

# فصل اول

## مقدمه‌ای بر منطق فازی و محاسبات نرم

### مقدمه

محاسبات نرم روشی ابتکاری در راستای ایجاد سیستم‌های هوشمند است که امروزه به شدت مورد توجه مجامع علمی قرار گرفته است. همان‌طور که می‌دانیم حل مسائل پیچیده‌ی دنیای واقعی نیازمند بکارگیری سیستم‌های هوشمند است. این دسته از سیستم‌ها ترکیبی از دانش، تکنیک و روش‌شناسی مختلف می‌باشند. انتظار ما از این سیستم‌ها این است که دارای توانایی مناسبی جهت کسب یک تخصص خاص در دامنه‌ی مشخصی بوده، خودشان را با محیط تطبیق داده و یاد بگیرند چطور با تغییرات محیط سازگار شوند و در نهایت در تقابل با محیط اطراف تصمیم خاصی را اتخاذ کرده و عمل مشخصی را انجام دهند. در مواجهه با مسائل محاسباتی دنیای واقعی، عموماً استفاده‌ی ترکیبی از روش‌های محاسباتی نسبت به استفاده‌ی انحصاری از تک‌تک آنها دارای عملکرد بهتری می‌باشد. این واقعیت منجر به ایجاد چنین سیستم‌هایی در قالب محاسبات عصبی-فازی<sup>۱</sup> شده است. در این سیستم‌ها از شبکه‌های عصبی برای تشخیص الگوها و انطباق بر تغییرات محیط اطراف استفاده می‌شود. در کنار این سیستم عصبی از سیستم‌های استنتاج فازی برای توصیف نظام‌مند دانش انسان و انجام استنتاج و اتخاذ یک تصمیم مناسب استفاده می‌گردد. ترکیب دو روش یاد شده با تکنیک‌های بهینه‌سازی بدون مشتق‌گیری منجر به روشی جدید تحت عنوان عصبی-فازی و محاسبات نرم می‌شود.

در ادامه به عنوان پیش‌درآمد نگاهی مختصر به انواع روش‌های هوشمند و تاریخچه‌ی آنها خواهیم داشت و در مورد ویژگی‌های سیستم‌های عصبی-فازی و محاسبات نرم بحث خواهیم کرد.

## اجزای محاسبات نرم و هوش مصنوعی سنتی

محاسبات نرم یک روش جدید محاسباتی است که توانایی‌های شاخص ذهن انسان را برای استدلال و فراگیری در یک محیط نامعین و نادقیق گرد هم می‌آورد. (پروفسور لطفی‌زاده 1992).

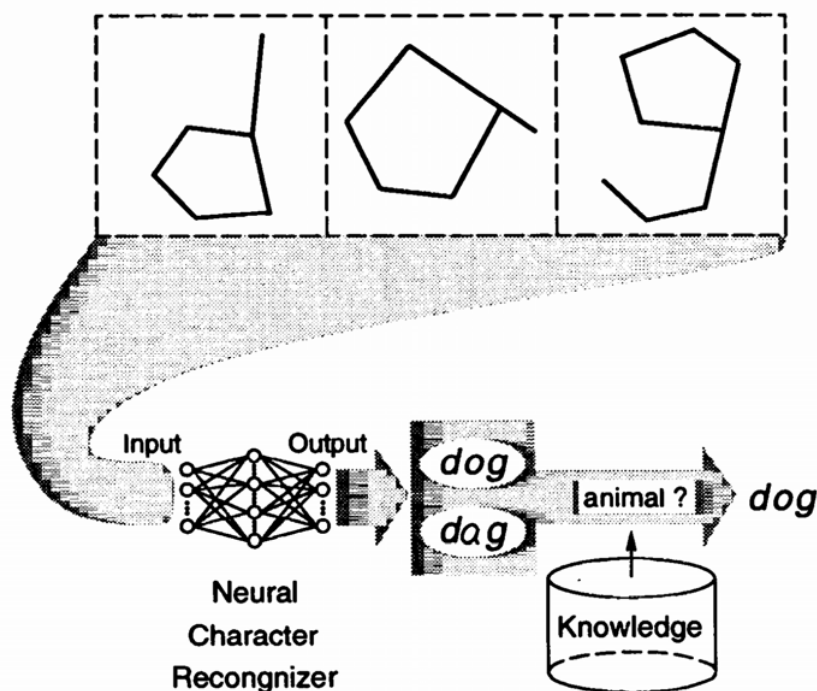
محاسبات نرم از اجزای محاسباتی مختلفی مثل شبکه‌های عصبی<sup>۱</sup>، تئوری مجموعه‌های فازی<sup>۲</sup>، استدلال تقریبی<sup>۳</sup> و روش‌های بهینه‌سازی بدون مشتق‌گیری مثل الگوریتم‌های ژنتیک<sup>۴</sup> و شبیه‌سازی گرم و سرد کردن<sup>۵</sup> تشکیل می‌شود. هر یک از روش‌های یاد شده دارای نقاط قوت مختص به خود می‌باشد که این نقاط قوت در جدول زیر نشان داده شده‌اند. ترکیب روش‌های یاد شده، هسته اصلی محاسبات نرم را تشکیل می‌دهد. این همکاری، محاسبات نرم را قادر به گردآوری دانش انسان به شکل مؤثر در تقابل با مسائل و محیط‌های نادقیق و نامعین می‌سازد. به این ترتیب امکان فراگیری و سازگاری با محیط‌های ناشناخته و متغیر با کارایی بالاتری فراهم می‌شود. محاسبات نرم برای یادگیری و انطباق به محاسبات زیادی نیاز دارد. در واقع از این جهت محاسبات نرم دارای ویژگی‌های مشابهی با هوش محاسباتی می‌باشد.

جدول ۱-۱: نقاط قوت روش‌های مختلف

| نقطه‌ی قوت                                     | روش   |
|--|---|
| قابلیت یادگیری و انطباق                        | شبکه‌های عصبی                                 |
| امکان ارائه اطلاعات در قالب قواعد فازی if-then | تئوری مجموعه‌های فازی                         |
| امکان یک جستجوی تصادفی نظام‌مند                | الگوریتم‌های ژنتیک و شبیه‌سازی گرم و سرد کردن |
| انجام عملیات به صورت نمادین                    | هوش مصنوعی سنتی                               |

1. Neural Networks
2. Fuzzy Set Theory
3. Approximate Reasoning
4. Genetic Algorithms
5. Simulated Annealing

عموماً در محاسبات نرم، عملیات به صورت نمادین انجام نمی‌شوند؛ بنابراین می‌توان آن را مکمل روش‌های هوش مصنوعی سنتی دانست. به عنوان مثال، شکل ۱-۱ نحوه‌ی استفاده از یک تشخیص‌دهنده‌ی کاراکتر عصبی در کنار یک پایگاه دانش را جهت تشخیص معنای یک دست‌نوشته نشان می‌دهد. همان‌طور که می‌بینید، تشخیص‌دهنده‌ی عصبی دو پاسخ "dog" و "dag" را یافته است. در این حالت اگر پایگاه دانش یک‌سری اطلاعات مکمل و اضافی در اختیار ما قرار دهد، آن گاه سیستم می‌تواند در مورد پاسخ نهایی تصمیم‌گیری کند. مثلاً اگر مطابق پایگاه دانش، این دست‌نوشته مربوط به نام یک حیوان باشد، آنگاه قطعاً پاسخ صحیح "dog" خواهد بود.



شکل ۱-۱: استفاده از شبکه‌ی عصبی در کنار یک پایگاه دانش برای تشخیص یک دست‌نوشته

در شکل ۱-۲ لیستی از روش‌های هوش مصنوعی سنتی و معادل آنها در محاسبات نرم با گذشت زمان آمده است. در ادامه در مورد ویژگی‌های هوش مصنوعی سنتی و محاسبات نرم صحبت خواهیم کرد.

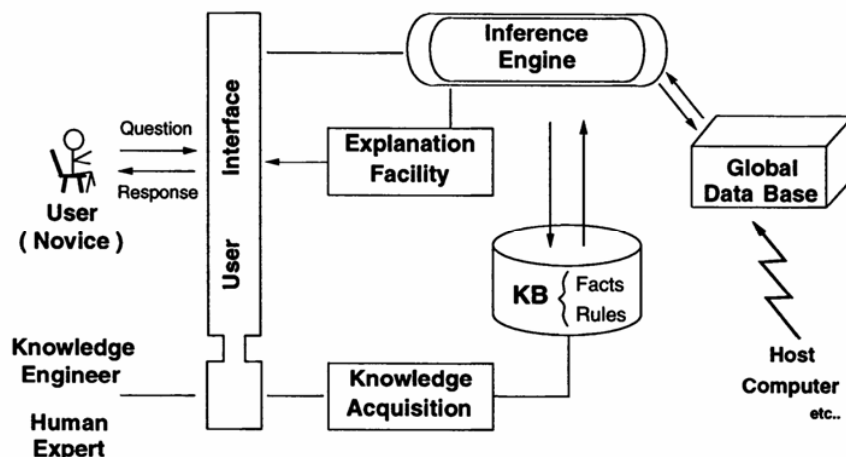
|       |   |  |   |  |
|-------|---|--|---|--|
| 1940s | 1947 Cybernetics  | 1943 McCulloch-Pitts neuron model  |   |  |
| 1950s | 1956 Artificial Intelligence                              | 1957 Perceptron  |   |  |
| 1960s | 1960 Lisp language  | 1960s Adaline<br>Madaline  | 1965 Fuzzy sets   |  |
| 1970s | mid- 1970s<br>Knowledge Engineering<br>( expert systems ) | 1974 Birth of Back-propagation algorithm<br>1975 Cognitron<br>Neocognitron                                     | 1974 Fuzzy controller                                   | 1970s Genetic algorithm                          |
| 1980s |   | 1980 Self-organizing map<br>1982 Hopfield Net<br>1983 Boltzmann machine<br>1986 Backpropagation algorithm boom | 1985 Fuzzy modeling ( TSK model )                       | mid- 1980s<br>Artificial life<br>Immune modeling |
| 1990s |   |  | 1990s Neuro-fuzzy modeling<br>1991 ANFIS<br>1994 CANFIS | 1990 Genetic programming                         |

شکل ۱-۲: تاریخچه‌ی روش‌های مختلف محاسبات نرم و هوش مصنوعی سنتی

## از هوش مصنوعی سنتی تا هوش محاسباتی

انسان‌ها از زبان طبیعی خود برای استدلال و نتیجه‌گیری استفاده می‌کنند. هوش مصنوعی سنتی، سعی در تقلید از رفتارهای هوشمندانه انسان از طریق توصیف آنها در قالب قواعد نمادین دارد. در هوش مصنوعی از نمادها با این فرض که آنها در قالب پایگاه‌های دانش نمادین قابل ذخیره‌سازی هستند، استفاده می‌شود. سیستم‌های نمادین در صورت وجود دانش ضمنی لازم، قادر به مدل‌سازی تخصص انسان برای حل دسته‌ی خاصی از مسائل می‌باشند. شاید موفق‌ترین محصول نگرش سنتی، سیستم‌های

دانش مبنا<sup>۱</sup> و یا سیستم‌های خبره<sup>۲</sup> (ES) باشند. شمایی از این دسته از سیستم‌ها در شکل ۱-۳ نشان داده شده است.



شکل ۱-۳: نمونه‌ای از یک سیستم خبره

ادبیات هوش مصنوعی سنتی، منعکس‌کننده‌ی فعالیت‌های پیشین در زمینه‌ی سیستم‌های هوشمند می‌باشد. برخی از تعاریف هوش مصنوعی<sup>۳</sup> (AI) به همراه دو تعریف از ES در ادامه آمده است.

- AI، علم مطالعه‌ی عامل‌های درک‌کننده و عمل‌کننده در یک محیط می‌باشد (اس. راسل و پی. نورویگ<sup>۴</sup>).
- AI، هنر ساخت کامپیوترهایی است که به‌صورت هوشمند عمل می‌کنند، (والدروپ<sup>۵</sup>).
- AI، یک روش برنامه‌نویسی است که در آن برنامه‌ها با توجه به قواعد بر روی داده‌ها عمل کرده و رسیدن به یک هدف خاص را میسر می‌سازند (دبلیو.ای. تیلور<sup>۶</sup>).
- AI، روشی است برای ساخت ماشین‌های کامپیوتری با توانایی نمایش رفتارهای هوشمند، مشابه با آنچه در مورد انسان مشاهده می‌شود (آر. مک لئود<sup>۷</sup>).

---

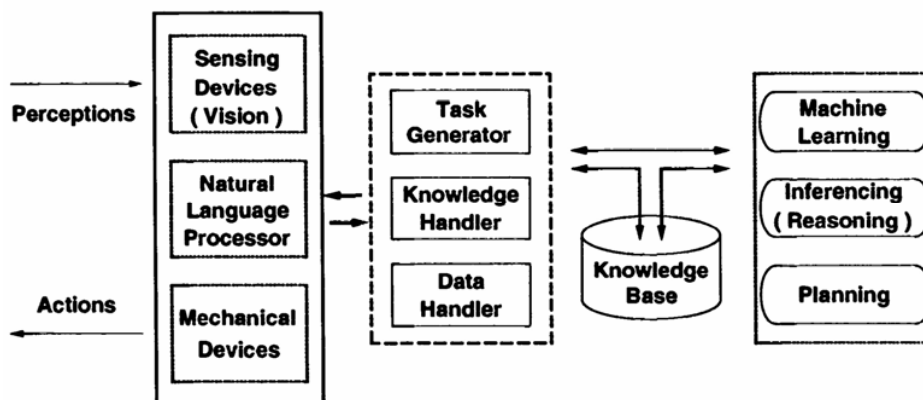
1. Knowledge-Based Systems  
 2. Expert Systems  
 3. Artificial Intelligence  
 4. S. Russell and P. Norvig  
 5. Waldrop  
 6. W. A. Taylor  
 7. R. McLeod

- ES، یک برنامه‌ی کامپیوتری است که با استفاده از دانش تخصصی، سعی در دستیابی به سطوح بالای کارایی در حل مسایل دارد (دی. ای. واترمن<sup>۱</sup>).
  - ES، یک کاریکاتور از یک انسان متخصص است، به این خاطر که آن تقریباً همه چیز را در مورد هیچ چیز می‌داند (ای. آر. میرزایی<sup>۲</sup>).
- تعاریف یاد شده، یک چهارچوب کلی برای AI فراهم آورده‌اند. البته آنها بسیار زودگذر و فانی به نظر می‌رسند؛ زیرا این چهارچوب مفهومی به سرعت در حال دگرگونی می‌باشد. در اینجا این سؤال در ذهن خواننده متبادر می‌شود که "آیا تاکنون AI منسوخ شده است؟"
- در نظر گرفتن محاسبات نرم به عنوان جزء اصلی AI مدرن، تا حد زیادی وابسته به قضاوت شخصی هر فرد می‌باشد. امروزه تعداد کتاب‌های زیادی مباحث مربوط به AI مدرن، شبکه‌های عصبی و سایر اجزای محاسبات نرم را در برمی‌گیرند. این امر نشان می‌دهد که زمینه‌ی علمی AI کماکان در حال گسترش می‌باشد و مرز بین AI و محاسبات نرم، غیرقابل تشخیص بوده و به طور مشخص نسل‌های بعدی روش‌های AI بسیار پیچیده‌تر خواهند بود. بحث بیشتر در مورد قلمروهای فلسفی AI خارج از بحث ما در این کتاب می‌باشد.
- اجرای عملیات‌های نمادین، محدوده‌ی عملیاتی تئوری‌های AI سنتی را محدود می‌کنند؛ زیرا در این روش‌ها دریافت و نمایش دانش بسیار دشوار می‌باشد. به همین دلیل توجه بیشتری معطوف به روش‌های الهام گرفته شده از طبیعت مدلسازی مغز و الگوریتم‌های تکاملی شده است. این روش‌ها سازوکار زیستی تولید هوش طبیعی را شبیه‌سازی می‌کنند. این اسلوب‌ها متعامد بر روش‌های AI سنتی عمل کرده و عموماً نقایص نمادسازی در AI را جبران می‌کنند.
- هدف بلند مدت تحقیقات در AI، ایجاد و شناخت هوش ماشین است و این هدف نهایی با روش‌های محاسبات نرم مشترک است. شکل ۴-۱ شمایی از یک سیستم هوشمند را نشان می‌دهد که توانایی درک محیط اطراف و عمل بر مبنای این ادراک را دارد. به آسانی می‌توان با بسط ES به سیستم هوشمند محاسباتی به ایده‌آل محققان محاسبات نرم دست یافت. می‌توان گفت محاسبات نرم به طور مشخص تحت تأثیر AI نمو پیدا می‌کند.

---

1. D. A. Waterman

2. A. R. Mirzai



شکل ۴-۱: یک سیستم هوشمند

## شبکه‌های عصبی

مغز انسان منبع هوش طبیعی و یک کامپیوتر موازی خارق‌العاده می‌باشد. مغز، اطلاعات خام را از طریق ادراک محیط اطراف دریافت و با سرعت بسیار بالا پردازش می‌کند. سلول‌های عصبی  $10^6$  مرتبه کندتر از مدارهای الکترونیکی عمل می‌کنند، اما همان‌طور که می‌دانیم مغز انسان اطلاعات سمعی و بصری را بسیار سریع‌تر از کامپیوترهای مدرن امروزی پردازش می‌کند.

محققان و بخصوص مدل‌کنندگان مغز، با الهام از سیستم‌های عصبی زیستی، شبکه‌های عصبی مصنوعی را ابداع نمودند. می‌توان شبکه‌های عصبی را یک روش غیرالگوریتمی نو برای پردازش اطلاعات دانست. آنها مغز را در قالب یک سیستم غیرخطی پیوسته روی محور زمان و با یک معماری اتصالی مدل می‌کنند و انتظار می‌رود تا قادر به تقلید از سازوکار مغز برای شبیه‌سازی رفتار هوشمندانه باشند. اتصالات یاد شده جایگزین ساختارهای نمادین شده‌اند. این اتصالات شامل وزن‌های اتصالی بین هر دو نورون می‌باشند. در این ساختار هیچ نیازی به تصمیم‌گیری در مورد نحوه جریان داده‌ها وجود ندارد. نمونه‌های مختلفی از روش‌های اتصال بین اجزای شبکه‌های عصبی و نحوه یادگیری آنها وجود دارند که هر یک از آنها دارای ظرفیت‌های یادگیری متنوعی می‌باشند.

## تئوری مجموعه‌های فازی

مغز انسان اطلاعات غیردقیق و ناکامل فراهم آمده از طریق اندام‌های حسی را تفسیر می‌کند. تئوری مجموعه‌های فازی، یک روش نظام‌مند محاسباتی برای بحث در مورد اطلاعات زبان‌شناختی<sup>۱</sup> فراهم می‌آورد. این تئوری بر مبنای محاسبات عددی بر روی مقادیر تولید شده توسط تابع عضویت برای هر یک از متغیرهای زبان‌شناختی عمل می‌نماید. علاوه بر آن، انتخاب قواعد if-then فازی، جزء اصلی سیستم استنتاج فازی<sup>۲</sup> (FIS) را تشکیل می‌دهد. به کمک این قواعد، می‌توان به شکل مؤثری تخصص یک انسان را در یک زمینه‌ی خاص مدل نمود.

اگر چه سیستم استنتاج فازی یک ارائه ساخت یافته از دانش در قالب قواعد if-then می‌باشد، اما در سازگاری با محیط‌های در حال تغییر با مشکل مواجه است. بنابراین عموماً از مفاهیم یادگیری شبکه‌های عصبی در سیستم‌های استنتاج فازی استفاده شده و حاصل کار، تحت عنوان مدل‌سازی عصبی شناخته می‌شود که یک تکنیک محوری در محاسبات نرم است.

در مورد مجموعه‌های فازی، قواعد فازی و سیستم‌های استنتاج فازی طی فصل‌های آتی این کتاب بحث خواهیم نمود.

## محاسبات تکاملی<sup>۳</sup>

هوش طبیعی، محصول میلیون‌ها سال تکامل زیستی است. شبیه‌سازی فرایندهای پیچیده‌ی تکاملی زیستی ما را به سمت کشف نحوه‌ی تأثیر روند تکامل بر هوش سطح بالای سیستم‌های زنده سوق می‌دهد. بنابراین، توجه ویژه‌ای به تکنیک‌های محاسباتی تکاملی نظیر الگوریتم‌های ژنتیک<sup>۴</sup> (GA) می‌شود. الگوریتم‌های ژنتیک بر مبنای اصول تکاملی و انتخاب طبیعی<sup>۵</sup> می‌باشند. مدل‌سازی ایمنی<sup>۶</sup> و زندگی مصنوعی<sup>۷</sup> نیز روش‌های مشابهی هستند که بر مبنای این فرض که قوانین شیمیایی و فیزیکی قادر به توصیف هوش زنده هستند، بنا شده‌اند. بخصوص زندگی مصنوعی که تلاش در تشخیص رفتارهای واقعی از طریق تقلید فرایندهای مکانیکی زندگی دارد.

- 
1. Linguistic Information
  2. Fuzzy Inference Systems
  3. Evolutionary Computation
  4. Genetic Algorithm
  5. Natural Selection.
  6. Immune Modeling
  7. Artificial Life

تکنیک‌های جستجوی آگاهانه‌ی اکتشافی<sup>۱</sup> در بسیاری از کاربردهای هوش مصنوعی مورد استفاده قرار می‌گیرند. زمانی که فضای جستجو بسیار بزرگ بوده و تعریف دانش در راستای کاهش فضای جستجو بسیار مشکل باشد، انتخابی به جز استفاده از روش‌های کارآمد جستجو برای یافتن راه‌حل بهینه، وجود نخواهد داشت. GA یک گزینه‌ی برجسته برای این مقاصد می‌باشد. این روش، فضای را برای استفاده از جستجوی تصادفی نظام‌مند و جمعیت‌مبنا فراهم می‌آورد. شبیه‌سازی سرد و گرم کردن و جستجوی تصادفی، گزینه‌های دیگری برای اکتشاف در فضای جستجو با رفتاری تصادفی هستند.

## ویژگی‌های محاسبات نرم و روش‌های عصبی-فازی

با در نظر گرفتن مدل‌سازی عصبی-فازی به عنوان شالوده‌ی محاسبات نرم، می‌توان ویژگی‌های این شاخه‌ی علمی را به‌صورت زیر برشمرد:

- **استفاده از تخصص انسان:** محاسبات نرم از تخصص انسان در راستای ایجاد قواعد if-then در راستای حل مسائل واقعی استفاده می‌کند.
- **مدل‌های محاسباتی الهام گرفته از طبیعت:** شبکه‌های عصبی مصنوعی با الهام از شبکه‌های عصبی زیستی به‌صورت گسترده‌ای در محاسبات نرم در راستای ادراک، تشخیص الگو، رگرسیون غیرخطی و حل مسائل طبقه‌بندی مورد استفاده قرار می‌گیرند.
- **تکنیک‌های بهینه‌سازی جدید:** محاسبات نرم از روش‌های بهینه‌سازی ابتکاری استفاده می‌نماید. از جمله‌ی این روش‌ها، می‌توان به الگوریتم‌های ژنتیک (الهام گرفته شده از تکامل و انتخاب طبیعی)، شبیه‌سازی گرم و سرد کردن (برگرفته از ترمودینامیک) و روش‌های جستجوی تصادفی یاد نمود. این روش‌های بهینه‌سازی نیازی به محاسبه‌ی بردار گرادیان در ارتباط با تابع هدف نداشته و بنابراین از انعطاف‌پذیری بالاتری نسبت به روش‌های بهینه‌سازی پیچیده برخوردار هستند.
- **محاسبات عددی:** برخلاف AI نمادین، محاسبات نرم عمدتاً بر محاسبات عددی تکیه دارد. ترکیب تکنیک‌های نمادین در محاسبات نرم، یک حوزه‌ی تحقیقاتی فعال در این زمینه فراهم آورده است.
- **دامنه‌ی کاربردهای نو:** محاسبات نرم به جهت استفاده از محاسبات عددی، دامنه‌ی کاربردهای جدیدی در کنار روش‌های AI پیدا کرده است. از جمله‌ی این کاربردها می‌توان به پردازش

سیگنال‌ها به صورت انطباقی<sup>۱</sup>، کنترل انطباقی<sup>۲</sup>، تشخیص سیستم‌های غیرخطی<sup>۳</sup>، رگرسیون غیرخطی<sup>۴</sup> و تشخیص الگوها<sup>۵</sup> اشاره نمود.

- **یادگیری بدون مدل:** شبکه‌های عصبی و سیستم‌های استنتاج فازی انطباقی، تنها با استفاده از داده‌های نمونه از سیستم هدف، قادر به ساخت مدل‌ها می‌باشند. در این موارد، دانستن جزئیات سیستم‌های هدف، به ساخت ساختار مدل اولیه کمک می‌کند، اما دانستن این جزئیات اجباری نیست.
- **محاسبات متمرکز:** با فرض در اختیار نداشتن اطلاعات کافی در ارتباط با مسئله‌ی پیش‌رو روش‌های عصبی-فازی و محاسبات نرم، بر پایه‌ی محاسبات سریع برای یافتن قواعد و یا نظم در مجموعه داده‌ها استوار هستند. این امر یک ویژگی معمول در مورد روش‌های هوش محاسباتی می‌باشد.
- **تحمل خطا:** شبکه‌های عصبی و سیستم‌های استنتاج فازی دارای تحمل خطا می‌باشند. در واقع حذف یک نورون از شبکه‌های عصبی یا یک قاعده در یک سیستم استنتاج فازی، لزوماً منجر به تخریب سیستم نمی‌شود، بلکه سیستم به جهت ماهیت موازی و معماری خاص، به کار خود ادامه می‌دهد. البته کیفیت کارآیی به تدریج کاهش می‌یابد.
- **عملکرد هدف مینا:** روش‌های عصبی-فازی و محاسبات نرم هدف مینا هستند. به این معنی که مسیر حرکت از حالت فعلی به راه‌حل تا زمانی که به سمت هدف حرکت می‌کنیم، اهمیتی ندارد. این امر بخصوص در مواردی که از روش‌های بهینه‌سازی بدون مشتق استفاده می‌شود، نمود پیدا می‌کند. البته دانش سیستم از فضای جستجو، مقدار محاسبات و زمان جستجو را کاهش می‌دهد، اما وجود این دانش الزامی نیست.
- **کاربرد در دنیای واقعی:** اکثر مسائل دنیای واقعی دارای مقیاس بزرگی بوده و به شکل اجتناب‌ناپذیری دارای پارامترهای نامعین داخلی می‌باشند. این امر، استفاده از روش‌های سنتی را ناممکن می‌سازد؛ زیرا این روش‌ها نیازمند جزئیات در مورد مسئله پیش‌رو می‌باشند. محاسبات نرم روشی یک‌پارچه است که از تکنیک‌های خاصی برای حل مسائل دنیای واقعی بهره می‌گیرد.

---

1. Adaptive Signal Processing  
 2. Adaptive Control  
 3. Nonlinear System Identification  
 4. Nonlinear Regression  
 5. Patterns Recognition  
 6. Goal Driven

شاخه‌ی علمی محاسبات نرم به سرعت در حال رشد است و همه روزه تکنیک‌ها و کاربردهای جدیدی در این زمینه پیشنهاد می‌شود. همان‌طور که می‌بینیم، امروزه محاسبات نرم به جهت تلاش محققان علوم مختلف دارای زیربنای محکمی شده است. نیروی محرک همه‌ی این تلاش‌ها، انگیزه‌ی ساخت ماشین‌های هوشمند خودکار، در راستای فراهم آوردن زندگی بهتر برای بشر می‌باشد.