های کنترلی را افزایش داد. توجه این مقاله معطوف به کاربرد منطق فازی در سیستم های ترمز ضد قفل, کنترل موتور, تعویض دنده اتوماتیک, و فرمان ضد لغزش است. در این بین, فرمان ضد لغزش به عنوان یکی از حساسترین و پیچیده ترین مسائل کنترل مطرح در مهندسی خودرو, با ژرفای بیشتری بررسی خواهد شد.

واژه های کلیدی: "منطق فازی"- "ترمز ضد قفل"- "کنترل موتور" - "گیربکس اتوماتیک"- "فرمان ضد لغزش".

مقدمه

منطق فازی ابزاری توانا برای انتقال سریع تجربیات بشری به محصولات صنعتی نهایی محسوب می شود. این موضوع می تواند در مهندسی خودرو بسیار حائز اهمیت باشد, عرصه ای که در آن طراحی بسیاری از سیستم ها رابطه ای تنگاتنگ با تجربیات فردی مهندسین طراح و نتایج حاصل از آزمایش های تجربی دارد.

در طول سال های اخیر, منطق فازی به یک روش طراحی عمومی برای مهندسان خودرو در کشورهایی همچون ژاپن, کره جنوبی, آلمان, سوئد, و فرانسه تبدیل شده است. مهمترین عوامل مؤثر در این امر را می توان اینگونه برشمرد: اولاً سیستم های کنترل بکار رفته در خودروهای امروزی کاملاً پیچیده بوده و پارامترهای بسیار متنوعی را شامل می شوند که نوعاً با زمان و شرایط محیطی تغییر می کنند. ثانیاً روند بهینه سازی در بسیاری از این سیستم ها بیش از آنکه مبتنی بر مدلها و روابط ریاضی باشد, از تجربیات فردی مهندسین طراح نشأت می گیرد. به عنوان مثال, معیارهایی همچون "فرمان پذیری مناسب", "قدرت قابل قبول", و "آسایش سرنشین", از جمله مواردی هستند که بیشتر جنبه حسی داشته و عملاً تعریف و بهینه سازی آنها در قالب توابع خشک ریاضی امکانپذیر نمی باشد. ثالثاً مهندسی خودرو عرصه ای است با رقابتی شدید در صحنه جهانی. از اینرو هر روشی که قادر باشد به نحوی قدرت رقابت در این صحنه را ارتقاء بخشد, سریعاً مورد توجه طراحان و سازندگان قرار می گیرد.

۱- تهران، صندوق پستی ۷۵۴-۱۳۴۴۵

در این مقاله نقش منطق فازی در طراحی و پیاده سازی سیستم های ترمز ضد قفل (Antilock Braking System), کنترل موتور, تعویض دنده اتوماتیک, و فرمان ضد لغزش (Antiskid Steering System) را مورد بررسی قرار داده و در مورد روش ها, ابزار, و مکانیزم توسعه در این زمینه ها بحث خواهیم کرد. نشان خواهیم داد که چگونه می توان در سایه استفاده از روشهای نوین طراحی مبتنی بر منطق فازی, کارآیی این سیستم ها را تا سطح قابل توجهی ارتقاء داده و به قابلیت های جدیدی دست یافت که با تکیه بر روش های سنتی, حتی انجام مطالعات فنی اولیه پیرامون آنها ممکن نمی شد.

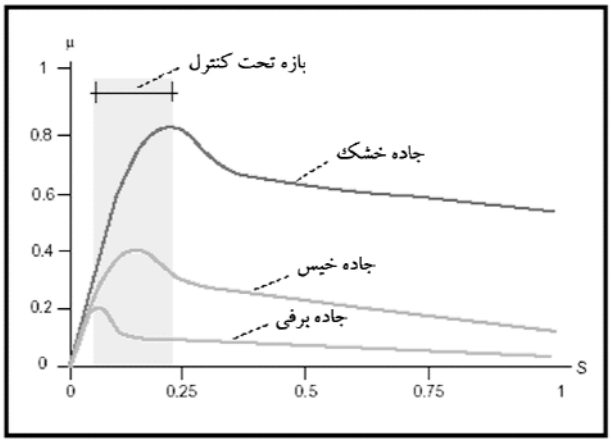
ترمز ضد قفل

در سال ۱۹۷۴ میلادی, کمپانی بوئینگ اولین ترمز ضد قفل را برای استفاده در هواپیماهای خود و با ساختاری کاملاً مکانیکی طراحی و تولید نمود. اما امروزه ترمز ضد قفل, تجهیزی متداول در اکثر خودروها محسوب می شود. در این سیستم ها یک میکروکنترلر, همراه با مجموعه ای از حسگرهای الکترونیکی یا مکانیکی, سرعت هر چرخ را اندازه گیری کرده و با توجه به آنها, فشار روغن در سیلندرهای ترمز را کنترل می کند. علیرغم آنکه برای سیستم ترمز خودرو مدلهای ریاضی مختلفی قابل ارائه است, اما تأثیر شرایط جاده بر کیفیت ترمزگیری دارای پروسه پیچیده ای است که عملاً ارائه یک مدل ریاضی مناسب برای آن را غیرممکن می سازد. از این رو, فناوری ترمزهای ضد قفل امروزی, غالباً متکی بر نتایج حاصل از سالها تجربه و آزمایش در شرایط مختلف جاده ای و اقلیمی می باشند.

اصول ترمز ضد قفل ـ قبل از بررسی نقش منطق فازی در طراحی ترمزهای ضد قفل مدرن, ابتدا نگاهی اجمالی خواهیم داشت به اصول حاکم بر سیستم ترمز خودرو. اگر سرعت دوران چرخ دقیقاً برابر سرعت خودرو باشد, اثر ترمزی چرخ برابر صفر است. بر عکس اگر سرعت دوران چرخ برابر صفر باشد, چرخ در وضعیت قفل کامل خواهد بود. وضعیت قفل, دارای دو نقص اساسی است: اولاً هدایت خودرو با چرخهای قفل شده بسیار مشکل است؛ ثانیاً در چنین حالتی, چرخ دارای اثر ترمزی بهینه نمی باشد. اختلاف بین سرعت های خودرو و چرخ در حین ترمزگیری را شلیدگی (slack) می نامند که به صورت زیر تعریف می شود:

$$s = \frac{Vcar - Vwheel}{Vcar} \qquad (۱)$$

در رابطه فوق, s عددی بین صفر (وضعیت بدون ترمز) و یک (وضعیت قفل کامل), $Vcar$ سرعت خودرو, و $Vwheel$ سرعت چرخ می باشد. شکل۱ رابطه بین اثر ترمزی و میزان شلیدگی را برای سطوح مختلف جاده نشان می دهد. به ازای $s = 0$, سرعت چرخ برابر سرعت خودرو بوده و به ازای $s = 1$, چرخ در وضعیت قفل کامل خواهد بود. منحنی ها نشان می دهند که اثر ترمزی بهینه, بین این دو حد مرزی قرار می گیرد. از طرف دیگر, محل نقطه متناظر با بیشترین اثر ترمزی ثابت نبوده و تابعی از شرایط جاده می باشد.



شکل۱ـ رابطهٔ بین اثر ترمزی و مقدار شلیدگی در شرایط مختلف جاده

ترمزهای ضد قفل سنتی, شیرهای تعبیه شده در مسیر روغن ترمز را به نحوی کنترل می کنند که مقدار شلیدگی با یک مقدار مرجع برابر گردد. اکثر سازندگان, مقدار مرجع شلیدگی را برابر ۰/۱ فرض می کنند که در واقع مصالحه ای است بین شرایط مختلف جاده, اما لزوماً متناظر با مقدار بهینه نخواهد بود. روشن است که با تشخیص نوع جاده می توان اثر ترمزی را به مقادیر بالاتری ارتقاء داد. اما سئوال این است که چگونه می توان نوع جاده را تعیین کرد؟ شکی نیست که درخواست از راننده برای فشردن دگمه ای بر روی داشبورت جهت انتخاب نوع جاده, قبل از اقدام به یک ترمز گیری اضطراری, یک راه حل عملی محسوب نمی شود. سازندگان مختلف, تا کنون حسگرهای متنوعی را به عنوان یک جایگزین منطقی برای این امر مورد بررسی و آزمایش قرار داده اند. نتایج حاصل از این آزمایش ها نشان می دهد که حسگرهایی با قابلیت تشخیص مناسب سطح جاده, با وجود قیمت بالا از پایداری قابل قبولی نیز برخوردار نخواهند بود.

ترمز ضد قفل فازی ـ با توجه به قابلیت فوق العاده منطق فازی برای استفاده از دانش و تجربه فردی در یک قالب فنی, جای تعجب نیست که بدانیم بسیاری از ترمزهای ضد قفل موجود در بازار, قبلاً از این فناوری بهره برده اند. در حال حاضر کمپانی های ژاپنی نیسان و میتسوبیشی, خودروهای خود را با ترمزهای ضد قفل فازی به بازار عرضه می کنند. کمپانی های هندا, مزدا, هیوندا, بی ام و, بوش, مرسدس بنز, و پژو نیز در حال تکمیل مطالعات خود برای ارائه محصولاتی مجهز به این فناوری می باشند.

اکثر ترمزهای ضد قفل, مجهز به میکروکنترلرهای ۱۶ بیتی می باشند که به وسیله آنها می توان محاسبات مربوط به یک سیستم متوسط (نه کاملاً پیشرفته) فازی را در زمانی حدود ۰/۵ میلی ثانیه و با استفاده از تنها حدود ۲ کیلو بایت حافظه جانبی به اجرا درآورد [1]. به منظور داشتن یک مقایسه کمی از زمان لازم برای اجرای محاسبات فازی به وسیله میکروکنترلرهای مختلف, به [2] مراجعه نمایید.

با روش های مختلفی می توان از منطق فازی, در طراحی کنترل کننده یک ترمز ضد قفل بهره جَست. روش ارائه شده در [3] که به معرفی آن خواهیم پرداخت, ترکیب هوشمندانه ای است از روش های سنتی با منطق فازی. فرض کنید رانندهٔ خودرویی باشید که مجهز به یک ترمز ضد قفل معمولی است. پس از فشردن پدال ترمز در یک سرعت مشخص, ترمز ضد قفل شروع به کار می کند. حتی اگر شما هیچ اطلاعی از شرایط جاده نداشته باشید باز هم می توانید با توجه به نوع واکنش خودرو, شرایط جاده را حدس بزنید. اگر راننده بتواند نوع سطح جاده را با توجه به واکنش خودرو حدس بزند, منطق فازی نیز می تواند ایده مشابهی را به اجرا درآورد.

پس از آنکه سیستم برای اولین بار وضعیت قفل شدگی در چرخها را تشخیص داد, شروع به کنترل شیرهای روغن می کند, به نحوی که هر چرخ با شلیدگی برابر ۰/۱ دوران کند. سپس منطق فازی واکنش خودرو به عمل ترمزگیری را ارزیابی کرده و بر اساس آن سطح فعلی جاده را تخمین می زند. با توجه به این تخمین, سیستم ترمز ضد قفل برای دستیابی به بهترین اثر ترمزی, به تصحیح مقدار مرجع شلیدگی دربازه $s = 0.05$ تا $s = 0.2$ می پردازد. سیستم فازی, تنها از اطلاعات وارده به وسیله حسگرهای موجود در ترمز ضد قفل استفاده می کند. اطلاعات مذکور عبارتند از شتاب کاهشی و سرعت خودرو, شتاب کاهشی و سرعت چرخها, و فشار هیدرولیک روغن. این متغیرها بطور غیر مستقیم, نقطه کار فعلی ترمز و رفتار آن در یک بازهٔ زمانی مشخص را تعیین می کنند. آزمایش ها نشان می دهند که یک نمونه اولیه, با استفاده از تنها شش قانون فازی, قادر است عملکرد ترمز را به نحو قابل توجهی ارتقاء بخشد. در طول مسیر آزمایش از یک جاده برفی تا یک جاده خیس, ترمز ضد قفل فازی توانسته است تغییرات سطح جاده را حتی در حین ترمزگیری تشخیص دهد [3].

حساسیت ها نسبت به یک ترمز فازی ـ بدلیل رقابت شدید در این عرصه, اکثر تولیدکنندگان نسبت به فاش نمودن جزئیات روش مورد استفاده خود مقاومت می کنند. از اینرو, نتایج منتشر شده به وسیله آنها تنها محدود به سیستم های آزمایشی مبتنی بر منطق فازی بوده و به هیچ وجه جزئیات مربوط به محصولات نهایی را شامل نمی گردد. همچنین برخی تولیدکنندگان (مخصوصاً در آمریکا) در مورد معنی کلمه "فازی" نگرانند. از آنجا که در فرهنگ لاتین, کلمه فازی به "بی دقتی" و "نا معلومی" اشاره دارد, تولیدکنندگان نگران نوع تلقی رانندگان نسبت به مرغوبیت یک ترمز ضد قفل فازی

می باشند. اما در فرهنگ ژاپن, لفظ "فازی" دارای بار معنوی منفی نیست. بر عکس, برخورداری از سیستم فازی یک مزیت محسوب می شود که به هوشمندی سیستم منجر خواهد شد. از اینرو, سازندگان ژاپنی از بکارگیری آن احساس غرور کرده و آن را در تبلیغات خود ترویج می دهند. از طرف دیگر در کشوری همچون آلمان که تولیدکنندگان بیشتر بدنبال ارائه شاهکارهای مهندسی می باشند, مفهوم فازی می تواند به نوعی ضعف توان مهندسی تعبیر گردد. از اینرو اکثر سازندگان سعی در مخفی سازی استفاده از منطق فازی در تولیدات خود دارند. از طرفی یک سیستم مبتنی بر منطق فازی, نهایتاً یک قطعه نرم افزاری است که بصورت کدهای عددی, در حافظه یک میکروکنترلر پیاده سازی می شود. پس از یکبار پیاده سازی چنین سیستمی, هرگز نمی توان ثابت کرد که این کدها چگونه تولید شده است.

هنگامیکه ۱۰ سال پیش برای اولین بار, بسیاری از نوشتجات در مورد منطق فازی منتشر گردید, حتی دانشمندان و اساتید معروف آمریکایی اظهار داشتند که نمی توان منطق فازی را در کاربردهایی با حساسیت بالا مورد استفاده قرار داد. دلیل آنها این بود که منطق فازی ماهیتاً می تواند به بروز سیستم هایی ناپدار منجر گردد. اما یک سیستم فازی در واقع یک سیستم نامتغیر با زمان, معین, و غیرخطی است, و برخلاف آنچه از لفظ کلمه "فازی" برداشت می شود, دارای هیچگونه نا معلومی و بی دقتی نمی باشد. چنین سیستم هایی, از مدتها پیش شناخته و در مهندسی کنترل بکار گرفته شده اند و تئوریهای پایداری محکمی آنها را تحت پوشش قرار می دهند [4]. در مورد یک ترمز ضد قفل فازی, حتی مسئله پایداری نیز مطرح نخواهد بود. پایداری ترمزهای ضد قفل معمولی, برای مقادیر شلیدگی بین ۰/۰۵ تا ۰/۲ قبلاً به اثبات رسیده است. از اینرو یک سیستم تخمین سطح جاده که براساس منطق فازی طراحی گردیده و وظیفه آن تنظیم شلیدگی در این محدوده و در نقطه بهینه آن است, به هیچ وجه منجر به ناپایداری یک ترمز ضد قفل نخواهد شد.

کنترل موتور

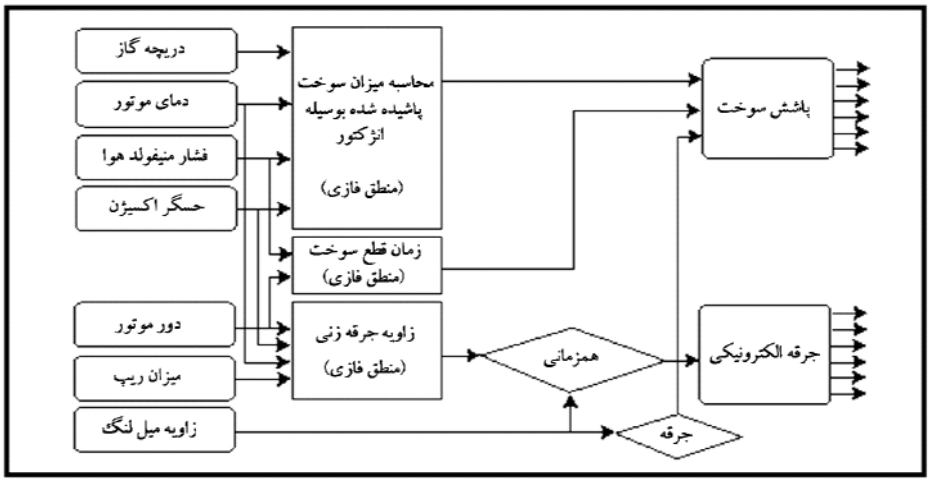
بدلیل سخت تر شدن استانداردهای زیست محیطی و تلاش دائم برای افزایش راندمان و کاهش مصرف سوخت موتورها, سیستم های کنترل موتور خودرو, هر روز پیچیده تر و کاملتر می شود. تا بیست سال پیش, سیستمهای کنترل موتور دارای اصولی تماماً مکانیکی بودند (مبتنی بر کاربراتور, دلکو, و پلاتین). اما امروزه سیستمهای کنترل سوخت و جرقه کاملاً الکترونیکی بوده و براساس فناوری پیشرفته دیجیتال طراحی می شوند.

از آنجا که در یک موتور درونسوز, انتخاب راهبرد کنترل بستگی کامل به نقطه کار جاری موتور دارد (شامل دور, گشتاور, دما, ...), تکیه بر روشهای کنترل خطی پاسخگو نخواهد بود. به علاوه, دستیابی به یک مدل مناسب برای توصیف کامل رفتار موتور, عملاً امکانپذیر نمی باشد. از اینرو اکثر کنترل کننده های موتور, از جداول داده ها برای تعیین راهبرد کنترل استفاده می کنند. تفسیر این جداول که با تکیه بر نتایج آزمایشهای متعدد و تجارب مهندسان طراح تولید می شوند, بسیار مشکل و پیچیده بوده و بهینه سازی آنها بسیار زمانبر می باشد.

کنترل موتور فازی ـ همگان معتقدند که منطق فازی جایگزینی قابل قبول برای جداول داده ها محسوب می شود. با اینحال, اکثر سازندگان خودرو به شدت از انتشار هر گونه اطلاعاتی در مورد نتایج حاصل از کنترل موتور بر اساس منطق فازی اجتناب می کنند. این پنهانکاری, ناشی از این واقعیت است که قوانین منطق فازی می تواند دانش فنی سازنده در مورد کنترل موتور را بطور کامل آشکار نماید. بنابراین طبیعی است که تولید کنندگان خودرو, از آگاهی رقبا نسبت به دانش فنی خود, که با رمز گشایی از قوانین فازی به سهولت امکانپذیر است, بیمناک باشند.

تحقیقات کمپانی نیسان, مزایای منطق فازی در زمینه کنترل موتور را اثبات می کند [5]. شکل۲ عناصر کنترل کننده پیشنهادی به وسیله ایشان را نشان می دهد که شامل سه مدول منطق فازی است. در ابتدا سیستم فازی با توجه به متغیر زبانی "وضعیت", شرایط کارکرد موتور را تعیین می کند. متغیر مذکور دارای ترمهای زبانی مطابق جدول۱ است. هر ترم زبانی نشان دهنده یک نقطه کار احتمالی است و از آنجا که هر ترم زبانی با یک تابع عضویت فازی متناظر است، این متغیر زبانی می تواند کلیه نقاط کار موتور را پوشش دهد. به عنوان مثال, یک مقدار ممکن برای متغیر زبانی "وضعیت" می تواند با

مجموعه ای از توابع عضویت همچون {0.8,0, 1, 0, 0, 0.3} مشخص شود. این مجموعه عددی, در شکل زبانی خود به این صورت قابل تعبیر است که "موتور در زمان کوتاهی قبل استارت شده است, شرایط کارکرد موتور عادی و با بار پائین یا متوسط است, و موتور به آرامی در حال شتابگیری است". با توجه به شناسایی این نقطه کاری, مدول های سه گانه منطق فازی به کنترل میزان سوخت, زمان قطع سوخت, و تنظیم زاویه جرقه می پردازند.



شکل۲ـ کنترل کننده موتور پیشنهادی به وسیله کمپانی نیسان با سه مدول منطق فازی.

مشابه با ترمز ضد قفل, اجرای حلقه کنترل موتور نیز محدود به یک زمان معین و نسبتاً کوتاه است. در سیستم های بسیار سریع, زمان اجرای کامل یک حلقه کنترل تا یک میلی ثانیه کاهش می یابد. برخی طراحان, ابتدا سیستم کنترل موتور را با استفاده از مبانی منطق فازی طراحی کرده و سپس برای پردازش سریعتر, آن را به جداول داده ها تبدیل می کنند. اگر چه پردازش جداول داده ها می تواند سریعتر از انجام محاسبات ریاضی باشد, اما حافظه جانبی مورد نیاز آنها بیشتر است که می تواند به نوبه خود کارآیی آنها را محدود نماید. یک جدول داده ها با دو ورودی و یک خروجی ۸ بیتی, به حدود ۶۴ کیلوبایت حافظه جانبی نیاز دارد. با محدود کردن دقت متغیرهای ورودی به ۶ بیت, باز هم جدول داده ها به ۴ کیلو بایت حافظه نیاز دارد. یک جدول داده ها با سه ورودی و یک خروجی و هر ورودی دارای ۶ بیت دقت, نیازمند ۲۵۰ کیلو بایت حافظه خواهد بود. برخی طراحان, جداول داده ها را با دقت محدودی تولید کرده و در کنار آنها از الگوریتم های درونیابی بهره می گیرند. اما زمان لازم برای اجرای الگوریتم های درونیابی در حد اجرای خود منطق فازی زمانبر خواهد بود [2].

یکی دیگر از کاربرد های منطق فازی در کنترل موتور, مربوط به تنظیم دور درجا (idle) می باشد که نسخه ای از آن به وسیله کمپانی فورد به ثبت رسیده است [6].

جدول۱ـ قابلیت طبقه بندی نقاط کار موتور به وسیله متغیر زبانی "وضعیت".

```
linguistic variable Situation {

Term 1: Start
Control strategy is that the cold engine runs smooth. Ignition is
timed early, and the mix is fat;

Term 2: Idle
Control ignition timing and fuel injection depending on engine
temperature to ensure that the engine runs smooth;

Term 3: Normal drive, low or medium load
Maximize fuel efficiency by meager mix, watch knocking;

Term 4: Normal drive, high load
Fat mix and early ignition to maximize performance. The only
constraint is the permitted emission maximum;

Term 5: Coasting
Fuel cut-off, depending on situation;

Term 6: Acceleration
Depending on load, fattening of the mix }
```

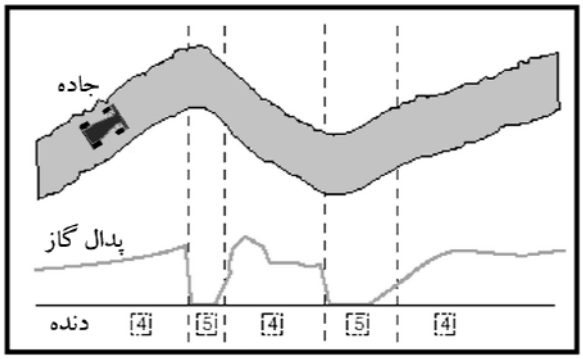
تعویض دنده اتوماتیک

زمانی که حدود سی سال پیش اولین گیربکسهای اتوماتیک سه سرعته به بازار عرضه گردیدند, در اکثر خودروها قدرت موتور در حدی بود که صرفاً می توانست مصالحهٔ بین سرعت و توان خودرو را متناسب با نوع ترافیک حفظ کند. در آن زمان, لزوم استحصال بیشترین گشتاور از موتور, مهمترین عامل در تعیین نقاط تعویض دنده محسوب می شد. اما امروزه از یک سو موتور اکثر خودروها توانایی فراهم نمودن قدرتی به مراتب بیشتر از حد لازم برای نگهداری صرف خودرو در شرایط ترافیک را پیدا کرده اند و از سوی دیگر سطوح سرعت در گیربکس های اتوماتیک به حداقل پنج سطح افزایش یافته اند. به علاوه, افزایش هر چه بیشتر راندمان سوخت در خودروهای امروزی یک موضوع بسیار مهم و تعیین کننده برای طراحان محسوب می شود. مجموعهٔ این عوامل باعث شده است که تعیین نقاط تعویض دنده در گیربکس های اتوماتیک جدید به مراتب پیچیده تر و دقیقتر از نسل های قدیمی آنها باشد.

وجود پنج سطح سرعت در گیربکس و برخورداری موتور از قدرت بیشتر باعث می شود که سیستم تعویض دنده اتوماتیک از درجه آزادی بالاتری برخوردار گردد. هنگام حرکت با سرعت ۵۰ کیلومتر بر ساعت, یک گیربکس اتوماتیک سه سرعته مجبور به انتخاب دنده دوم خواهد بود. اما یک گیربکس پنج سرعته همراه با یک موتور قدرتمند می تواند دنده دوم را برای دستیابی به حداکثر شتاب, دنده سوم را برای رانندگی در شرایط نرمال, و دنده چهارم را برای داشتن کمترین شتاب انتخاب نماید.

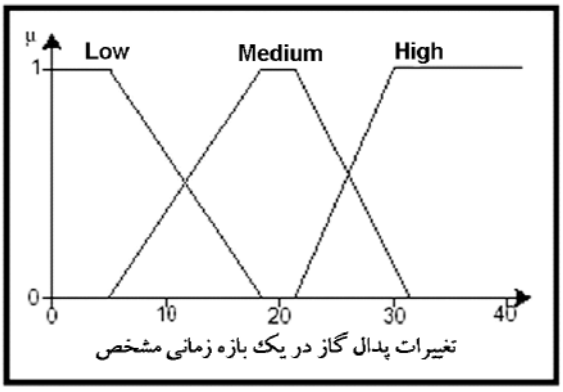
تعویض دنده فازی ـ در سال ۱۹۹۱ میلادی, کمپانی نیسان اولین گیربکس اتوماتیک پنج سرعته مبتنی بر منطق فازی را ارائه داد [7, 8]. یک سال پس از آن, کمپانی هندا گیربکس مشابهی را طراحی نمود [9], و دو سال پس از آن, کمپانی جنرال موتورز پیگیر این فناوری شد. راهکار مورد استفاده در همه این سیستمها مبتنی بر مبانی منطقی زیر بوده است:

* اجتناب از تعویض های "عصبی" دنده به بالا یا پائین, در جاده های پرپیچ و کوهستانی؛
* تخمین تمایل راننده به داشتن عملکرد اقتصادی یا اسپَرتی؛
* اجتناب از مصرف سوخت اضافی در شرایطی که انتقال به دنده پائینتر, باعث دستیابی به شتاب بیشتر نخواهد شد.



شکل۳ـ مقایسه یک گیربکس اتوماتیک پنج سرعته با نقاط تعویض ثابت و یک گیربکس معمولی.

شکل۳, یک موقعیت متعارف در یک جاده سریع و پر پیچ را نشان می دهد. در یک سیستم تعویض دنده معمولی, راننده کل مسیر را با دنده چهار می پیماید. با یک گیربکس اتوماتیک پنج سرعته, تعویض بین دنده های چهار و پنج, صرفاً بسته به سرعت خودرو, صورت می گیرد. اما یک گیربکس فازی, علاوه بر سرعت جاری خودرو موارد دیگری را نیز مورد بررسی قرار می دهد. به عنوان مثال, یک گیربکس فازی, چگونگی گاز دادن راننده را مورد تحلیل قرار می دهد. برای شناسایی یک جاده پرپیچ, تعداد تغییرات پدال گاز در یک بازه زمانی مشخص مورد توجه قرار می گیرد. شکل۴, تعریف متغیر زبانی "تغییرات پدال گاز" را نشان می دهد. واریانس تغییرات پدال گاز نیز به عنوان یک ورودی به کنترل کننده فازی مورد استفاده قرار می گیرد. برخی قواعد مربوط به تخمین شرایط جاده و نوع رانندگی با استفاده از این متغیرهای ورودی عبارتند از: تغییرات زیاد پدال, نشان دهنده یک جاده سریع و پرپیچ است؛ تغییرات کم پدال, نشان دهنده یک بزرگراه است؛ تغییرات زیاد پدال همراه با واریانس بالای این تغییرات, نشان دهنده یک جاده کُند و پرپیچ است؛ واریانس متوسط تغییرات پدال, نشان دهنده یک جاده سریع و پرپیچ است؛ واریانس پائین تغییرات پدال, نشان دهنده یک بزرگراه است.



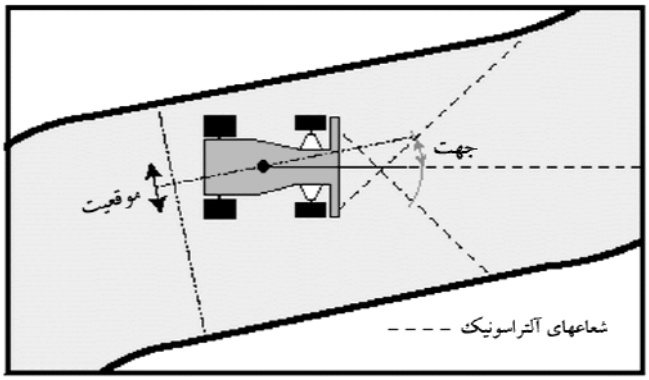
شکل۴ـ طبقه بندی نوع رانندگی با استفاده از متغیر زبانی "تغییرات پدال گاز".

نکته قابل توجه در این روش, آن است که سیستم فازی از راننده همچون یک حسگر بهره می گیرد. کنترل کننده فازی, عکس العمل راننده نسبت به جاده و شرایط رانندگی را تفسیر کرده و رفتار خود را متناسب با آن تطبیق می دهد. در برخی گیربکس های مدرن, توابع هوشمند به شکل کاملتری تعریف می شوند. به عنوان مثال, هنگامیکه راننده خواهان شتاب بالاتری است اما از پاسخ خودرو رضایت ندارد, بطور ناخودآگاه پدال را بیشتر فشار می دهد. این عکس العمل ناخودآگاه در بازه زمانی ۱ تا ۱/۵ ثانیه, در مورد بیشتر رانندگان رخ می دهد. در بسیاری موارد, شاید خود راننده نیز متوجه نباشد که طالب قدرت بیشتری از خودرو است. حال چنانچه یک گیربکس اتوماتیک توانایی آشکارسازی این مسئله را داشته باشد, قادر خواهد بود برای دستیابی به قدرت بیشتر, به سمت دنده های سنگینتر حرکت کند.

فرمان ضد لغزش

سیستم فرمان ضد لغزش, زاویه فرمان اعمال شده به چرخها از سوی راننده را در حدود قابل تحمل برای سطح جاده محدود کرده و از سرخوردن خودرو هنگام فرمان دادن جلوگیری می کند. با توجه به اینکه پایدارسازی مجدد یک خودروی سرخورده بسیار مشکل است, استفاده از فرمان ضد لغزش به فرمان پذیری بهتر و ایمنی بالاتر منجر خواهد شد. اما بدلیل پیچیدگی های فنی یک فرمان ضد لغزش, ساخت این سیستم ها از حساسیت بالایی برخوردار است. در یک ترمز ضد قفل, می توان ثابت کرد که عملکرد آن هرگز بدتر از یک ترمز معمولی نخواهد بود. اما اثبات ادعای مشابه برای یک فرمان ضد لغزش بسیار پیچیده است. با توجه به اینکه سیستم فرمان ضد لغزش یکی از پیچیده ترین سیستم های مطرح در خودرو می باشد, عملکرد منطق فازی در پیاده سازی آن می تواند قابلیت های این روش را بیشتر آشکار کند. کلیه نتایج ارائه شده در این بخش از تحقیقات یک سازنده آلمانی استخراج گردیده است [10].

خودروی مورد آزمایش ـ در این مقاله نتایج اجرا شده بر روی یک خودروی مدل به طول تقریبی ۵۰ سانتی متر ارائه می شود. توان خودروی مدل به وسیله یک موتور الکتریکی با قدرت یک اسب بخار تامین می شود. این موتور در وسط خودرو تعبیه شده است, به نحویکه نسبت توان به وزن خودروی مدل, مشابه یک خودروی مسابقه باشد. این مجموعه به محققان اجازه می دهد که آزمایش های مختلف سَریدگی و لغزش را در شرایط شدیداً ناپایدار و با سرعت های بالا به اجرا درآوردند. حداکثر سرعت مدل ۸۵ کیلومتر بر ساعت است و در یک مسیر خشک, ۳/۵ ثانیه طول می کشد تا سرعت آن از صفر به ۳۵ کیلومتر بر ساعت برسد. بازه تغییرات سرعت در بیشتر آزمایش ها بین ۳۵ تا ۵۰ کیلومتر بر ساعت است. هر چرخ دارای فنر بندی مستقل بوده و از کمک فنر مجزایی برخوردار است. همچنین, خودروی مدل مجهز به ترمزهای دیسکی و یک دستگاه دیفرانسیل قابل قفل است [10].



شکل۵ـ مسیر حرکت خودروی مدل به وسیله سه حسگر آلتراسونیک مشخص می شود.

برای کنترل خودرو از یک کامپیوتر کتابی (notebook) و یک برد الکترونیکی واسطه استفاده می شود که به وسیله آن می توان مقادیر حسگرها را خوانده و محرکها را فعال نمود. حسگرها عبارتند از سه حسگر آلتراسونیک برای دنبال کردن مسیر (شکل۵) و سه حسگر مادون قرمز در هر چرخ, برای اندازه گیری سرعت آن چرخ. محرکها عبارتند از انتقال دهنده قدرت به فرمان, انتقال دهنده قدرت به دیسک های ترمز, و راه انداز موتور الکتریکی.

برای ارزیابی شرایط دینامیکی خودرو (بعنوان مثال سَریدگی یا لغزش), حسگرهای مادون قرمز, سرعت هر یک از چرخها را اندازه گیری می کنند. با اندازه گیری اختلاف سرعت چرخها, سیستم فازی قادر به تفسیر وضعیت جاری خودرو خواهد بود. حسگرهای آلتراسونیک, فاصله خودرو تا موانع احتمالی در جلو, چپ, و راست را اندازه گیری کرده و امکان هدایت خودکار خودرو را فراهم می سازند. در این مطالعه, به جای استفاده از دوربین های فیلمبرداری و تکنیکهای پردازش تصویر, از

حسگرهای ارزان قیمت استفاده شده است. هدف, نشان دادن این واقعیت است که حسگرهای گران قیمت می توانند با راهبردهای منطق فازی جایگزین گردند.

مقایسه روش مبتنی بر مدل با روش مبتنی بر منطق فازی ــ از دیدگاه تئوری, با داشتن یک مدل مکانیکی از خودرو و تولید معادلات دیفرانسیال متناظر با آن, می توان یک کنترل کننده مبتنی بر مدل را پیاده سازی نمود. در عمل, پیچیدگی این روش بسیار زیاد و تنظیم کنترل کننده نهایی بسیار مشکل است. اما تأکید منطق فازی بر این نکته است که رانندگان حرفه ای بدون نیاز به حل هیچ معادله دیفرانسیلی, به خوبی قادر به کنترل یک خودرو در موقعیت های بسیار دشوار و نامتعادل می باشند. از اینرو بایستی یک راه حل جایگزین برای کنترل فرمان ضد لغزش نیز وجود داشته باشد. این راه حل جایگزین چیزی نیست جز لحاظ نمودن تجربیات رانندگی در محصولات مهندسی. اگر چه برای نیل به این منظور روشهای متعددی پیش روست, اما ثابت شده است که به دلایل زیر, منطق فازی دارای مؤثرترین نتایج خواهد بود:

*در اغلب موارد, امکان بیان تجربیات انسانی در قالب عبارتهای علی اگر- آنگاه وجود دارد. برخلاف ماهیت نمادین روشهای دیگری که از عبارتهای علی اگر- آنگاه بهره می گیرند (همچون سیستم های خبره), محاسبات منطق فازی دارای ماهیت و نتایجی کمی است.

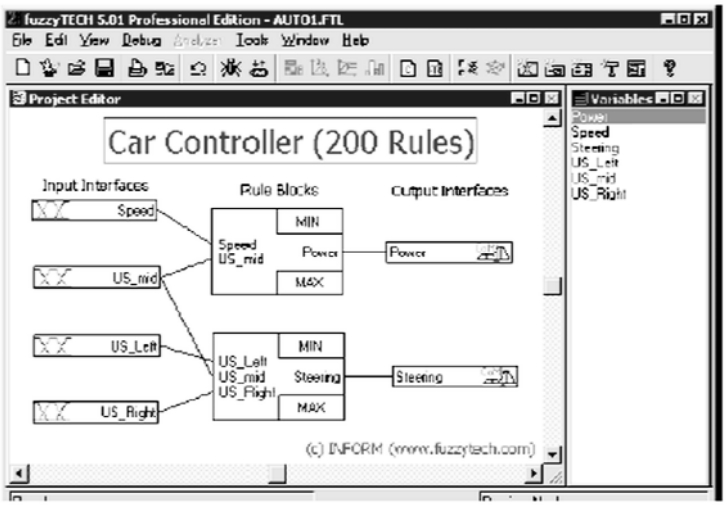
* در یک سیستم مبتنی بر منطق فازی, وضعیت های کلی سیستم به وسیله چند قاعده منطقی بیان شده و سپس الگوریتم فازی به استنتاج تصمیم در وضعیت های واقعی می پردازد, درحالی که در یک سیستم خبره معمولی، هر عنصر تنها توصیفگر نقش خویش است.

* متغیرهای زبانی, مفاهیم پیوسته را به روشی مشابه انسانها توصیف می کنند. به موازات آنها, قواعد فازی اگر- آنگاه, این مفاهیم را با روشی مشابه انسانها با یکدیگر ترکیب می کنند.

* منطق فازی دارای ماهیتی غیر خطی و چند پارامتری است. بنابراین در برخورد یا مسائل کنترل پیچیده از توانایی بالایی برخوردار است، مسائلی که خود نیز غیر خطی بوده و دارای پارامترهای متعددی می باشند.

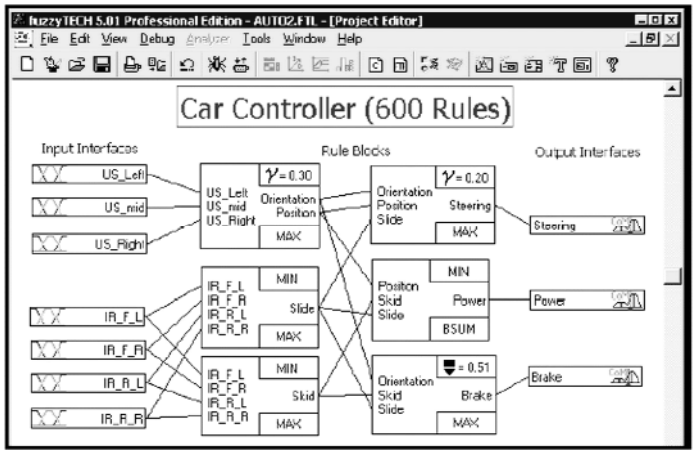
* پیاده سازی منطق فازی به عنوان روشی جایگزین, به سهولت امکانپذیر و قابل توجیه است. یک سیستم مبتنی بر منطق فازی در مقایسه با یک سیستم استاندارد مبتنی بر مدل, حتی با وجود یک میکروکنترلر معمولی قادر به ارائه عملکرد بهتری, چه از نظر حجم برنامه نهایی و چه از نظر سرعت اجرای محاسبات است.

طراحی و پیاده سازی ــ شکل۶, نشان دهنده اولین نسخه کنترل کننده فازی برای فرمان خودرو است. هدف این کنترل کننده عبارت است از هدایت خودکار خودرو در مسیری باسرعت پایین, بدون فرض هیچگونه سرخوردگی و لغزش. قواعد واقع در بلوک پایین, فواصل اندازه گیری شده به وسیله سه حسگر آلتراسونیک را برای تعیین زاویه فرمان مورد استفاده قرار می دهند. قواعد واقع در بلوک بالا, یک کنترل کننده ساده سرعت را شکل می دهند. این کنترل کننده تنها براساس تخمین فاصله تا مانع جلو - به وسیله حسگر آلتراسونیک جلو - و سرعت یکی از چرخهای جلو پیاده سازی می شود. بدلیل سرعت پایین, هیچ سرخوردگی و لغزشی اتفاق نمی افتد و سرعت کلیه چرخها مشابه است. این نسخه اولیه دارای ۲۰۰ قاعده فازی است و با صرف تنها چند ساعت می توان آنرا پیاده سازی نمود.



شکل۶ـ نسخه اول کنترل کننده فازی با ۲۰۰ قاعده و دو بلوک فازی.

نسخه دوم کنترل کننده فازی (شکل۷), به پیاده سازی سیستم پیچیده تری برای تضمین پایداری دینامیکی خودرو می پردازد که سیستمهای ترمز ضد قفل, کنترل رانش, و فرمان ضد لغزش را نیز شامل می شود. این کنترل کننده فازی دارای ۶۰۰ قاعده و دو طبقه استنتاج فازی است. طبقه اول که به وسیله سه بلوک سمت چپ مشخص می شود، با استفاده از اطلاعات حسگرها به تخمین متغیرهای حالت متناظر با وضعیت دنیامیکی خودرو می پردازد. دو بلوک پایین، حالت های سَرخوردگی و لغزش را با استفاده از سیگنالهای دریافتی از حسگرهای سرعت تخمین می زنند. بلوک بالا, موقعیت و جهت خودرو را در مسیر آزمایش تخمین می زند. باید توجه داشت که خروجی حاصل از سه بلوک سمت چپ - مربوط به تخمین متغیرهای حالت - یک عبارت زبانی است نه یک کمیت عددی. به عنوان مثال, متغیر حالت تخمین زده شده به وسیله طبقه اول می تواند عبارتی اینگونه باشد: "موقعیت خودرو تقریبا متمایل به چپ, جهت خودرو دقیقا به سمت راست، و خودرو در حال لغزش بر روی چرخ جلوی سمت چپ است".

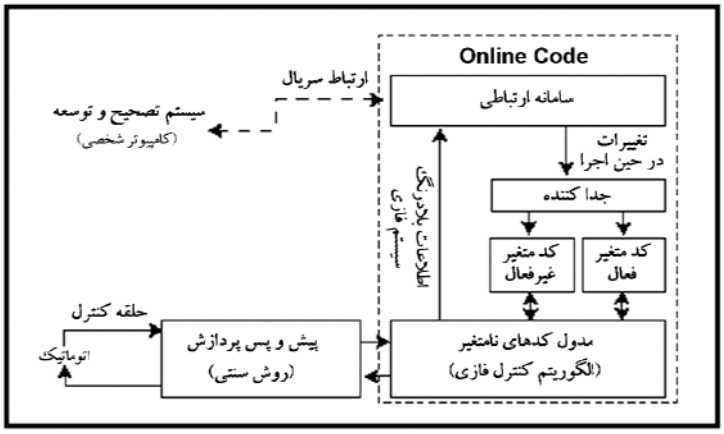


شکل۷ـ نسخه دوم کنترل کننده فازی با ۶۰۰ قاعده و سه بلوک فازی.

طبقه دوم که با سه بلوک سمت راست مشخص می شود، از تخمین طبقه اول به عنوان ورودی استفاده کرده و بهترین راهکار کنترل برای آن وضعیت خاص را تعیین می کند. وظیفه تعیین زاویه فرمان به عهده بلوک بالا, توان موتور به عهده

بلوک وسط, و نیروی ترمز به عهده بلوک پایین است. امکان طراحی و تصحیح مستقل قواعد هر یک از شش بلوک, شرایط را برای بهینه سازی مؤثر این کنترل کننده ۶۰۰ قاعده ای فراهم می کند.

توسعه و تکمیل در حین اجرا - برای توسعه و تکمیل کنترل کننده فازی از نرم افزار fuzzyTECH استفاده شده است [11]. با استفاده از این نرم افزار می توان کلیه جوانب یک سیستم فازی, اعم از ساختار سیستم، متغیرهای زبانی، و قواعد فازی را در یک محیط گرافیکی تعریف و به وسیله مترجم آن، برنامه معادل به زبان C یا اسمبلی را تولید نمود. سپس این برنامه ها به کدهای اجرایی تبدیل و به حافظه سخت افزار تعبیه شده در داخل خودرو منتقل می شود. شکل۸, روش پیاده سازی این سیستم و اصلاح نرم افزار کنترل, همزمان با اجرای آن را نشان می دهد.



شکل۸ــ عملیات نمایش و بهینه سازی همزمان سیستم با استفاده از نرم افزار fuzzyTECH.

کدهای فازی به دو بخش تقسیم شده اند. یک بخش شامل کدهای نا متغیری است که نیازمند اصلاح نبوده و در نسخه های مختلف ثابت می مانند. بخش دیگر شامل کلیه کدهایی است که در نسخه های مختلف تغییر می کنند. این کدها عبارتنداز توابع عضویت متغیرهای زبانی, ساختار استنتاج, و قواعد فازی. بخش متغیر, خود از دو بخش فعال و غیر فعال تشکیل شده است که جفت یکدیگر محسوب می شوند. جدا کننده (parser) که وظیفه انتخاب بین دو بخش فعال و غیرفعال را بر عهده دارد، از طریق یک سامانه ارتباطی به یک کامپیوتر شخصی متصل است که عملیات توسعه و تکمیل بر روی آن اجرا می گردد. این ساختار, امکان اصلاح و بهینه سازی کنترل کننده در حین اجرای آن را فراهم می سازد. همزمان, فرآیند استنتاج و کنترل فازی بر روی کامپیوتر شخصی قابل نمایش است. انتقال بلادرنگ اطلاعات کنترلی به کامپیوتر شخصی نیز از طریق همان سامانه ارتباطی محقق می شود.

فرمان ضد لغزش, مثال روشنی از توانایی منطق فازی برای حل مسائل کنترلی پیچیده در صنعت خودرو می باشد که بدون نیاز به یک مدل ریاضی و تنها براساس تجربیات واقعی تحقق یافته است. به دلیل ماهیت زبانی منطق فازی، توسعه و بهینه سازی راهبرد کنترل به سهولت امکانپذیر می شود. همچنین به دلیل شفافیت روش کنترل, تحلیل نتایج و انجام اصلاحات به سرعت عملی می شود. نکته قابل تأکید دیگر, ظهور نسل جدیدی از ابزار طراحی و پیاده سازی نرم افزاری است که نقایص و ضعفهای نرم افزارهای پیشین را بطور کامل جبران کرده و از قابلیت های بالای ارتباط با سخت افزار بهره مند می باشند [13, 2].

آینده منطق فازی در صنعت خودرو

در طول ده سال اخیر, منطق فازی تاثیر قابل ملاحظه ای بر طراحی سیستم های کنترل خودرو داشته است. کلید موفقیت منطق فازی در مهندسی خودرو، امکان پیاده سازی سریع آن به عنوان یک رویکرد جدید است. پیش از این, مهندسان

خودرو مجبور به صرف زمان زیادی برای استخراج مدلهای ریاضی از سیستمهای مکانیکی بودند. پس از آن, زمان طولانی تری برای انجام آزمایش های واقعی لازم بود تا براساس آنها, ضرایب تصحیح نهایی در الگوریتمهای کنترلی تعیین شوند. اگر این فرآیند با موفقیت به انجام می رسید, نتیجه حاصل از آن یک الگوریتم کنترل مبتنی بر معادلات ریاضی بود که به وسیله پارامترهای تجربی متعددی تکمیل می شد. عدم شفافیت این روش باعث می شد که بهینه سازی های بعدی بسیار پیچیده و مشکل باشد.

منطق فازی, پروسه طراحی را سریعتر, آسانتر و شفافتر می سازد. با استفاده از آن می توان راهبردهای کنترلی پیچیده را در قالب عبارتهای زبانی ساده پیاده سازی نمود. هر فرد آشنا با مسئله کنترل قادر است قوانین فازی راخوانده و راهبرد کنترل سیستم را درک نماید. همچین منطق فازی از توانایی بالایی برای حل مسائل کنترل با پارامترهای متعدد برخوردار است. با استفاده از منطق فازی, امکان طراحی و پیاده سازی سیستمهای ابداعی جدیدی فراهم می شود که به وسیله روشهای سنتی هیچگاه قابل دسترس نبودند.

مراجع

[1] Intel, “Fuzzy Anti-Lock Braking System,” developer.intel.com/design/MCS96/DESIGNEX/2351.htm, 1996.
[2] “Benchmark Suites for Fuzzy Logic,” www.fuzzytech.com/e_dwnld.htm, 1997.
[3] N. Matsumoto et al., “Expert antiskid system,” *IEEE IECON’87*,810–816, 1987.
[4] C. von Altrock, *Fuzzy Logic and NeuroFuzzy Applications Explained*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1995.
[5] H. Kawai et al., “Engine control system,” *Proc. of the Int’l Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks*, Iizuka, Japan, 929–937, 1990.
[6] L. Feldkamp and G. Puskorius, “Trainable fuzzy and neural-fuzzy systems for idle-speed control,” *2nd IEEE Int’l. Conf. on Fuzzy Systems*, 45–51, 1993.
[7] H. Takahashi, K. Ikeura, and T. Yamamori, “5-speed automatic transmission installed fuzzy reasoning,” *IFES’91–Fuzzy Engineering toward Human Friendly Systems*, 1136–1137, 1991.
[8] H. Ikeda et al., “An intelligent automatic transmission control using a one-chip fuzzy inference engine,” *Proc. of the Int’l. Fuzzy Systems and Intelligent Control Conf. in Louisville*, 44–50, 1992.
[9] P. Sakaguchi et al., “Application of fuzzy logic to shift scheduling method for automatic transmission,” *2nd IEEE Int’l. Conf. on Fuzzy Systems*, 52–58, 1993.
[10] C. von Altrock, B. Krause, and H.-J. Zimmermann, “Advanced fuzzy logic control of a model car in extreme situations,” *Fuzzy Sets and Systems*, 48:1, 41–52, 1992.
[11] INFORM GmbH/Inform Software Corp., fuzzy*TECH and NeuroFuzzy Module 5.0 User’s Manual*, Chicago, IL, 1997.
[12] H.-J. Zimmermann and U. Thole, “On the suitability of minimum and product operators for the intersection of fuzzy sets,” *Fuzzy Sets and Systems*, 2, 173–186, 1979.
[13] C. von Altrock and B. Krause, “On-Line-Development Tools for Fuzzy Knowledge-Base Systems of Higher Order,” *2nd Int’l Conf. on Fuzzy Logic and Neural Networks Proceedings*, Iizuka, Japan, 1992.