مرغ یا تخم‌مرغ؟

امیرکسری جلال‌دوست*

۱. مقدمه

در این یادداشت کوتاه قصد دارم به معرفی موضوع مورد مطالعه‌ی خودم در سال اخیر بپردازم. علّیت[۱] از اساسی‌ترین موضوعات مورد توجه بشر حین مشاهده‌ی طبیعت بوده است. در طول تاریخ پدران ما شاهد وقایع و پدیده‌های بسیاری بوده‌اند که سؤال در مورد منشأ و علّت آن‌ها زمینه‌ساز پیشرفت دانش بشر و رد یا تأیید فرضیه‌ها بوده است. در بخش ۲ از اهمیت بررسی رابطه‌ی علّت و معلولی بین پدیده‌ها خواهیم گفت و با اشاره به مثال‌های واقعی نشان می‌دهیم که چگونه توجه نکردن به علّیت می‌تواند به تحلیل‌های اشتباه و بعضاً خنده‌داری منجر شود. در بخش ۳ کمی از تاریخ می‌گوییم و به کارهای انجام‌شده و نگرش‌های متنوعی که به این مسئله پرداخته‌اند اشاره‌ی کوتاهی خواهیم داشت. در بخش ۴ صحبت را با بررسی ظریف‌تر یک ابرچارچوب[۲] مدل‌سازی برای علّیت که توسط جودیا پرل[۳] بنیان‌گذاری شد، ادامه می‌دهیم. نهایتاً در بخش ۵ با معرفی یک مدل معروف و روش استنتاج تحت این مدل، صحبت را به پایان می‌بریم و در بخش ۶ برای جمع‌بندی به عناوین تعدادی از صورت‌بندی‌های رایج در مسائل استنتاج علّی می‌پردازیم. موضوع علّیت سابق بر این چارچوب در فلسفه، فیزیک و علوم اقتصادی مورد مطالعه بوده است و در هر یک از این علوم، ادبیات غنی خود را داشته است. تمرکز من در این نوشته روی کارهای مبتنی بر ابرچارچوب پرل خواهد بود، که اگر بخواهیم آن را در طبقه‌بندی سنتی علوم بیاوریم در جایی بین آمار و نظریه‌ی گراف قرار خواهد گرفت.

۲. مرز بین علم و خرافه

«افزایش مصرف بستنی در شهرهای ساحلی باعث افزایش حمله‌ی کوسه‌ها به انسان‌ها می‌شود.»

این شاید یک شروع هیجان‌انگیز برای مبحث علّیت در درس اقتصادسنجی باشد. احتمالاً تا الان متوجه لغزش این استدلال شده‌اید؛ همبستگی علّیت را نتیجه نمی‌دهد. اگر بشر به همین واقعیت ساده ایمان داشت، امروز پس از ۶۰۰۰ سال تمدن، موجودی به اسم «خرافه» زنده نمانده بود اما مشاهده می‌کنیم که بخش بسیار زیادی از زندگی ما انسان‌ها آمیخته با میل به ارائه‌ی تعابیر علّی است و مدام در لغزشگاه ساختن خرافه قرار می‌گیریم. اتفاقاً هنوز هم از ساختن تعابیر علّی مبتنی بر همبستگی لذت می‌بریم؛ برای مثال، فوتبالیست ولزی، آرون رمزی[۴] قاتل سلبریتی‌ها لقب گرفته است، چرا که گاه و بی‌گاه با گلزنی این هافبک تیم آرسنال می‌شنویم که باید منتظر مرگ یک سلبریتی باشیم و هر بار هم چنین رویدادی واقعاً اتفاق می‌افتد! طلسم آرون رمزی به نظر واقعی است. من معتقدم که هیچ انسان علم‌دوستی نباید از کنار این پدیده به سادگی بگذرد. به نقل از یک منبع معتبر[۵] فراوانی انسان‌های مشهور در جامعه بین $\frac{۱}{۲۰۰۰}$ و $\frac{۱}{۱۰۰۰۰}$ است. بیایید تصور کنیم این نسبت برای انسان‌های بسیار مشهور حداقل $\frac{۱}{۱۰۰۰۰۰}$ باشد؛ یعنی ده برابر کوچک‌تر از عددی که گزارش شده است. این یعنی حدود هشتاد هزار انسان مشهور وجود دارند، چیزی که در نگاه اول بعید به نظر می‌رسد. اگر فرض کنیم متوسط عمر سلبریتی‌ها هشتاد سال باشد، هر سلبریتی به طور متوسط سی هزار روز عمر می‌کند. حال اگر تولد و مرگ سلبریتی‌ها را یکنواخت در زمان در نظر بگیریم (به بیان دقیق‌تر، فرض کنیم این رویداد یک فرآیند پوآسون با پارامتر مناسب باشد)، نتیجه می‌شود که هر روز به طور متوسط بسیار بیش‌تر از

[1] Causality
[2] Meta-Framework
[3] Judea Pearl
[4] Aaron Ramsey
[5] wired.com/2013/01/the-fraction-of-famous-people-in-the-world/

یک سلبریتی خواهد مرد. با این حساب به نظر می‌رسد تمامی فوتبالیست‌ها باید قاتل سلبریتی‌ها باشند؛ اگر آرون رمزی قاتل ۲۳ چهره‌ی مشهور معرفی شود، با احتمال خیلی بالا علی دایی خودمان به تنهایی ۲۴۶ چهره‌ی مشهور را راهی گورستان کرده است. در قیاس با مثال مصرف بستنی و حمله‌ی کوسه، به نظر می‌رسد لغزش متفاوتی در تعبیر علّی رخ داده است. این لغزش‌ها به طور کامل دسته‌بندی شده‌اند و ما هم در حد حوصله‌ی بحث آن‌ها را شرح خواهیم داد. فعلاً به تعدادی مثال مشهور بسنده می‌کنیم و تحلیل لغزشی را که می‌تواند رخ بدهد به مخاطب واگذار خواهیم کرد.

- کشورهایی که مصرف سرانه‌ی شکلات بالاتری دارند، در به دست آوردن جایزه‌ی نوبل موفق‌ترند.
- مردان خوش‌قیافه‌تر، بداخلاق‌ترند (نمونه‌گیری صرفاً از مردان مجرد صورت گرفته است).
- مجموعه مثال‌های مربوط به پارادوک سیمپسون؛ به‌خصوص مثال سنگ کلیه.
- با افزایش تولید محصولات ارگانیک در آمریکا، نرخ ابتلا به اوتیسم در این کشور افزایش یافته است.
- با افزایش مصرف سرانه‌ی اینترنت، ابتلا به انواع سرطان در شهر تهران افزایش یافته است.

خوشبختانه برای جلوگیری از لغزش‌های این‌چنینی در مواردی که شناخت کافی از سازوکار طبیعت نداریم، روش‌هایی برای شناخت و فرمول‌بندی روابط علّی توسعه داده شده‌اند که در ادامه به معرفی دو کار اساسی در این حوزه خواهیم پرداخت.

۳. تاریخ ادبیات

ارسطو اولین بار یک طبقه‌بندی با عنوان علل اربعه برای علّیت بیان کرد.

- علّت مادی: چیزی که از آن گرفته شده یا چیز دیگر را تشکیل می‌دهد؛ مثلاً برنز به عنوان علّت مادی یک مجسمه‌ی برنزی.
- علّت صوری: شکل، فرم و نگرش مربوط به این که چه چیزی به نمایش گذشته شده است؛ مثلاً شکل مجسمه.
- علّت فاعلی: سبب و منبع اولیه‌ی تغییر یا رهایی یعنی صنعت‌گر و مجسمه‌ساز.
- علّت غایی: فرجام و پایان به این معنا که به چه منظوری است؛ مثلاً غایت پیاده‌روی، کم کردن وزن و غایت تطهیر و مصرف دارو، سلامتی است.

چنین تعبیری از علّت برای ما غریبه است، به طور مشخص غایت یک پدیده از دیدگاه ما نمی‌تواند علّت آن تلقی شود؛ چرا که در نظر ما گذر زمان مانعی برای وجود روابط علّی در جهت خلاف زمان خواهد بود. البته چنین نگاهی توسط رایخنباخ[۱] فیلسوف آلمانی به چالش کشیده می‌شود و اصالت زمان برای تعبیر علّی زیر سؤال می‌رود. او این دست اندیشه‌ها را در کتاب جهت زمان[۲] شرح داده است. بعدها دیوید هیوم[۳] فیلسوف اسکاتلندی طبقه‌بندی ارسطو را به واسطه‌ی مفهوم خلاف‌واقع[۴] رد کرد. خلاف‌واقع یعنی بیان گزاره‌ای در پی شرطی که واقعی نیست؛ مثلاً چنین اعایی یک ادعای خلاف‌واقع است:

«اگر مهدی طارمی در آخرین لحظات بازی ایران و پرتغال از فرصت استفاده می‌کرد، ایران قهرمان جام می‌شد.»

مفهوم خلاف‌واقع به معنی نادرست و غیرصحیح نیست؛ استفاده از این شکل استدلال صحبت درباره‌ی یک پدیده است که می‌توانست اتفاق افتاده باشد و چون هیچ وقت اتفاق نیفتاده، به آن خلاف‌واقع می‌گوییم. پس از تلاش‌های فلاسفه و در اواخر قرن نوزدهم که نظم در آمار در حال شکل‌گیری بود، رویکردهای احتمالاتی به پدیده‌ی علّیت خودشان را نشان دادند. تلاش آماردان‌ها برای درک علیّت، با معرفی مفهوم «بازگشت به سمت متوسط»[۵] توسط فرانسیس گالتون آغاز شد. بعدها گالتون[۶] در این مسیر به مفهوم همبستگی[۷] رسید.

کارل پیرسون[۸]، ریاضی‌دان انگلیسی، علّیت را یک حالت خاص غیرقابل اثبات از همبستگی می‌دانست و برای اندازه‌گیری کمّی همبستگی، ضرایب همبستگی[۹] را معرفی کرد. از او نقل می‌شود که «تعبیر کردن نیرو به عنوان علّت حرکت، شبیه به تصور

---

[1] Reichenbach
[2] The Firection of Time
[3] David Hume
[4] Counter-Factual
[5] Regression to The Mean
[6] Francis Galton
[7] Correlation
[8] Karl Pearson
[9] Correlation Coefficients

وجود خدای درخت به عنوان علّت رشد است». او معتقد بود که علّیت صرفاً یک علاقه‌ی شدید[۱] در داستان عصر مدرن علم است.

بعدها بیشتر در حوزه‌ی آمار زیستی به علّیت پرداخته شد و دانشمندانی به دنبال تعابیر علّی در پدیده‌ی وراثت بودند. در همین دوران بود که رایت[۲]، آنالیز مسیر[۳] را معرفی کرد و توانست مثال‌هایی از علّیت در وراثت را با کارهای خودش تفسیر کند. آماردان بزرگ انگلیسی، رونالد فیشر[۴]، از منتقدان این دیدگاه بود و به دنبال او تقریباً تمامی آماردان‌ها متکی بر مفهوم همبستگی بودند و اصالتی برای علّیت قائل نمی‌شدند. در سال ۱۹۲۳، جرزی نیمن[۵] لهستانی مفهوم نتایج بالقوه را معرفی کرد ولی کار او تا حدود ۵۰ سال بعد مورد توجه قرار نگرفت و حتی به انگلیسی ترجمه نشد، تا اینکه در سال ۱۹۷۴، دونالد روبین[۶] مفهوم نتایج بالقوه را به عنوان زبانی برای پاسخ به سوالات علّی مطرح و اولین چارچوب کارا برای استنتاج علّی[۷] را معرفی کرد. در این ۵۰ سال بی‌توجهی به کار نیمن، آماردان‌ها تحلیل رگرسیون را بیش از پیش توسعه داده بودند و مدل‌های ساختاری معادلات[۸] را معرفی کردند که توسط اقتصاددان‌ها و دانشمندان دیگر علوم اجتماعی به طور جدی به کار گرفته شد و توسعه یافت، اما معمولاً از این مدل‌ها تعبیر علّی صورت نمی‌گرفت و تقدس فیشر باعث شد نگاه علّی هم شبیه به رویکرد بیزی برای مدت زیادی به تعویق بیفتد. فعالیت‌های جودیا پرل در حوزه‌ی شبکه‌های بیزی و استنتاج گرافی با طراحی یک ابرچارچوب برای مدل‌سازی روابط علّی همراه شد و او فصل جدیدی را در تحقیقات این حوزه آغاز کرد. در ادامه به دو کار اساسی روبین و پرل می‌پردازیم.

۴. مدل علّی روبین

از آن‌جایی که کار نیمن هم بسیار نزدیک به مدل روبین بود و اساس مدل الهام‌گرفته از مفهوم نتایج بالقوه بود، به این مدل عنوان نیمن-روبین را هم اتلاق می‌کنند. مفهوم نتایج بالقوه مبتنی بر شرط‌های خلاف‌واقع مطرح شد؛ باز هم صحبت از یک خروجی است که اتفاق نیفتاده است و می‌توانست اتفاق بیفتد؛ به عنوان مثال بررسی تأثیر خصوصی بودن یا دولتی بودن مدرسه بر میزان درآمد یک فرد در ۴۰ سالگی مثالی از تحلیل بر مبنای نتایج بالقوه است. هر شخصی می‌تواند یا در مدرسه‌ی خصوصی تحصیل کند یا در مدرسه‌ی دولتی و هنگامی که به ۴۰ سالگی می‌رسد مقداری درآمد خواهد داشت. برای بررسی اثر تحصیل در مدرسه‌ی خصوصی یا دولتی لازم است به سؤال شرطی خلاف‌واقع‌گونه‌ای پاسخ دهیم؛ مثلاً اگر می‌دانیم شخص در مدرسه‌ی دولتی تحصیل کرده است، لازم است به این سؤال شرطی پاسخ بگوییم که اگر همین شخص در مدرسه‌ی خصوصی تحصیل کرده بود، امروز چقدر درآمد داشت؟ تفاضل این دو مقدار درآمد، «اثر علّی» نوع مدرسه بر درآمد تلقی می‌شود.

چالش اصلی همین جا خود را نشان می‌دهد. به ازای هر شخص با ویژگی‌های خاص خودش، دقیقاً یکی از نتایج بالقوه را می‌بینیم و دقیقاً یکی را ممکن نیست ببینیم که آن را خروجی بالقوه نام‌گذاری می‌کنیم و برای محاسبه‌ی آن باید به سؤال خلاف‌واقع‌گونه‌ای که ذکر شد، پاسخ بدهیم. از این مشاهده با عنوان «مسئله‌ی اساسی استنتاج علّی» یاد می‌شود.

به این ترتیب می‌توان دید که در مورد یک مشاهده نمی‌توان استنتاج علّی ارائه کرد. ولی روبین روشی را ارائه کرد که با آن می‌توان در مورد کل جامعه مقدار «اثر علّی متوسط» را تخمین زد. اثر علّی متوسط، میانگین اثر علّی روی کل جامعه است و روشی که روبین برای تخمین این مقدار ارائه کرد، امروزه نیز در آزمایش‌ها استفاده می‌شود. این روش مبتنی بر آزمایش‌های تصادفیده[۹] است.

پیش از شرح روش آزمایش‌های تصادفیده، لازم است به نکته‌ای توجه کنیم. در همان مثال مدرسه و درآمد، اگر صرفاً با مشاهده‌ی نتایجی که رخ داده است بخواهیم تعبیر علّی داشته باشیم، آنگاه لغزش‌گاه مهیبی پیش روی ما خواهد بود. با بررسی داده‌ی مشاهده‌شده (و نه حاصل آزمایش) از متغیرهای محذوف بسیاری صرف نظر خواهیم کرد؛ برای مثال بسیار معقول است که افراد از خانواده‌های ثروتمندتر تمایل بیشتری به مدارس خصوصی داشته باشند و اتفاقاً فرزندان به واسطه‌ی ثروت خانواده بتوانند کسب‌وکار پررونق‌تری ایجاد کنند و درآمد بیشتری داشته باشند. حال اگر ما عامل «واقعیت اقتصادی خانواده» را در

---

[1] Fetish
[2] Sewall Wright
[3] Path Analysis
[4] Ronald Fisher
[5] Jerzy Neyman
[6] Donald Rubin
[7] Causal Inference
[8] Structural Equation Models
[9] Randomized Controlled Trials

نظر نگیریم، دچار اشتباه می‌شویم و تمام اثر درآمدی را منسوب به نوع مدرسه خواهیم دانست. حتی با در نظر گرفتن عوامل این‌چنینی هنوز هم ممکن است عامل محذوفی از قلم بیفتد یا اصلاً در یکی از گروه‌ها نوع خاصی از نمونه را نداشته باشیم؛ مثلاً تصور کنید تمامی کارمندان دولتی باید فرزندان خود را در مدارس دولتی ثبت‌نام نمایند. به این ترتیب نمونه‌ی «فرزند با والدین کارمند دولت» را در یکی از دسته‌ها نخواهیم داشت و اگر این عامل تأثیر واقعی روی درآمد داشته باشد، دچار لغزش خواهیم شد.

لزوم اجرای آزمایش برای تعبیر علّی ضروری به نظر می‌رسد، لااقل مادامی که فرض خاصی در مورد داده نداشته باشیم. در روش آزمایش تصادفیده برای بررسی اثر علّی متوسط یک عامل، نمونه‌ای از جامعه گرفته می‌شود و به طور تصادفی و مستقل به دو گروه شاهد و تیمار تقسیم می‌شوند. برای گروه تیمار عامل مورد نظر فعال می‌شود و برای گروه شاهد این عامل غیرفعال می‌گردد. پس از مشاهده‌ی نتایج، میانگین متغیر هدف برای هر دو گروه محاسبه می‌شود و می‌توان به سادگی نشان داد که تفاضل میانگین آن‌ها تخمینی نااریب و سازگار برای اثر علّی متوسط خواهد بود؛ برای مثال در مورد تأثیر نوع مدرسه بر درآمد، یک آزمایش تصادفیده می‌تواند این‌چنین باشد که عده‌ای دانش‌آموز به طور تصادفی از جامعه نمونه گرفته شوند، سپس هر دانش‌آموز به احتمال برابر به گروه شاهد یا تیمار منسوب شود. برای مثال گروه شاهد را به مدارس دولتی می‌فرستیم و گروه تیمار را به مدارس خصوصی. حال تفاضل میانگین درآمد دو گروه وقتی به ۴۰ سالگی رسیدند، تخمین نااریبی از اثر علّی متوسط مدارس خصوصی (در قیاس با دولتی) روی میزان درآمد است. چنین آزمایشی در عمل ناکارآمد خواهد بود، لذا معمولاً در سازوکار تولید داده به دنبال تصادفیده شدن اتفاقی ورودی هستند؛ مثلاً تصور کنید که در یک شهر فقط مدرسه‌ی دولتی وجود داشته باشد و در شهر دیگر مدرسه‌ی خصوصی. حال با این فرض که دانش‌آموزان این دو شهر تفاوت خاصی ندارند و توزیع ویژگی‌های دانش‌آموزان این دو شهر نزدیک به هم است، می‌توان تصور کرد که یک آزمایش تصادفیده به طور اتفاقی صورت گرفته است و همگی دانش‌آموزان یک شهر باید به مدرسه‌ی دولتی می‌رفتند و همه‌ی دانش‌آموزان شهر دیگر به مدرسه‌ی خصوصی. اکنون با چارچوب روبین می‌توان استنتاج علّی انجام داد.

۵. مدل ساختاری علّی

با الهام از مدل‌های ساختاری معادلات، پرل یک چارچوب کلی‌تر و دقیق‌تر برای مدل‌سازی روابط علّی ایجاد کرد. قبل از معرفی این چارچوب لازم است با مدل‌های ساختاری علّی و برخی از مفاهیمی که او معرفی کرد، آشنا شوید.

مدل‌های ساختاری علّی یک پیاده‌سازی برای علّیت‌اند که مبتنی بر مدل‌های ساختاری معادلات طراحی شده‌اند. پس ابتدا لازم است مدل‌های ساختاری معادلات را بشناسیم. این مدل‌ها از تعدادی متغیر در مجموعه‌ی V و تعدادی معادله در مجموعه‌ی E تشکیل شده‌اند؛ که در سمت چپ هر معادله یک متغیر حاضر است و در سمت راست تابعی از باقی متغیرها. شرط لازم برای شکل‌گیری یک مدل ساختاری علّی این است که در این مجموعه معادلات دور وجود نداشته باشد؛ به تعبیر دقیق‌تر، اگر یک گراف جهت‌دار بسازیم و به ازای هر متغیر رأسی قرار دهیم و به ازای هر معادله، یال‌هایی از متغیرهای سمت راست معادله به متغیر سمت چپ وارد کنیم، این گراف بدون دور باشد.

یک مدل ساختاری علّی همان مدل ساختاری معادلات است با این تفاوت که مجموعه‌ای از متغیرها تحت عنوان متغیرهای مخدوش‌گر خارجی[1] در مجموعه‌ی N تعریف می‌شوند که از جنس متغیرهای تصادفی و به طور توأم مستقل هستند (به بیان دقیق توابعی هستند از فضای پیشامد به اعداد حقیقی). این متغیرهای مخدوش‌گر خارجی قابل مشاهده نیستند ولی با تأثیر بر دیگر متغیرها از طریق معادلات، تصادف را به باقی متغیرهای مدل منتقل می‌کنند و ما در استنتاج از طریق این مدل‌ها سعی داریم تصادف مشاهده‌شده در توزیع توأم متغیرهای مشاهده‌ای[2] را از طریق این متغیرهای مخدوش‌گر خارجی و روابط بین متغیرهای مدل توجیه کنیم.

پرل «نردبان علّیت[3]» را معرفی کرد. او در سه سطح انتزاعی ارتباط با علّیت را توصیف کرد.

- ائتلاف[4]

[1] Disturbance Exogenous Noises
[2] Observational
[3] Ladder of Causation
[4] Association

- مداخله[1]
- خلاف‌واقع

دو موجود با هم در ائتلاف هستند اگر مشاهده‌ی یکی بر مشاهده‌ی دیگری تأثیرگذار باشد. این تأثیر لزوماً در جهت خاصی نیست و به همین دلیل باید به تفاوت همبستگی و ائتلاف توجه کرد. می‌توان ائتلاف را حالت کلی‌تری برای عدم‌استقلال در دیدگاه احتمالاتی دانست. در دیدگاه احتمالاتی، ائتلاف با ناصفر بودن ضریب همبستگی قابل تأیید کردن است، ولی با صفر بودن ضریب همبستگی، ائتلاف قابل رد کردن نیست. هیچ تعبیر علّی را نمی‌توان از ائتلاف دو متغیر تصادفی استخراج کرد؛ چرا که ممکن است هر یک علّت دیگری باشد یا علّت مشترک محذوفی در میان باشد.

مفهوم مداخله هم اولین بار توسط پرل به طور دقیق فرمول‌بندی شد. او عمل‌گر do را برای اندازه‌ی احتمال معرفی کرد و حسابان اختصاصی آن را ذیل مدل ساختاری علّی توسعه داد. اگر بخواهیم خیلی ساده‌انگارانه آن را شرح دهیم، می‌توان عمل‌گر do را پاسخی نظری به آزمایش‌های تصادفیده در حالتی که مسلط بر پارامترهای مدل هستیم، بدانیم. در مثال دانش‌آموزان و مدرسه، اگر مکانیزم حقیقی را به صورت یک مدل ساختاری علّی در نظر بگیریم، اجرای آزمایش تصادفیده در تخصیص دانش‌آموزان به مدارس را یک عمل‌گر روی تابع اندازه‌ی احتمال تعبیر می‌کنیم که این عمل‌گر از طریق پارامترهای مدل ساختاری علّی قابل محاسبه است. اتفاقاً خود پرل سابق بر معرفی این چارچوب، چنین محاسباتی را روی شبکه‌های بیزی در زمان چندجمله‌ای محقق کرده بود که از نمونه‌های آن، الگوریتم نشر باور[2] اوست. او با تکیه بر ایده‌های استفاده‌شده در توسعه‌ی استنتاج مبتنی بر شبکه‌های بیزی، حسابان مداخله[3] را توسعه داد و جامعه‌ی علمی برای قدردانی نگاه راه‌گشایش در بیش از دو دهه، جایزه‌ی تورینگ سال ۲۰۱۱ را به او اعطا کرد.

در حقیقت اگر بتوانیم مدل خودمان را منطبق بر ابرچارچوب مورد نظر پرل پیاده‌سازی کنیم، حسابان مداخله این امکان را به ما خواهد داد که بدون اجرای آزمایش‌ها نتیجه را محاسبه کنیم؛ خواه این آزمایش تصادفیده باشد و خواه قطعی.

خلاف‌واقع‌ها هم در چارچوب پل قابل پیاده‌سازی‌اند و می‌توان آن‌ها را محاسبه کرد. اگر هر خلاف‌واقع، شرطی در مورد یک متغیر داخلی مطرح کند (که مثلاً معادل با یک تصمیم یا رویدادی تصادفی است)، پاسخ به سؤال این خلاف‌واقع (چه می‌شود اگر) با ثابت نگه داشتن مقادیر متغیرهای مخدوش‌گر خارجی و محاسبه‌ی دوباره‌ی متغیرهای مدل میسر خواهد بود. مدل‌های دیگری هم مبتنی بر حسابان مداخله توسعه یافته‌اند که مدل‌سازی‌های سری زمانی، دارای دور و بر پایه‌ی معادلات دیفرانسیل پاره‌ای از این دست‌اند. با توجه به اینکه شبکه‌های بیزی[4] هم ساختارهای احتمالاتی مبتنی بر گراف‌های جهت‌دار بدون دور هستند، شباهت‌های ساختاری و بعضاً اشتراک در مفاهیم و رفتارهای آن‌ها با مدل‌های ساختاری علّی مشاهده می‌شود. بسیاری از الگوریتم‌های شبکه‌ی بیزی به توسعه‌ی مدل‌های ساختاری علّی کمک کرده‌اند.

۶. نتیجه‌گیری

مدل‌سازی محاسباتی علّیت و استنتاج علّی حدود ۱۰ سال است که مورد توجه جوامع علمی قرار گرفته است و دانشمندانی با پیش‌زمینه‌های گوناگون برای توسعه‌ی روش‌ها و ایجاد رویکردهای جدید در آن تلاش می‌کنند. مسائل بسیاری در این حوزه مطرح شده‌اند و شرایط متعددی برای استنتاج علّی صورت‌بندی شده است که برای نمونه، عناوین تعدادی از آن‌ها را در اینجا ذکر می‌کنیم.

- استنتاج در محیط‌های متعدد
- استنتاج در حضور متغیر پنهان[5]
- استنتاج در سری‌های زمانی
- استنتاج در حالت مکانیزم‌های غیرپایا[6]
- شرایط بُعد بالا
- پیاده‌سازی‌های موازی برای استنتاج سریع

[1] Intervention
[2] Belief Propagation
[3] Do-Calculus
[4] Bayesian Networks
[5] Hidden Variables/ Latent Variables/ Confounder
[6] Non-Stationary Causal Mechanism

- متغیرهای گسسته و حالت‌های ترکیبی
- یادگیری‌پذیری مسئله‌ی استنتاج
- یادگیری فعالانه یا منفعل ساختار علّی به کمک داده‌ی مداخله‌ای

* دانشجوی دکتری علوم‌کامپیوتر، دانشگاه کلمبیا
رایانامه: amirkasraj@gmail.com