

فصل 15

کاربردهای فازی در هواشناسی

15-1: مقدمه

با وجود تعداد زیادی مدل‌های محاسباتی برای فرآیندهای هواشناسی که مرتباً (از لحاظ دقت مکانی و زمانی) در حال پیشرفت هستند، هنوز می‌توان فرآیندهایی را در هواشناسی یافت که چنین مدل‌هایی برای آنها وجود ندارد.

فرآیندهای فیزیکی که ماهیت آنها به‌خوبی درک نشده است یا فراتر از دقت مدل‌های موجود می‌باشند، نیاز به روش‌های جایگزین دارند تا به کمک آنها، امکان آنالیز و پیش‌بینی این فرآیندها میسر شود. مثلاً پیش‌بینی پدیده‌هایی مثل پیدایش ابرهای نزدیک به زمین (استراتوس) و همرفت دماپی، همیشه مشکل بوده است.

اکثر هواشناسان بر این باورند که تجربه، بهترین ابزار پیش‌بینی این پدیده‌ها است. با ترکیب تجربه هواشناسان با فناوریهای پیشرفته کنونی، پیش‌بینی سریع‌تر و مطمئن‌تر این پدیده‌ها مقدور می‌شود.

منطق فازی به عنوان یک راه‌حل، سعی در شبیه‌سازی روش‌های طبیعی حل مسئله دارد و می‌تواند برای یافتن راه‌حل مسائلی که اطلاعات آنها غیرشفاف، کیفی، ناقص، مبهم و غیردقیق است، به‌خوبی عمل کند. مسائل زیادی در علم هواشناسی، از نظر اطلاعات مسئله مانند موارد ذکر شده در بالا است و روش تحلیلی خاصی برای یافتن جواب آنها وجود ندارد. نمونه‌های بسیاری در مسائل هواشناسی فقط با روش‌های آماری (برای کار با حجم انبوه داده‌ها) حل می‌شوند. در برخی موارد، از درخت‌های تصمیم و فلوچارت‌ها استفاده می‌شود که آنها نیز بر مبنای منطق معمولی عمل می‌کنند.

برای مثال، یک قاعده کلی تجربی در پیش‌بینی مقدار افزایش ناگهانی بارش روی یک دریای بزرگ، بیان می‌کند که این مقدار به طول واکنشی جریان هوا روی آب‌های آزاد بستگی دارد و مقدار آستانه‌ای برابر 80 مایل دریایی برای وقوع این پدیده، مطلوب می‌باشد. با فرض برابری سایر پارامترها، یک واکنشی برابر با 70 مایل دریایی، هرچند که دارای محدوده کوچکتري است، ممکن است باعث بوران برف شود.

منطق فازی، بدون نیاز به تعیین مقادیر آستانه‌ای برای ورودیهای یک سیستم، می‌تواند برای محاسبه خروجی سیستم مورد استفاده واقع شود. بنابراین استفاده از چنین سیستمی برای پیش‌بینی فرآیندهای مشابه با مثال بالا، امری منطقی به نظر می‌رسد.

15-2: تعریف سیستم فازی برای پیش‌بینی مه

مه^۱ یک پدیده جالب هواشناسی است که در بسیاری از نقاط کره زمین (مانند کانادا) به وفور اتفاق می‌افتد. در سالهای گذشته تلاشهای بسیاری برای پیش‌بینی مه انجام شده و تکنیکهای متنوع و متعددی نیز پیاده‌سازی شده‌اند. اگرچه هنوز هیچ روش تحلیلی برای پیش‌بینی مه اعلام نشده است، اما هواشناسان بر این باورند که تمام اجزای فیزیکی مهم در تشکیل مه را به خوبی شناخته‌اند.

در بدو امر، باید موارد ذیل را برای سیستم فازی پیش‌بینی مه تعیین نماییم تا در ادامه به بحث مفصل‌تر در مورد آنها بپردازیم:

- ورودیهای سیستم و مجموعه‌های فازی
- مجموعه قوانین (Rule base)
- خروجی سیستم

15-2-1: ورودیهای سیستم و مجموعه‌های فازی

هر مسئله تحت‌بررسی در دنیای واقعی یک سیستم است که ورودیهای آن، تعدادی متغیر فیزیکی هستند که سعی می‌کنند تا راه‌حلهای مسئله را به درستی تعیین نمایند. این راه‌حلهای، در حکم خروجیهای سیستم می‌باشند. برای مسئله‌ای که تا انتهای فصل به بررسی آن می‌پردازیم، خروجی سیستم خود را عدد بیانگر "احتمال وقوع مه در شش ساعت آینده" در نظر می‌گیریم.

¹ Fog

ورودیهای مورد استفاده برای این سیستم فازی عبارتند از:

- مقدار نقطه شب‌نم (برحسب درجه سانتی‌گراد)
- گسترش نقطه شب‌نم (برحسب درجه سانتی‌گراد)
- میزان تغییرات این گسترش (برحسب درجه سانتی‌گراد بر ساعت)
- سرعت باد (برحسب مایل دریایی)
- منطقه تحت پوشش آسمان

ورودیهای این سیستم همان پارامترهایی هستند که برای تشخیص وقوع مه توسط یک هواشناس، استفاده می‌شوند. البته متغیرهای دیگری نیز وجود دارند که ممکن است یک هواشناس برای پیش‌بینی مه به آنها توجه نماید. مثلاً در بسیاری از مواقع، جهت مناسب باد می‌تواند پارامتری موثر در تشکیل و میزان غلظت مه باشد.

چون هدف ما معرفی یک روش کلی در کاربرد منطق فازی می‌باشد، از در نظر گرفتن این پارامتر و سایر جزئیات دیگر، خودداری می‌کنیم. از این موارد می‌توان در تعمیم سیستم فعلی استفاده کرد.

ورودیهای سیستم به دامنه‌های مختلفی به نام مجموعه‌های فازی تقسیم می‌شوند که این مجموعه‌های فازی، در حقیقت توصیف‌کننده‌های کیفیتی هستند که از دامنه خاصی از ورودی انتخاب شده‌اند. هر ورودی پارامتری است که تصور می‌شود تاثیر مناسبی بر خروجی داشته باشد. جدول 1-15 متغیرهای ورودی و محدوده تغییرات آنها را برای مجموعه‌های فازی سیستم پیش‌بینی مه نشان می‌دهد.

جدول 1-15: متغیرهای ورودی و مقادیر آنها در مجموعه‌های فازی مسئله

نقطه شب‌نم	گسترش	میزان تغییرات	باد	آسمان
خشک	اشباع نشده	خشک شدن	خیلی سبک	ابری
معتدل	اشباع	اشباع شدن	مناسب	صاف
مرطوب	خیلی اشباع	-----	خیلی شدید	-----
خیلی مرطوب	-----	-----	-----	-----

در ادامه مطلب، به شرح خصوصیات توصیف‌کننده‌های کیفی بیان‌شده در جدول 1-15 و تاثیرات فیزیکی آنها در احتمال تشکیل مه خواهیم پرداخت:

1. مقدار نقطه شبنمی به یکی از چهار مجموعه فازی «خشک، معتدل، مرطوب، خیلی مرطوب» تعلق خواهد گرفت.

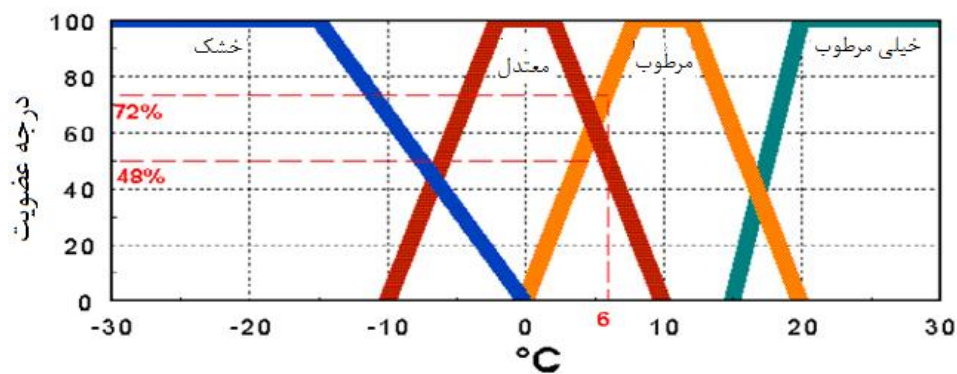
2. مقدار گسترش نقطه شبنمی به یکی از سه مجموعه فازی «اشباع نشده، اشباع، خیلی اشباع» تعلق خواهد گرفت.

3. میزان تغییرات گسترش نقطه شبنمی به یکی از دو مجموعه فازی «خشک شدن، اشباع شدن» تعلق خواهد گرفت و بیانگر وضعیت اتمسفر می‌باشد که در حال خشک شدن (تاثیر مثبت) یا اشباع شدن (تاثیر منفی) است.

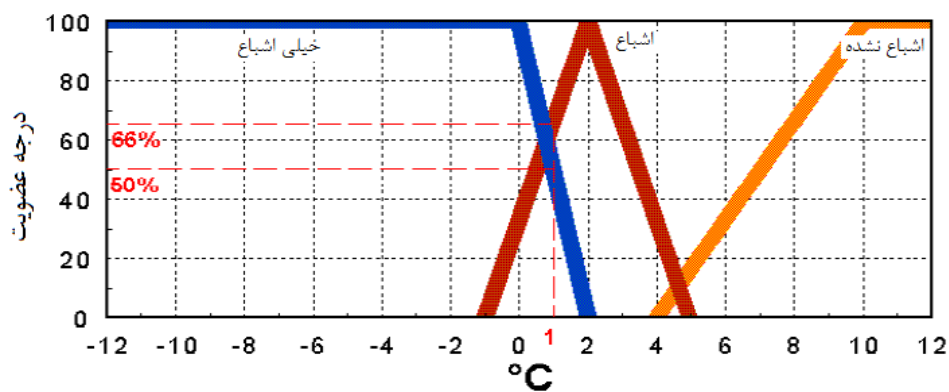
4. تاثیر باد در پیدایش مه که با عامل سرعت باد نشان داده می‌شود، به یکی از سه مجموعه فازی «خیلی سبک، مناسب، خیلی شدید» تعلق خواهد گرفت. حالت «خیلی سبک» و حالت «خیلی شدید» برای وقوع مه، چندان مناسب نیستند.

5. پارامتر بیانگر وضعیت آسمان هم به یکی از دو مجموعه فازی «بری، صاف» تعلق خواهد گرفت.

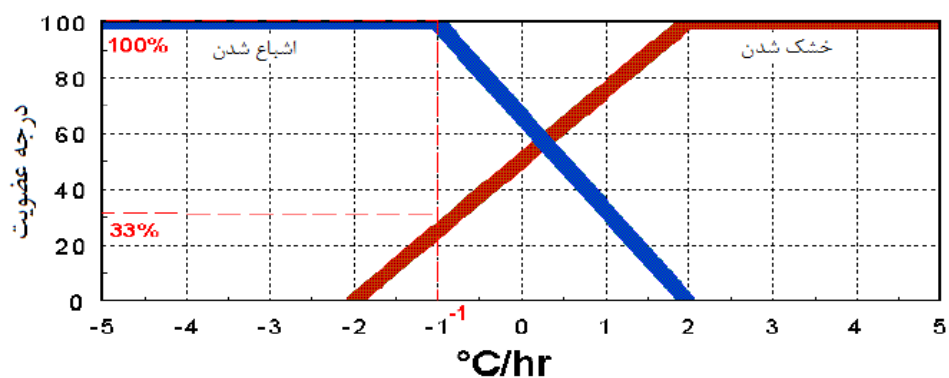
تعیین صحیح و مناسب این مجموعه‌های فازی به تجربه طراح مربوط می‌شود. یک طراح سیستم فازی، با حساسیتی که به خرج می‌دهد، تمامی این مجموعه‌ها را به‌گونه‌ای انتخاب می‌نماید که بیشترین تاثیر را در خروجی داشته باشند. در شکل‌های 1-15 تا 5-15 توابع عضویت مجموعه‌های فازی برای هر پنج متغیر ورودی سیستم فازی تشخیص مه، نشان داده شده‌اند.



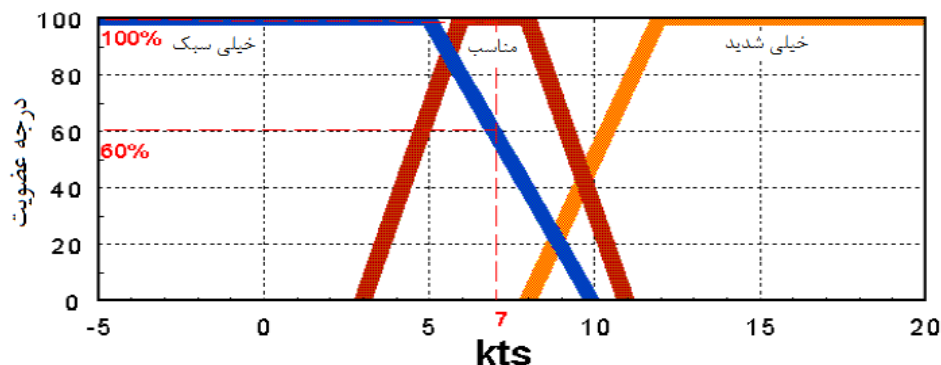
شکل 15-1: توابع عضویت مجموعه‌های فازی برای نقطه شب‌نیم



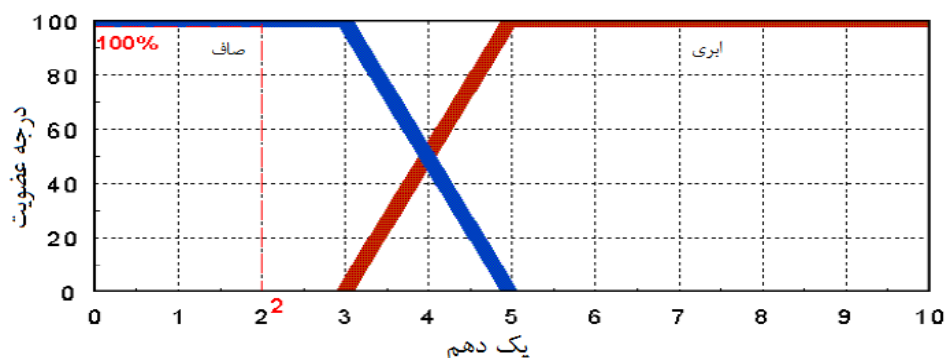
شکل 15-2: توابع عضویت مجموعه‌های فازی برای گسترش نقطه شب‌نیم



شکل 15-3: توابع عضویت مجموعه‌های فازی میزان تغییرات گسترش



شکل 15-4: توابع عضویت مجموعه‌های فازی سرعت باد



شکل 15-5: توابع عضویت مجموعه‌های فازی وضعیت آسمان

مجموعه‌های فازی از نظر کمی به وسیله توابع عضویت تعیین می‌شوند. این توابع معمولاً توابع ساده‌ای هستند که محدوده خاصی از دامنه یک متغیر ورودی سیستم را پوشش می‌دهند. عمدتاً از توابع ذوزنقه‌ای، مثلثی، مستطیلی و دلتا استفاده می‌شود. تابع عضویت مربوط به هر مجموعه فازی، مقدار عددی مربوط به درجه عضویت ورودی به آن مجموعه را تعیین می‌کند. هر مقدار از ورودیهای سیستم باید حداقل در یکی از مجموعه‌های فازی قرار بگیرد. به دلیل هم‌پوشانی مجموعه‌های همسایه با یکدیگر در هنگام ساخت آنها، ممکن است که یک ورودی، در بیش از یکی از مجموعه‌ها عضو باشد. مثلاً در شکل 1-15 مقدار نقطه شبنم که با 6 درجه سانتی‌گراد مشخص شده است، هم در مجموعه "معتدل" و هم در مجموعه "مرطوب" عضو می‌باشد. در شکل 1-15 مقدار

6 درجه سانتی‌گراد برای نقطه شبنم، دارای درجه عضویتی برابر 48٪ در مجموعه "معتدل" و درجه عضویتی برابر 72٪ در مجموعه "مرطوب" و درجه عضویتی برابر صفر در بقیه مجموعه‌ها می‌باشد. شایان ذکر است که تمام دامنه فیزیکی ورودی یک سیستم، باید توسط مجموعه‌های فازی پوشانده شود. مقادیر نهایی برای نقطه شبنم یعنی "خشک" و "خیلی مرطوب" به وسیله توابع عضویتی توصیف شده‌اند که خطوط افقی با میزان عضویت 100٪ را شامل می‌شوند. گاهی اوقات ممکن است تابع عضویت، توصیف‌کننده مقادیر غیرفیزیکی مانند "گسترش منفی نقطه شبنم" باشد که تاثیر منفی در عملکرد الگوریتم ندارد.

درجه عضویت ورودیهای سیستم براساس شکل‌های بالا تعیین می‌شود. یافتن خروجی سیستم (احتمال وقوع مه) به کمک قوانین فازی مسئله انجام خواهد شد. قدرت یک قانون با درجه عضویت ورودیهای سیستم که با آن قانون مرتبط هستند، تعیین می‌شود. اگر یک ورودی در چند مجموعه فازی عضویت داشته باشد، قوانین تمام آن مجموعه‌ها برای آن ورودی قابل اعمال خواهد بود. هرچه مقدار درجه عضویت برای ورودی سیستم در یک مجموعه بیشتر باشد، قوانین مربوط به آن مجموعه فازی تاثیر بیشتری در نتیجه نهایی فرآیند خواهند داشت.

15-2-2: مجموعه قوانین

یک Rule Base مشتمل بر مجموعه قوانینی به فرم If-Then است. قسمت If هریک از قوانین، مجموعه‌ای از درجه عضویت ورودیها در مجموعه‌های فازی مسئله می‌باشد و قسمت Then هر قانون، یک وضعیت خروجی سیستم را بیان می‌کند. به عنوان مثالی از یک قانون، به عبارت زیر توجه کنید:

*If (dry & unsaturated & drying & too light & cloudy)
Then (low probability of fog)*

قوانین هر سیستم بر مبنای تجربه هواشناس ساخته می‌شوند. ابتدا تمام ترکیبات و حالات ممکن را برای جدول 1-15 می‌یابیم و سپس تعیین می‌کنیم که در صورت وقوع هر یک از این حالات، چه احتمالی را در خروجی برای تشکیل مه خواهیم داشت. چون در این مسئله پنج متغیر داریم، قسمت ابتدایی قوانین شامل پنج بخش می‌باشد. برای هر بخش، تمام حالت‌های ممکن آن را قرار می‌دهیم تا کل ترکیبات معتبر برای سیستم شناسایی شود. به عنوان مثال، تعدادی از حالت‌های ممکن که براساس داده‌های جدول به دست می‌آیند، عبارتند از:

اگر (مرطوب و اشباع و خشک و مناسب و صاف) آنگاه
 اگر (مرطوب و اشباع و خشک و مناسب و ابری) آنگاه
 اگر (مرطوب و اشباع و خشک و خیلی سبک و صاف) آنگاه

به‌همین ترتیب، سایر قوانین نیز از روی جدول حاصل می‌شوند. سپس، بخش خروجی (نقطه‌چینه‌های پس از آنگاه) توسط یک هواشناس باتجربه و ماهر تکمیل می‌شود. طبق مطالب فوق و اصل ضرب در آمار، تعداد قوانین نهایی برابر با حاصل ضرب تعداد مجموعه‌های فازی موجود در تعریف سیستم می‌باشد. به عبارت دیگر، تعداد قوانین برابر با تعداد کل ترکیبات موجود از ورودی‌های دسته‌بندی‌شده سیستم می‌باشد که مطابق اصول آمار و احتمالات به دست می‌آید.

در مسئله ما، چهار مجموعه به مقدار نقطه شبنم، سه مجموعه به میزان گسترش نقطه شبنم، دو مجموعه به میزان تغییرات این گسترش، سه مجموعه به سرعت باد و نهایتاً دو مجموعه به وضعیت آسمان وابسته‌اند. بنابراین تعداد نهایی قوانین برابر خواهد بود با:

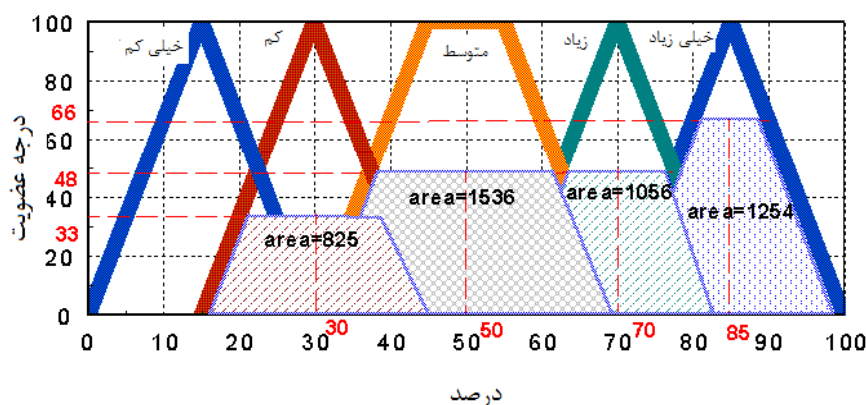
$$4 \times 3 \times 2 \times 3 \times 2 = 144$$

مشخص است که تعداد قوانین با افزایش تعداد ورودی‌های سیستم و مجموعه‌های فازی مرتبط افزایش می‌یابد. میزان قدرت خروجی یک قانون در قسمت Then، در حقیقت کوچک‌ترین مقدار عددی توابع عضویت تشکیل‌دهنده ورودی‌های آن در قسمت If می‌باشد. اگر قسمت If برای بیش از یک قانون درست باشد، در این صورت قانونی انتخاب می‌شود که دارای قدرت بیشتری است.

15-2-3: خروجی سیستم

خروجی سیستم به وسیله تابع عضویت مشابه با ورودی تعیین می‌شود. مجموعه‌های خروجی سیستم مسئله در شکل 15-6 نشان داده شده‌اند. در انتهای کار، توابع عضویت خروجی به یک مقدار نهایی غیرفازی برای خروجی سیستم منجر می‌شوند. در حقیقت، این فرآیند معکوس فرآیند تعیین درجه عضویت می‌باشد.

در اینجا از روش مرکز ثقل برای غیرفازی‌سازی استفاده می‌کنیم. در این روش، تمام مساحتی که خروجی در آن قرار می‌گیرد و از نظر ارتفاع با مقدار قدرت قانون محدود شده است، اندازه‌گیری می‌شود تا یک مقدار میانگین وزن‌دار از خروجی محاسبه شود. در قسمت بعد به همراه یک مثال به توضیح بیشتر این مفاهیم خواهیم پرداخت.



شکل 15-6: توابع عضویت برای مجموعه‌های فازی احتمال تشکیل مه

15-3: مثال برای سیستم پیش‌بینی مه

برای روشن‌تر شدن این بحث و طریقه انجام محاسبات ریاضی فازی، یک مثال عددی را در ارتباط با پیش‌بینی مه بررسی می‌کنیم. در این مثال، تمامی مراحل انجام محاسبات و

کسب نتایج به تفصیل ذکر شده است. جواب نهایی به دست آمده، بیانگر احتمال وقوع مه مطابق مفروضات مسئله می باشد.

فرض کنید داده های قطعی زیر به عنوان مفروضات مسئله موجود باشند:

- نقطه شبنم: 6 درجه سانتی گراد
- گسترش نقطه شبنم: 1 درجه سانتی گراد
- میزان تغییر نقطه شبنم: 1- درجه سانتی گراد بر ساعت ($-1^{\circ}\text{C} / \text{hr}$)
- سرعت باد: 7000 مایل دریایی
- میزان پوشش آسمان: 0.2

مرحله اول شامل تعیین درجه عضویت هر ورودی در مجموعه های فازی است، یعنی باید ورودیهای قطعی را به ورودیهای فازی تبدیل کنیم. برای این کار باید در نمودار تابع عضویت مربوط به هر ورودی در شکلهای 1-16 تا 5-16، عدد فرض مسئله را روی محور افقی یافته، آن را با نمودار تلاقی دهیم و برحسب اینکه کدام نمودارهای عضویت را قطع می کند درجه عضویت را به دست آورده، در جدولی یادداشت نماییم. با این کار ورودیهای مسئله فازی می شوند. با انجام این مراحل، اطلاعات زیر به دست می آید:

- مقدار 6 درجه سانتی گراد برای نقطه شبنم، بیانگر 72٪ عضویت آن در مجموعه "مرطوب" و 48٪ عضویت آن در مجموعه "معتدل" است.
- مقدار گسترش 1 درجه سانتی گراد برای نقطه شبنم، بیانگر 66٪ عضویت آن در مجموعه "اشباع" و 50٪ عضویت آن در مجموعه "خیلی اشباع" است.
- میزان تغییرات 1- درجه سانتی گراد در ساعت، بیانگر 100٪ عضویت در مجموعه "اشباع شدن" و 33٪ عضویت آن در مجموعه "خشک شدن" است.
- سرعت باد برابر با 7000 مایل دریایی، بیانگر 100٪ عضویت آن در مجموعه "مناسب" و 60٪ عضویت آن در مجموعه "خیلی سبک" است.
- پوشش آسمانی برابر 0.2، بیانگر 100٪ عضویت آن در مجموعه "صاف" است.

اگر درجه عضویتی برای یک مجموعه فازی خاص ذکر نشده باشد، بدین معناست که

این درجه عضویت برای آن مجموعه فازی، برابر با صفر می باشد.

در گام بعدی به سراغ قوانین می‌رویم تا در هر قانون مقدار درجه عضویت را در قسمت اول آن گذاشته و نتیجه را برحسب درجه عضویت بیابیم. چون ورودیه‌ها، برخی از نمودارها را قطع نمی‌کنند، لذا آن قوانین از لیست مورد بررسی ما حذف می‌شوند. بنابراین، تعداد قوانین غیرصفر (دارای هم‌پوشانی در نمودار) از رابطه زیر محاسبه می‌شود:

$$2 \times 2 \times 2 \times 2 \times 1 = 16$$

مشاهده می‌شود که تنها 16 قانون از 144 قانون ممکن باقی می‌ماند. در ادامه به بیان مجموعه قوانین قابل اعمال به این مثال می‌پردازیم که عبارتند از:

1. If (moderate & saturated & drying & excellent & clear) Then (low probability of fog)
2. If (moderate & saturated & drying & too light & clear) Then (low probability of fog)
3. If (moderate & saturated & saturating & excellent & clear) Then (high probability of fog)
4. If (moderate & saturated & saturating & too light & clear) Then (medium probability of fog)
5. If (moderate & very saturated & drying & excellent & clear) Then (medium probability of fog)
6. If (moderate & very saturated & drying & too light & clear) Then (medium probability of fog)
7. If (moderate & very saturated & saturating & excellent & clear) Then (very high probability of fog)
8. If (moderate & very saturated & saturating & too light & clear) Then (high probability of fog)
9. If (moist & saturated & drying & excellent & clear) Then (medium probability of fog)
10. If (moist & saturated & drying & too light & clear) Then (medium probability of fog)
11. If (moist & saturated & saturating & excellent & clear) Then (very high probability of fog)
12. If (moist & saturated & saturating & too light & clear) Then (very high probability of fog)
13. If (moist & very saturated & drying & excellent & clear) Then (high probability of fog)

14. If (moist & very saturated & drying & too light & clear) Then (high probability of fog)
15. If (moist & very saturated & saturating & excellent & clear) Then (very high probability of fog)
16. If (moist & very saturated & saturating & too light & clear) Then (very high probability of fog)

در مرحله بعد، قدرت قوانین به کمک اصل گسترش تعیین می‌شود. برای تعیین قدرت یک قانون، به ازای هر بخش ورودی مقادیر عضویت را جایگزین کرده، درجه عضویت نتیجه آن قانون را برابر با مینیمم درجات عضویت بخشهای ورودی آن قرار می‌دهیم. روش تعیین قدرت تمامی 16 قانون در زیر آمده است:

1. اگر (معتدل و اشباع و خشک و مناسب و صاف)، احتمال مه کم
 $0.48 \text{ و } 0.66 \text{ و } 0.33 \text{ و } 1.00 \text{ و } 1.00 \leftarrow 0.33$
2. اگر (معتدل و اشباع و خشک و خیلی سبک و صاف)، احتمال مه کم
 $0.48 \text{ و } 0.66 \text{ و } 0.33 \text{ و } 0.60 \text{ و } 1.00 \leftarrow 0.33$
3. اگر (معتدل و اشباع و اشباع و مناسب و صاف)، احتمال مه زیاد
 $0.48 \text{ و } 0.66 \text{ و } 1.00 \text{ و } 1.00 \text{ و } 1.00 \leftarrow 0.48$
4. اگر (معتدل و اشباع و اشباع و خیلی سبک و صاف)، احتمال مه متوسط
 $0.48 \text{ و } 0.66 \text{ و } 1.00 \text{ و } 0.60 \text{ و } 1.00 \leftarrow 0.48$
5. اگر (معتدل و خیلی اشباع و خشک و مناسب و صاف)، احتمال مه متوسط
 $0.48 \text{ و } 0.50 \text{ و } 0.33 \text{ و } 1.00 \text{ و } 1.00 \leftarrow 0.33$
6. اگر (معتدل و خیلی اشباع و خشک و خیلی سبک و صاف)، احتمال مه متوسط
 $0.48 \text{ و } 0.50 \text{ و } 0.33 \text{ و } 0.60 \text{ و } 1.00 \leftarrow 0.33$
7. اگر (معتدل و خیلی اشباع و اشباع و مناسب و صاف)، احتمال مه خیلی زیاد
 $0.48 \text{ و } 0.50 \text{ و } 1.00 \text{ و } 1.00 \text{ و } 1.00 \leftarrow 0.48$
8. اگر (معتدل و خیلی اشباع و اشباع و خیلی سبک و صاف)، احتمال مه زیاد
 $0.48 \text{ و } 0.50 \text{ و } 1.00 \text{ و } 0.60 \text{ و } 1.00 \leftarrow 0.48$

9. اگر (مرطوب و اشباع و خشک و مناسب و صاف)، احتمال مه متوسط
 $0.72 \leq 0.66 \leq 0.33$ و $0.100 \leq 0.100 \leq 0.33$
10. اگر (مرطوب و اشباع و خشک و خیلی سبک و صاف)، احتمال مه متوسط
 $0.72 \leq 0.66 \leq 0.33$ و $0.60 \leq 0.100 \leq 0.33$
11. اگر (مرطوب و اشباع و اشباع و مناسب و صاف)، احتمال مه خیلی زیاد
 $0.72 \leq 0.66 \leq 0.100$ و $0.100 \leq 0.100 \leq 0.66$
12. اگر (مرطوب و اشباع و اشباع و خیلی سبک و صاف)، احتمال مه خیلی زیاد
 $0.72 \leq 0.66 \leq 0.100$ و $0.60 \leq 0.100 \leq 0.60$
13. اگر (مرطوب و خیلی اشباع و خشک و مناسب و صاف)، احتمال مه زیاد
 $0.72 \leq 0.50 \leq 0.33$ و $0.100 \leq 0.100 \leq 0.33$
14. اگر (مرطوب و خیلی اشباع و خشک و خیلی سبک و صاف)، احتمال مه زیاد
 $0.72 \leq 0.50 \leq 0.33$ و $0.60 \leq 0.100 \leq 0.33$
15. اگر (مرطوب و خیلی اشباع و اشباع و مناسب و صاف)، احتمال مه خیلی زیاد
 $0.72 \leq 0.50 \leq 0.100$ و $0.100 \leq 0.100 \leq 0.50$
16. اگر (مرطوب و خیلی اشباع و اشباع و خیلی سبک و صاف)، احتمال مه خیلی زیاد
 $0.72 \leq 0.50 \leq 0.100$ و $0.60 \leq 0.100 \leq 0.50$

نتایج حاصله از این مرحله در جدول 15-2 خلاصه شده است. از مجموع 16 قانون موجود، دو قانون دارای احتمال کم، پنج قانون دارای احتمال متوسط، چهار قانون دارای احتمال زیاد و پنج قانون دارای احتمال خیلی زیاد در تشکیل مه هستند.

جدول 15-2: قدرت تعیین شده برحسب خروجیهای هر قانون با توجه به داده‌ها

شماره قانون	قدرت (درصد)	خروجی قانون	شماره قانون	قدرت (درصد)	خروجی قانون
1	33	کم	9	33	متوسط
2	33	کم	10	33	متوسط
3	48	زیاد	11	66	خیلی زیاد
4	48	متوسط	12	60	خیلی زیاد
5	33	متوسط	13	33	زیاد
6	33	متوسط	14	33	زیاد
7	48	خیلی زیاد	15	50	خیلی زیاد
8	48	زیاد	16	50	خیلی زیاد

قدم بعدی، تعیین خروجی سیستم یا به عبارت دیگر، تعیین احتمال تشکیل مه از روی قوانین اعمال شده می‌باشد. برای این کار مراحل زیر را انجام می‌دهیم:

الف) ابتدا تمام قوانینی که مثلاً نتیجه "متوسط" دارند را می‌یابیم و قدرت آن قوانین را در کنار هم لیست می‌کنیم.

ب) عدد ماکزیمم قدرتهای بخش الف را با استفاده از اصل گسترش می‌یابیم.

پ) به عنوان خروجی "متوسط"، مقدار عضویت یافته شده در بخش ب را قرار می‌دهیم.

ت) مراحل فوق را برای "زیاد"، "کم"، "خیلی زیاد" و "خیلی کم" تکرار می‌کنیم.

پس از انجام موارد فوق، مقادیر مربوط به درصد احتمال وقوع مه که در خروجی سیستم مشاهده شدند، به دست می‌آید. جدول 15-3 این مقادیر را نمایش می‌دهد.

جدول 15-3: درصد احتمال وقوع مه برای هر کدام از مجموعه‌های فازی خروجی

خیلی زیاد	زیاد	متوسط	کم	خیلی کم
66	48	48	33	0

تاکنون توانستیم با توجه به ورودیهای داده شده، میزان عضویت خروجی نظیر هر یک را بیابیم. حال هرکدام از ارقام به‌دست آمده را با نمودار خروجی مربوطه تلاقی می‌دهیم تا سطح دوزنقه شکلی پدید بیاید. می‌توانیم این خروجی را با محاسبه مساحت هر منطقه به عددی قطعی تبدیل نماییم. جدول 4-15 مقادیر به‌دست‌آمده را نشان می‌دهد.

جدول 4-15: مرکز ثقل و وزن مساحت‌های مربوط به مجموعه‌های فازی

خروجی فازی	خیلی کم	کم	متوسط	زیاد	خیلی زیاد
مرکز ثقل	15	30	50	70	85
مساحت	0	825	1536	1056	1254

مقدار مساحت خروجی به وسیله فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$\frac{\sum_{i=1}^5 ((center\ of\ gravity)_i \times (area)_i)}{\sum_{i=1}^5 (area)_i}$$

طبق این فرمول، خروجی قطعی برای داده‌های مسئله (درصد احتمال وجود مه در

شش ساعت آینده) برابر است با:

$$\frac{(15 \times 0) + (30 \times 825) + (50 \times 1536) + (70 \times 1056) + (85 \times 1254)}{825 + 1536 + 1056 + 1254} = 60.38$$

15-4: سایر کاربردها و نتیجه‌گیری

همان‌طور که پیشتر نیز گفته شد، به عنوان راه‌حلی موثرتر برای پیش‌بینی مه با روش فازی، می‌توان پارامترهای هواشناسی بیشتری را در نظر گرفت. همچنین می‌توان پیش‌بینی را برای بازه زمانی طولانی‌تری (بیشتر از 6 ساعت) انجام داد یا از توابعی موسوم به forget function استفاده کرد تا تاثیر مقدار پارامترها در ساعت‌های مختلف، متفاوت باشد.

در یک سیستم پیشنهادی برای پیش‌بینی وضع آب‌وهوا به کمک متدولوژی CBR¹، از نه پارامتر مختلف در هواشناسی مانند دما، جهت باد، سرعت باد، فشار هوا، تراکم ابر، ... استفاده شده است. سپس یک معیار شباهت فازی برای سیستم تعریف می‌شود.

داده‌های جمع‌آوری‌شده، داده‌های سالهای متوالی یک منطقه خاص می‌باشد که در بازه‌های زمانی متفاوت (دوره 8 ساله، 16 ساله و 32 ساله) بررسی می‌شوند. سیستم مورد استفاده برای تصمیم‌گیری، دارای انعطاف‌پذیری بالایی است که در زمینه پیش‌بینی‌های متفاوتی به کار گرفته می‌شود.

سیستم‌های فازی برای موقعیتهای بسیار متنوعی طراحی می‌شوند. ازجمله این مسائل می‌توان به بررسی نحوه تشکیل یا ناپدیدشدن ابرهای نزدیک به زمین (استراتوس)، تشکیل طوفان تندری، بوران برف، بادهای موسمی مناطق استوایی و نیز تشکیل کریستالهای یخی اشاره کرد.

در این فصل، استفاده عملیاتی از منطق فازی در هواشناسی شرح داده شد. با توجه به مشاهدات انجام شده، می‌توان گفت که تجربه طراح سیستم، نقش بسیار مهمی در ساختن توابع عضویت مناسب و پایگاه قوانین کارآمد دارد. می‌توان از داده‌های گذشته مربوط به زمانهای وقوع مه استفاده نمود و محدوده داده‌ها و پارامترها را برای داشتن مناسب‌ترین مجموعه‌های فازی تعیین کرد.

شکل توابع عضویت بر راه‌حل مسئله تاثیر زیادی دارد. توابع عضویت ورودی که دارای محدوده وسیعی از میزان عضویت 100٪ باشند، وزن زیادی را در مرحله محاسبه قدرت قوانین اعمال می‌کنند. توابع خروجی خیلی باریک، راه‌حل را به دامنه محدودتری نگاشت می‌دهند ولی وزن داده‌شده با توجه به مساحت آن قسمت، مقدار اندکی خواهد بود.

¹ Case Based Reasoning (CBR)