Analogical Reasoning[1] الاستدلال القياسي

حجج (ابن تيمية) مرجع أساسي لدعم نظريات حديثة بالذكاء الإصطناعي

John F. Sowa
VivoMind LLC

Arun K. Majumdar
VivoMind LLC

الحلقة (١ : ٢)

أنتجت الحضارة الإسلامية فكرًا منهجيًا غنيًا، يمكن أن يساهم في حل مشاكل عصرية معقدة. فالذكاء الاصطناعي يحتاج إلى تكامل بين الحدس والمرونة (الشبكات العصبية) والمنطق والاستدلال (الرمزية) – وهي الفكرة نفسها التي دافع عنها ابن تيمية عندما جمع بين النص الشرعي والقياس الفقهي المرن. وهذا التقاطع بين التراث والتقنية مجال خصب لمزيد من البحث والاكتشاف.

استشهد (جون سوا) بكلام وآراء وحجج (**ابن تيمية**) في القرن الرابع عشر في الرد على المنطقيين الإغريق، كمرجع أساسي لدعم نظريات حديثة بالذكاء الإصطناعي، حيث كان دافع ابن تيمية عن القياس (Analogy) كبديل عملي للمنطق الاستنتاجي الجامد. د. سامر قنطقجي

يُنظر أحيانًا إلى الاستدلال المنطقي والاستدلال القياسي على أنهما بديلان متنافيان، إلا أن المنطق الصوري في الواقع هو أسلوب مقيد ومنمق للغاية لاستخدام القياسات. قبل صياغة أي موضوع إلى المرحلة التي يمكن فيها تطبيق المنطق عليه، يجب استخدام القياسات لاستخلاص تمثيل مجرد من كم هائل من التفاصيل غير ذات الصلة. وبعد اكتمال الصياغة، تتضمن كل خطوة منطقية – سواء كانت استنتاجًا أو استقراءً أو استنباطًا – تطبيق شكل من أشكال القياس. تحلل هذه الورقة البحثية العلاقات بين الاستدلال المنطقي والاستدلال القياسي، وتصف محرك قياس عالي الكفاءة يستخدم الرسوم البيانية

[1] This paper was published in the proceedings of the International Conference on Conceptual Structures in Dresden, Germany, in July 2003: A. Aldo, W. Lex, & B. Ganter, eds. (2003) *Conceptual Structures for Knowledge Creation and Communication*, LNAI 2746, Springer-Verlag, pp. 16-36, https://www.jfsowa.com/pubs/analog.htm

المفاهيمية كتمثيل للمعرفة. ويمكن دمج العمليات نفسها المستخدمة لمعالجة القياسات مع قواعد بيرس للاستدلال لدعم محرك الاستدلال. تُستخدم هذه العمليات، التي تُسمى قواعد التكوين الأساسية للرسوم البيانية المفاهيمية، على نطاق واسع في أنظمة الرسوم البيانية المفاهيمية لفهم اللغة والتعرف على المشاهد، بالإضافة إلى إيجاد القياسات وإثبات النظريات. وتستخدم الخوارزميات نفسها لتحسين إيجاد التناظر لتسريع جميع أساليب الاستدلال القائمة على قواعد التكوين المعيارية.

١. التناظر والإدراك

قبل مناقشة استخدام التناظر في الاستدلال، من المهم تحليل مفهوم التناظر وعلاقته بالعمليات المعرفية الأخرى. تُعدّ القواميس العامة عادةً نقطة انطلاق جيدة للتحليل المفاهيمي، لكنها نادراً ما تتعمق بما يكفي لحلّ الفروق الدقيقة. يسرد القاموس النموذجي مرادفات كلمة "التناظر"، مثل التشابه، والتماثل، والتطابق. ثم يُضيف ذلك معانيَ أكثر تخصصًا للكلمات، كالتشابه في بعض الجوانب بين أشياء مختلفة، أو المقارنة التي تُحدد درجة التشابه، أو الاستدلال القائم على التشابه أو التطابق. في مجال الذكاء الاصطناعي، كُتبت برامج البحث عن التناظر منذ ستينيات القرن الماضي، لكنها غالبًا ما تستخدم تعريفاتٍ للتناظر مُخصصة لتطبيقٍ مُعين.

يُعد مُحرك التناظر (VAE) VivoMind Analogy Engine، الموصوف في القسم ٣، عامًا بما يكفي لاستخدامه في أي مجال تطبيقي. ولذلك، يُثير VAE تساؤلاتٍ جوهرية حول طبيعة التناظر، والتي نُوقشت في أدبيات العلوم المعرفية. وقد تناول نقاشٌ ثلاثي الأطراف العديد من هذه القضايا:

٥. **الفرضية**: بالنسبة لمُحرك رسم الخرائط الهيكلية Structure Mapping Engine (SME)، عرّف فالكنهايمر وفوربوس وجينتنر (١٩٨٩) التناظر بأنه: إدراك أن شيئًا ما يُشبه شيئًا آخر إذا وُجد ربطٌ بين بنيةٍ مفاهيمية تصف الأول وبنيةٍ مفاهيمية تصف الثاني. تم تطبيق هذه المنهجية في SME على نطاق واسع من التطبيقات العملية، وفي الدراسات النفسية التي تقارن بين منهج SME والطريقة التي يتعامل بها الأفراد مع المشكلات نفسها.

٦. في المقابل، يرى تشالمرز وفرينش وهوفستادتر (١٩٩٢)، في نقدهم ل SME، أن **القياس** هو: جانب من جوانب وظيفة معرفية أعمّ تُسمى الإدراك عالي المستوى، والتي من خلالها يبني الكائن الحي تمثيلاً مفاهيميًا للموقف. ويجادلون بأن العمليات الإدراكية لا يمكن فصلها عن العمليات

المعرفية الأخرى حتى من حيث المبدأ، وبالتالي لا يمكن الدفاع عن نماذج الذكاء الاصطناعي التقليدية بافتراض وجود "وحدة تمثيل" تُوفر تمثيلات جاهزة. وينتقدون "التمثيلات الجامدة المكتوبة يدويًا" ل SME، ويؤكدون على أن "التمثيلات التي تعتمد على المحتوى، والقابلة للتكيف بسهولة" يجب أن تكون "جزءًا أساسيًا من أي نموذج دقيق للإدراك".

٧. **التوليف (الجمع)**: في تلخيص النقاش، لاحظ موريسون وديتريش (١٩٩٥) أن الموقفين يمثلان منظورين مختلفين لجوانب مترابطة، وإن كانت مختلفة، من الإدراك: يستخدم نموذج SME رسم الخرائط الهيكلية كآلية عامة لجميع أنواع مجالات المقارنة الممكنة، بينما ينظر نموذج HLP إلى القياس كعملية تصاعدية؛ كعملية بناء تمثيلي تعتمد على عمليات إدراكية منخفضة المستوى تتفاعل مع مفاهيم عالية المستوى. وفي ردهم على النقاد، أقر فوربوس وآخرون (١٩٩٨) بأن التكامل الأكبر مع الآليات الإدراكية أمر مرغوب فيه، لكنهم كرروا ادعاءهم بأن الأدلة النفسية "تؤيد بشكل قاطع" رسم الخرائط الهيكلية "كنموذج للمعالجة التناظرية البشرية".

يدعم نهج VAE النقطة رقم ٣: يجب أن تدمج نظرية شاملة للإدراك عمليات بناء البنية الإدراكية مع عمليات رسم الخرائط الهيكلية للقياس. ولإيجاد القياسات التناظرية، يستخدم VAE تطبيقًا عالي السرعة لرسم الخرائط الهيكلية، لكن خوارزمياته تعتمد على عمليات منخفضة المستوى.

تُستخدم هذه العمليات أيضًا لبناء البنى. في التطبيق الأول، بُنيت البنى المفاهيمية أثناء عملية تحليل اللغة الطبيعية وتفسيرها. ومؤخرًا، استُخدمت العمليات الأساسية نفسها لبناء بنى مفاهيمية من البيانات الحسية ومن أنماط شبيهة بالإدراك تُستخدم في التعرف على المشاهد. يُظهر نموذج VAE أن الإدراك وفهم اللغة ورسم خرائط البنية يمكن أن تستند إلى أنواع العمليات نفسها.

تناقش هذه الورقة البحثية العلاقات المتبادلة بين الاستدلال المنطقي والاستدلال القياسي، وتحلل العمليات المعرفية الكامنة من منظور علم العلامات لبيرس وتصنيفه للاستدلال، وتُبين كيف يدعم نموذج VAE هذه العمليات. يمكن أيضًا استخدام عمليات الرسم البياني نفسها التي تدعم الاستدلال القياسي لدعم الاستدلال الصوري. فبدلاً من أن يكونا متنافيين، يُعد الاستدلال المنطقي شكلاً أكثر تطوراً من الاستدلال القياسي. ولأغراض عديدة، لا سيما في فهم اللغة، توفر العمليات القياسية مرونة أكبر من

النوع الأكثر تقييداً والأقل قابلية للتكيف المستخدم في المنطق. ولكن نظراً لأن الاستدلال المنطقي والاستدلال القياسي يشتركان في أساس مشترك، يمكن استخدامهما معًا بفعالية.

٢ . الاستدلال المنطقي والقياسي

عند تطوير المنطق الصوري، اتخذ أرسطو الرياضيات اليونانية نموذجًا له. ومثل سابقيه سقراط وأفلاطون، انبهر أرسطو بدقة وصرامة البراهين الهندسية. وكان هدفه صياغة وتعميم إجراءات البرهان هذه وتطبيقها على الفلسفة والعلوم وجميع فروع المعرفة الأخرى. إلا أن ليس كل المواضيع قابلة للصياغة الصورية بنفس القدر. فقد حققت الرياضيات اليونانية أعظم نجاحاتها في علم الفلك، حيث ظلت حسابات بطليموس معياراً للدقة لقرون. لكن مواضيع أخرى، كالطب والقانون، تعتمد على الخبرة العميقة أكثر من اعتمادها على الحسابات الرياضية البارعة. ومن الجدير بالذكر أن اثنين من أكثر الانتقادات عمقًا للمنطق كتبهما الطبيب سيكستوس إمبيريكوس في القرن الثاني الميلادي، و**الفقيه ابن تيمية** في القرن الرابع عشر.

كان سيكستوس إمبيريكوس، كما يوحي لقبه، تجريبيًا. وكان طبيبًا في الأصل. من الناحية الفلسفية، كان سيكستوس من أتباع مدرسة الشك. وقد أكد أن المعرفة كلها يجب أن تنبع من التجربة. كمثال على ذلك، استشهد بالقياس المنطقي التالي:

– كل إنسان حيوان.

– سقراط إنسان.

– إذن، سقراط حيوان.

أقر سيكستوس بأن هذا القياس يمثل نمط استدلال صحيح، لكنه شكك في مصدر الدليل على المقدمة الكبرى "كل إنسان حيوان". فالقضية الكلية التي تدعي شمول كل حالة من حالات فئة معينة يجب أن تُستنتج بالاستقراء من الجزئيات. إذا كان الاستقراء ناقصًا، فإن القضية الكلية غير مؤكدة، وقد يكون هناك إنسان ليس حيوانًا. أما إذا كان الاستقراء كاملاً، فإن الحالة الجزئية "سقراط" يجب أن تكون قد خضعت للفحص مسبقًا، وبالتالي يكون القياس المنطقي زائداً أو دائريًا. بما أن كل صيغة من صيغ القياس المنطقي الصحيحة عند أرسطو تحتوي على مقدمة كلية واحدة على الأقل، إما إيجابية أو سلبية، فإن الانتقادات نفسها تنطبق عليها جميعًا: فالنتيجة إما غير مؤكدة أو دائرية.

ردّ الأرسطيون على سيكستوس بالقول إن القضايا الكلية قد تكون صحيحة بحكم تعريفها: فبما أن الإنسان يُعرَّف بأنه حيوان عاقل، فإن جوهر الإنسان يشمل الحيوان؛ وبالتالي، لا يمكن أن يوجد أي إنسان ليس حيوانًا. وقد هاجم الفقيه الإسلامي تقي الدين ابن تيمية هذا الدفاع. ومثل سيكستوس، **وافق ابن تيمية على صحة صيغة القياس المنطقي**، لكنه لم يقبل تمييز أرسطو بين الجوهر والعرض (حلاق، ١٩٩٣). فبحسب أرسطو، يشمل جوهر الإنسان كلاً من العقل والحيوان. أما الصفات الأخرى، كالضحك أو كونه ثنائي الأرجل بلا ريش، فقد تكون خاصة بالإنسان، لكنها صفات عرضية يمكن أن تختلف دون أن تُغيّر الجوهر. مع ذلك، **رأى ابن تيمية أن التمييز بين الجوهر والعرض اعتباطي**. فالإنسان يُمكن تعريفه بأنه حيوان ضاحك، مع اعتبار العقل صفة عرضية.

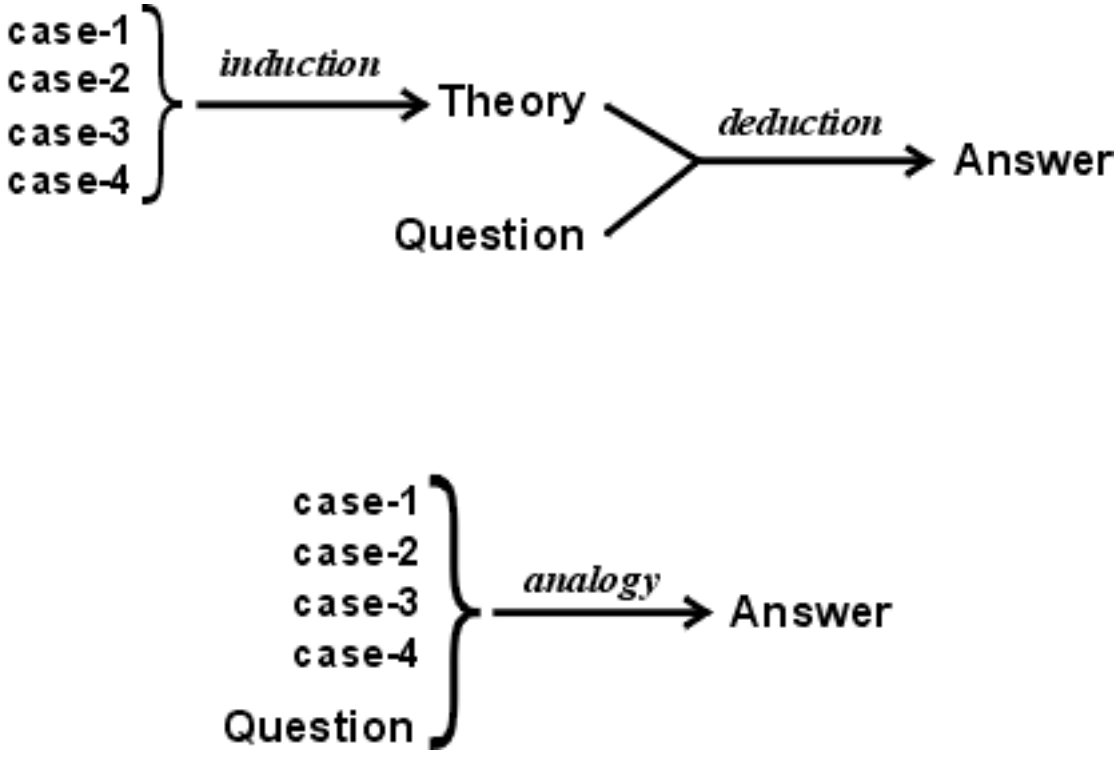
إنّ رفض المنطق يصبح بلا جدوى إن لم يكن هناك سبيل آخر للاستدلال. لكن ابن تيمية قدّم بديلاً: الممارسة الفقهية للاستدلال بالحالات والقياس. في الشريعة الإسلامية، تُقارن حالة جديدة بحالة أو أكثر من الحالات السابقة التي تُعتبر سوابق. آلية المقارنة هي القياس، ولكن يجب أن يستند القياس إلى سبب مشترك بين الحالة الجديدة والحالات السابقة. إذا كان السبب نفسه موجوداً في جميع الحالات، يُمكن تطبيق الحكم السابق على الحالة الجديدة. على سبيل المثال، ورد في القرآن تحريم خمر العنب، ولكن لم يُذكر شيء عن خمر التمر. يُستنتج الحكم على خمر التمر في أربع خطوات:

- الحالة المُعطاة: خمر العنب مُحرّم.
- الحالة الجديدة: هل يُحرّم خمر التمر؟
- السبب: يُحرّم خمر العنب لأنه مُسكر، وخمر التمر مُسكر أيضًا.
- الحكم: يُحرّم خمر التمر أيضًا.

عمليًا، قد يكون الاستدلال أكثر تعقيداً. فقد تشترك عدة حالات سابقة في سبب واحد، لكن تختلف أحكامها. عندئذٍ، يجب على التحليل تحديد ما إذا كانت هناك ظروف مُخففة تؤثر على تطبيق السبب. لكن المبادئ تبقى كما هي: القياس، المُستند إلى قواعد الإثبات والصلة، يُحدد السبب المشترك، وتأثير الظروف المُخففة، والحكم.

إلى جانب دفاعه عن القياس، ردّ ابن تيمية أيضًا على المنطقيين الذين زعموا أن الاستدلال القياسي يقيني، بينما القياس احتمالي فقط. **وأقرّ بأن الاستدلال المنطقي يقيني عند تطبيقه على البنى الذهنية**

البحتة في الرياضيات. لكن في أي استدلال حول العالم الواقعي، لا يُمكن استنباط القضايا الكلية إلا بالاستقراء، ويجب أن يستند الاستقراء إلى نفس مبادئ الإثبات والصلة المُستخدمة في القياس. يوضح الشكل ١ حجة ابن تيمية: ينطلق الاستدلال من نظرية تتضمن قضايا كلية. لكن يجب أن تكون هذه القضايا قد استُنتجت مسبقًا بالاستقراء باستخدام أساليب القياس. والفرق الوحيد هو أن الاستقراء يُنتج نظرية كنتيجة وسيطة، تُستخدم بعد ذلك في عملية استدلال لاحقة. باستخدام القياس مباشرةً، يستغني الاستدلال القانوني عن النظرية الوسيطة وينتقل مباشرةً من الحالات إلى النتيجة. إذا كانت النظرية والقياس مبنيين على الأدلة نفسها، فلا بد أن يؤديا إلى النتائج نفسها.



الشكل ١ : مقارنة بين الاستدلال المنطقي والاستدلال القياسي

يمثل السؤال في الشكل ١ بعض الجوانب المعروفة لحالة جديدة، والتي تتضمن جوانب مجهولة يجب تحديدها. في الاستدلال، تُقارن الجوانب المعروفة (باستخدام شكل من أشكال رسم الخرائط الهيكلية يُسمى التوحيد) بمقدمات استلزام معين. ثم تُستنتج الجوانب المجهولة، التي تجُيب على السؤال، من نتيجة الاستلزام. في القياس، تُقارن الجوانب المعروفة للحالة الجديدة بالجوانب المقابلة لها في الحالات السابقة. يمكن اعتبار الحالة التي تُقدّم أفضل تطابق بمثابة أفضل مصدر للأدلة لتقدير الجوانب المجهولة في

الحالة الجديدة. تُظهر الحالات الأخرى احتمالات بديلة لتلك الجوانب المجهولة؛ وكلما تقاربت هذه الاحتمالات، ازدادت قوة الأدلة المؤيدة للاستنتاج.

أقرّ كلٌّ من سيكستوس إمبيريكوس وابن تيمية بصحة الاستدلال المنطقي، لكنهما شكّكا في مصدر الأدلة على صحة القضايا الكلية المتعلقة بالعالم الواقعي. ما أغفلاه هو القيمة العملية للنظرية الجيدة: إذ يُمكن لمجموعة صغيرة من العلماء استنباط نظرية بالاستقراء، ويُمكن لأي شخص آخر تطبيقها دون الحاجة إلى إعادة التحليل المُستفيض للحالات. وقد أثبتت عملية الاستقراء ثم الاستنتاج، المكونة من خطوتين، نجاحها الأكبر في العلوم الفيزيائية، والتي تشمل الفيزياء والكيمياء وعلم الأحياء الجزيئي، والممارسات الهندسية التي تدعمها. أما عملية الاستدلال القائمة على الحالات، المكونة من خطوة واحدة، فهي أكثر نجاحًا في المجالات خارج ما يُسمى بالعلوم "الصلبة"، مثل إدارة الأعمال والقانون والطب وعلم النفس. حتى في العلوم "الناعمة"، التي تعجّ بالاستثناءات، تظل النظرية الناجحة في أغلب الأحيان مفيدة. فكثير من القضايا في القانون أو الطب يُمكن حسمها بالتطبيق المباشر لمبدأ عام، ولا تتطلب الاستناد إلى تاريخ طويل من القضايا إلا في حالات استثنائية. وحتى في الفيزياء، وهي أصعب العلوم، قد تكون النظريات راسخة، لكن مسألة اختيار النظرية المناسبة لمشكلة معينة تتطلب عادةً استخدام القياس. في كل من العلم والحياة اليومية، لا يوجد فصل حاد بين المواضيع التي تخضع للمنطق الصارم وتلك التي تتطلب الاستدلال القياسي.

تدعم الحجج غير الرسمية الموضحة في الشكل ١ تحليلاً للخوارزميات المستخدمة في الاستدلال المنطقي. فيما يلي تصنيف بيرس لأنواع الاستدلال المنطقي الثلاثة وكيفية استخدام عمليات ربط البنية في القياس في كل منها:

- **الاستنتاج** Deduction. إحدى القواعد الشائعة في الاستدلال هي قاعدة القياس المنطقي (modus ponens): إذا عُلمت عبارة p وبديهية على الصورة p تستلزم q، يُستنتج الاستنتاج q. في معظم التطبيقات، لا تتطابق العبارة p مع p في البديهية، لذا يلزم إجراء ربط بنيوي لتوحيد p و q قبل تطبيق القاعدة. إن المهمة الأكثر استهلاكًا للوقت ليست تطبيق قاعدة واحدة، بل الاستخدام المتكرر للقياسات لإيجاد أنماط قد تؤدي إلى تطبيقات ناجحة للقاعدة.

- **الاستقراء Induction**: عندما يتبع كل مثال لـ p مثال لـ q، يُجرى الاستقراء بافتراض أن p تستلزم q. ولأن p و q نادراً ما تتطابقان في كل مرة، يُستخدم نوع من القياس يُسمى التعميم لاستنتاج الاستلزام الأكثر عمومية الذي يشمل جميع الأمثلة.
- **الاستدلال الاستنباطي Abduction**: عملية التخمين أو صياغة فرضية أولية هي ما أطلق بيرس على هذه العملية اسم الاستدلال الاستنباطي. فإذا افترضنا وجود عبارة q وبديهية على شكل p تستلزم q، فإن التخمين بأن p سبب محتمل أو تفسير لـ q يُعد استدلالاً استنباطيًا. وتعتمد عملية تخمين p على أقل أنواع القياس تقييداً، حيث قد تكون بعض أجزاء الرسوم البيانية المطابقة أكثر عمومية بينما تكون أجزاء أخرى أكثر تخصصًا.

وكما يُبين هذا النقاش، يُعد القياس شرطًا أساسيًا للاستدلال المنطقي، وهو أسلوب دقيق للغاية يعتمد على استخدام القياسات المتكررة. وفي كل من الاستدلال البشري والتطبيقات الحاسوبية، يمكن استخدام العمليات الأساسية نفسها لدعم كليهما.

٣. محرك القياس

محرك القياس (VAE) VivoMind، الذي طوره ماجومدار، هو أداة عالية الأداء لإيجاد القياسات، تستخدم الرسوم البيانية المفاهيمية لتمثيل المعرفة. وكما هو الحال في SME، تُستخدم عملية رسم الخرائط الهيكلية لإيجاد القياسات. ولكن على عكس SME، تستطيع خوارزميات VAE إيجاد القياسات في وقت يتناسب مع (N log N)، حيث N هو عدد العقد في قاعدة المعرفة أو السياق الحالي. مع ذلك، يتطلب SME وقتًا يتناسب مع N^3 (فوربوس وآخرون، ١٩٩٥). وقد قلل إصدار لاحق يُسمى MAC/FAC هذا الوقت باستخدام محرك بحث لاستخراج البيانات الأكثر احتمالاً قبل استخدام SME لإيجاد أوجه التشابه (فوربوس وآخرون، ٢٠٠٢). وبفضل سرعته الفائقة، يستطيع VAE إيجاد أوجه التشابه في قاعدة معارف WordNet بأكملها في غضون ثوانٍ معدودة، على الرغم من احتواء WordNet على أكثر من ١٠٥ عقدة. بالنسبة لهذا الحجم، فإن ثانية واحدة باستخدام خوارزمية (N log N) تُعادل ٣٠ عامًا باستخدام خوارزمية N^3.

يستطيع VAE معالجة الرسوم البيانية من أي مصدر: اللغات الطبيعية، ولغات البرمجة، وأي نوع من المعلومات التي يمكن تمثيلها في رسوم بيانية، مثل الجزيئات العضوية أو شبكات الطاقة الكهربائية. في

تطبيق على العوامل التفاعلية الموزعة، يعالج VAE كلاً من الرسائل الإنجليزية والإشارات من أجهزة الاستشعار التي تراقب البيئة. ولتحديد تصرفات العامل، يبحث VAE عن أوجه تشابه لما فعله البشر استجابةً لأنماط مماثلة من الرسائل والإشارات. لإيجاد أوجه التشابه، يستخدم VAE ثلاث طرق للمقارنة، يمكن استخدامها منفردة أو مجتمعة:

- **مطابقة تصنيفات الأنواع** Matching type labels. تقارن الطريقة الأولى العقد التي تحمل تصنيفات متطابقة، أو التصنيفات المرتبطة كنوع فرعي ونوع رئيس مثل "قط" و"حيوان"، أو التصنيفات التي تشترك في نوع رئيس واحد مثل "قط" و"كلب".
- **مطابقة الرسوم البيانية الفرعية** Matching subgraphs. تقارن الطريقة الثانية الرسوم البيانية الفرعية التي قد تحمل تصنيفات مختلفة. تنجح هذه المطابقة عندما يكون الرسمان البيانيان متماثلين (بغض النظر عن التصنيفات) أو عندما يمكن جعلهما متماثلين بدمج العقد المتجاورة.
- **مطابقة التحويلات** Matching transformations. إذا فشلت الطريقتان السابقتان، تبحث الطريقة الثالثة عن تحويلات تربط الرسوم البيانية الفرعية لأحد الرسمين البيانيين بالرسوم البيانية الفرعية للآخر.

استُلهمت هذه الطرق الثلاث لمطابقة الرسوم البيانية من تصنيفات بيرس للأولية والثانية والثالثية (سوا، ٢٠٠٠). تقارن الطريقة الأولى عقدتين بناءً على محتواهما الذاتي بمعزل عن أي عقد أخرى؛ تقارن الطريقة الثانية العُقد بناءً على علاقاتها بالعُقد الأخرى؛ أما الطريقة الثالثة فتقارن التحويلات الوسيطة التي قد تكون ضرورية لجعل الرسوم البيانية قابلة للمقارنة. ولتوضيح الطريقتين الأوليين، يُبين الجدول التالي تشبيهًا وجده نموذج VAE عند مقارنة المعرفة الأساسية في WordNet لنوعي المفهوم "cat" و"car":

Analogy of Cat to Car	
Cat	**Car**
head	hood
eye	headlight
cornea	glass plate
mouth	fuel cap

stomach	fuel tank
bowel	combustion chamber
anus	exhaust pipe
skeleton	chassis
heart	engine
paw	wheel
fur	paint

الشكل ٢ : تشبيه اكتشفه نموذج VAE

كما يُبين الشكل ٢، توجد كمية هائلة من المعرفة الأساسية مُخزنة في الموارد المعجمية مثل WordNet. وهي غير مُنظمة بشكل دقيق بما يكفي للاستنتاج، ولكنها كافية لطريقة التشبيه الأكثر بدائية.

نظراً لوجود العديد من المسارات المُحتملة عبر جميع تعريفات وأمثلة WordNet، فإن معظم المقارنات تُولد تشبيهات متعددة. لتقييم الأدلة لأي عملية ربط محددة، يُحسب وزن الأدلة باستخدام طرق استدلالية تُقدّر مدى قرب التطابق. بالنسبة للطريقة الأولى لمطابقة تصنيفات الأنواع، ينتج أقرب تطابق عن التصنيفات المتطابقة. إذا لم تكن التصنيفات متطابقة، يتناقص وزن الأدلة مع ازدياد المسافة بين التصنيفات في التسلسل الهرمي للأنواع:

١. تصنيفات أنواع متطابقة، مثل "قط" إلى "قط".

٢. تصنيفات أنواع فرعية إلى تصنيفات أنواع رئيسة، مثل "قط" إلى "حيوان".

٣. تصنيفات أنواع فرعية من نفس النوع الرئيس، مثل "قط" إلى "كلب".

٤. تصنيفات أنواع فرعية أبعد، مثل "قط" إلى "شجرة".

بالنسبة للطريقة الثانية لمطابقة الرسوم البيانية الفرعية، ينتج أقرب تطابق عن كون كلا الرسمين البيانيين، بكاملهما، متماثلين. يتناقص وزن الأدلة كلما صغرت الرسوم البيانية الفرعية المشتركة أو إذا تطلب الأمر تعديل الرسوم البيانية لفرض التطابق:

١. مطابقة الرسوم البيانية المتماثلة.

٢. مطابقة الرسوم البيانية المتماثلة. طابق بين رسمين بيانيين لهما رسوم بيانية فرعية متماثلة (كلما كبرت الرسوم البيانية الفرعية، زادت قوة الدليل على التطابق).

٣. ادمج العقد المتجاورة لجعل الرسوم البيانية الفرعية متماثلة.

حصلت المقارنة الموضحة في الشكل ٢ على وزن عالٍ من الأدلة لأن VAE وجد العديد من التصنيفات المتطابقة وعدداً كبيراً من التطابقات.

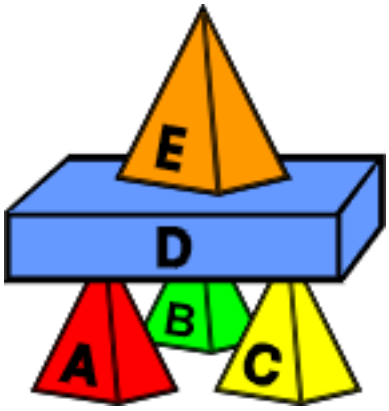
الرسوم البيانية الفرعية g في الأجزاء المتناظرة من القطة وأجزاء السيارة:

- تتشابه بعض الأجزاء المتناظرة في وظائفها: فالفرو والطلاء يمثلان الغطاء الخارجي؛ والقلب والمحرك يمثلان أجزاءً داخلية ذات نبض منتظم؛ والهيكل العظمي والشاسيه يمثلان بنيتين تُثبّت عليهما الأجزاء الأخرى؛ ويؤدي كل من الكف والعجلة وظيفة مماثلة، ويوجد أربعة من كل منهما.
- أطول رسم بياني فرعي مطابق هو المسار من فم القطة إلى معدتها ثم أمعائها ثم شرجها، وهو ما يتطابق مع المسار من غطاء خزان الوقود إلى خزان الوقود ثم غرفة الاحتراق ثم أنبوب العادم في السيارة. تتشابه معدة القطة وخزان وقود السيارة لأنهما نوعان فرعيان من الحاوية. وتؤدي الأمعاء وغرفة الاحتراق وظائف متشابهة. يُعتبر الفم وغطاء خزان الوقود فتحات إدخال، بينما يُعتبر الشرج وأنبوب العادم فتحات إخراج. يقلّ وزن الدليل نوعًا ما نظرًا لضرورة إجراء تعديلات لتجاهل العُقد غير المتطابقة: فالمريء لدى القطة لا يتطابق مع أي شيء في وصف WordNet للسيارة، كما أن كاتم صوت السيارة لا يتطابق مع أي شيء في وصفها للقطة.
- يُعدّ المسار من رأس القطة إلى عينيها ثم إلى قرنيتها رسمًا بيانيًا فرعيًا أقصر، وهو يُطابق المسار من غطاء المحرك إلى المصابيح الأمامية ثم إلى اللوح الزجاجي في السيارة. يقع كل من الرأس وغطاء المحرك في المقدمة. تُشابه العينان المصابيح الأمامية لوجود اثنتين من كل منهما، وارتباطهما بالضوء، على الرغم من اختلاف طبيعة هذا الارتباط. تقع القرنية واللوح الزجاجي في المقدمة، وكلاهما شفاف.

يُساهم كل تصنيف مُطابق وكل تطابق بنيوي في وزن الدليل على صحة التشبيه، وذلك بحسب مدى قرب التطابق ودقته.

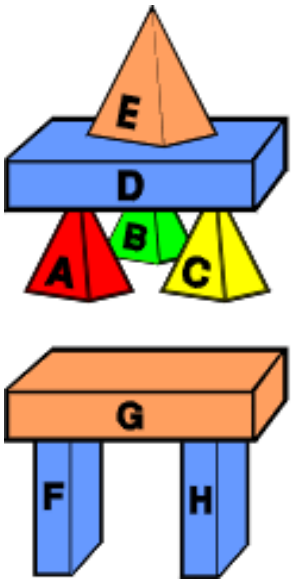
وكما يُبيّن تشبيه القطة بالسيارة، يُعدّ التشبيه أسلوبًا متعدد الاستخدامات للاستفادة من المعرفة الخلفية غير الرسمية وغير المنظمة. لكنّ التشبيهات قيّمة أيضًا لمقارنة المعرفة الرسمية لنظرية بديهية بأخرى. ففي عملية مراجعة النظريات، استخدم نيلز بور تشبيهًا بين قوة الجاذبية والقوة الكهربائية لاستنباط نظرية ذرة الهيدروجين، تشبيهًا بدوران الأرض حول الشمس. ويمكن استخدام الطريقة الثالثة من التشبيه، التي تجد

التحويلات المتطابقة، لتحديد التعيينات الدقيقة اللازمة لتحويل نظرية أو تمثيل إلى آخر. على سبيل المثال، يُظهر الشكل ٣ بنيةً فيزيائيةً يمكن تمثيلها بوساطة العديد من هياكل البيانات المختلفة.



الشكل ٣ : بنية فيزيائية يمكن تمثيلها بوساطة بيانات

غالبًا ما يستخدم المبرمجون الذين يستخدمون أدوات أو قواعد بيانات أو لغات برمجة مختلفة تمثيلات مختلفة، ولكنها متماثلة، لنفس أنواع المعلومات. فمبرمجو لغة ليسب، على سبيل المثال، يُفضلون استخدام القوائم، بينما يُفضل مبرمجو لغة فورتران استخدام المتجهات. تُعدّ المخططات المفاهيمية تمثيلاً عامًا للغاية، يُمكنه تمثيل أي نوع من البيانات المخزنة في الحاسوب الرقمي، إلا أن أنواع المفاهيم والعلاقات عادةً ما تعكس خيارات المبرمج الأصلي، والتي بدورها تعكس الخيارات المتاحة في أدوات البرمجة الأصلية. يوضح الشكل ٤ تمثيلاً للشكل ٣ يُبين الخيارات النموذجية المستخدمة مع قواعد البيانات العلائقية.



Objects

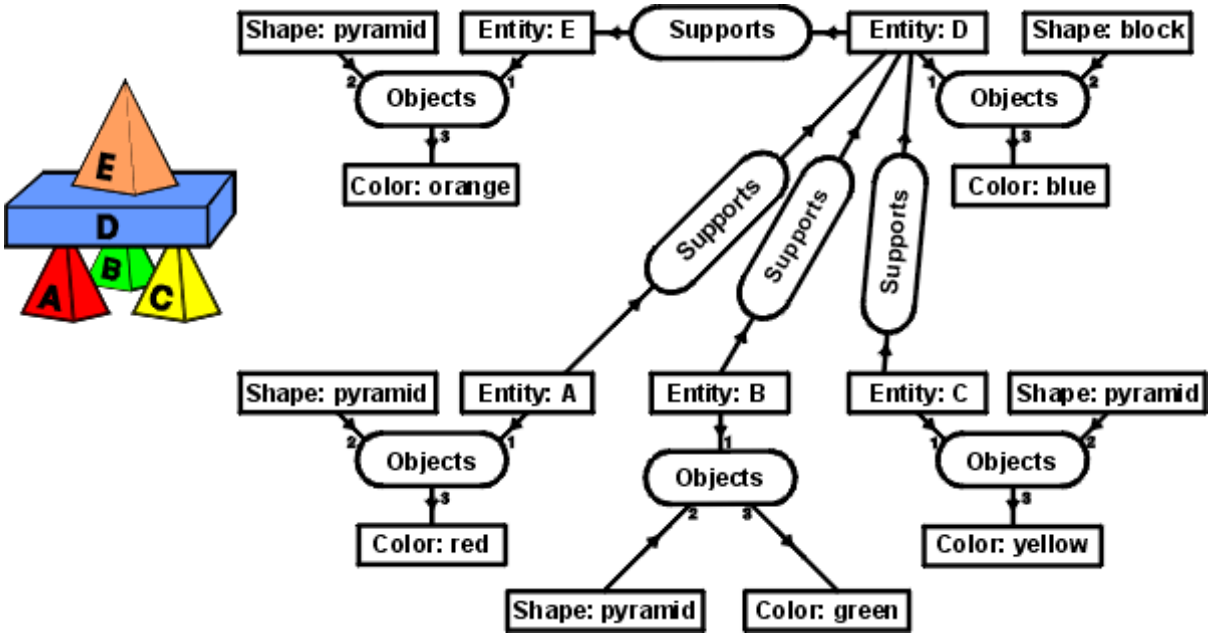
ID	Shape	Color
A	pyramid	red
B	pyramid	green
C	pyramid	yellow
D	block	blue
E	pyramid	orange
F	block	blue
G	block	orange
H	block	blue

Supports

Supporter	Supportee
A	D
B	D
C	D
D	E
F	G
H	G

الشكل ٤ : هيكلان ممثلان في قاعدة بيانات علائقية

على يسار الشكل ٤ هيكلان : نسخة من الشكل ٣ وقوس مُكوّن من ثلاث كتل . على اليمين جدولان : الأول بعنوان "الكائنات" يسرد مُعرّفات جميع الكائنات في كلا الجدولين مع أشكالها وألوانها؛ والثاني بعنوان "الدعامات" يسرد كل كائن داعم (يُسمى "الداعم") والكائن المدعوم (يُسمى "المدعوم") . كما يُوضح الشكل ٤ ، عادةً ما تُوزّع قاعدة البيانات العلائقية المعلومات المتعلقة بكائن واحد أو هيكل من الكائنات في جداول متعددة . بالنسبة لبنية الأهرامات والمكعبات، يُدرج كل عنصر مرة واحدة في جدول العناصر، ومرة واحدة أو أكثر في أحد عمودي جدول الدعامات أو كليهما . علاوة على ذلك، تتداخل المعلومات المتعلقة بالبنيتين المنفصلتين الموضحتين على اليسار في كلا الجدولين . عند استخراج جميع المعلومات المتعلقة بالبنية في أعلى اليسار من كلا الجدولين في الشكل ٤ ، يمكن ربطها بالرسم البياني المفاهيمي في الشكل ٥ .

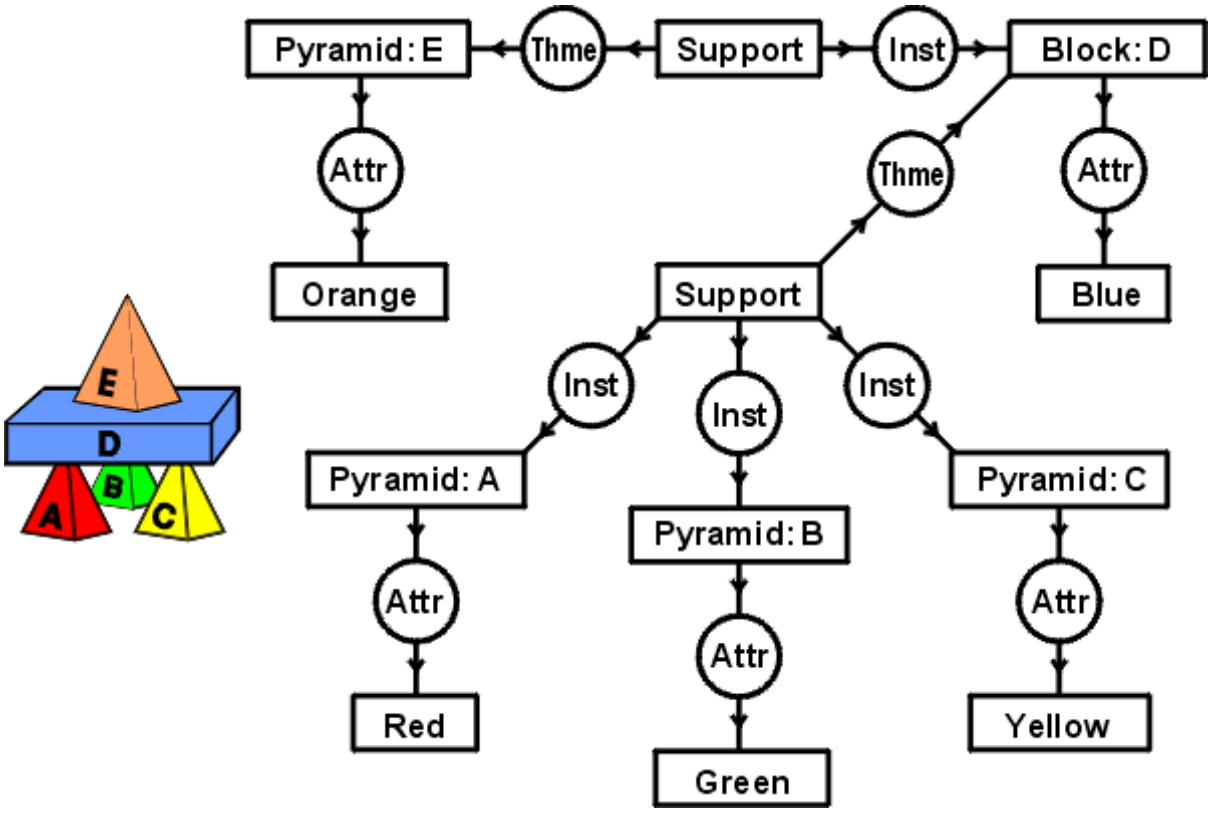


الشكل ٥ : رسم بياني مفاهيمي مُستمد من قاعدة البيانات العلائقية

في الشكل ٥ ، يُمثل كل صف في الجدول المُسمى "العناصر" بعلاقة مفاهيمية تحمل الاسم نفسه، ويُمثل كل صف في الجدول المُسمى "الدعامات" بعلاقة مفاهيمية تحمل الاسم نفسه . تُستمد تصنيفات أنواع المفاهيم في الغالب من التصنيفات الموجودة على أعمدة الجدولين في الشكل ٤ . الاستثناء الوحيد هو التصنيف "الكيان" ، الذي يُستخدم بدلاً من "المعرّف" . والسبب في هذا الاستثناء هو أن "المعرّف"

مصطلح على مستوى أعلى يتعلق بلغة التمثيل؛ فهو ليس مصطلحًا مُستمدًا من الكيانات في مجال الخطاب. على سبيل المثال، يشير المفهوم [Entity: E] إلى أن E هو مثيل من النوع Entity. بينما يشير المفهوم [E: "ID"] إلى أن السلسلة النصية "E" هي مثيل من النوع ID. استخدام I يُجنّب استخدام "كيان" بدلاً من "معرّف" الخلط بين مستوى البيانات الوصفية ومستوى الكائن. هذا الخلط شائع في معظم البرامج، حيث يتجاهل الحاسوب أي معنى قد يرتبط بالتسميات. أما في المنطق، فالفروق الدقيقة مهمة، وتُحدّدها الرسوم البيانية المفاهيمية بشكل متسق.

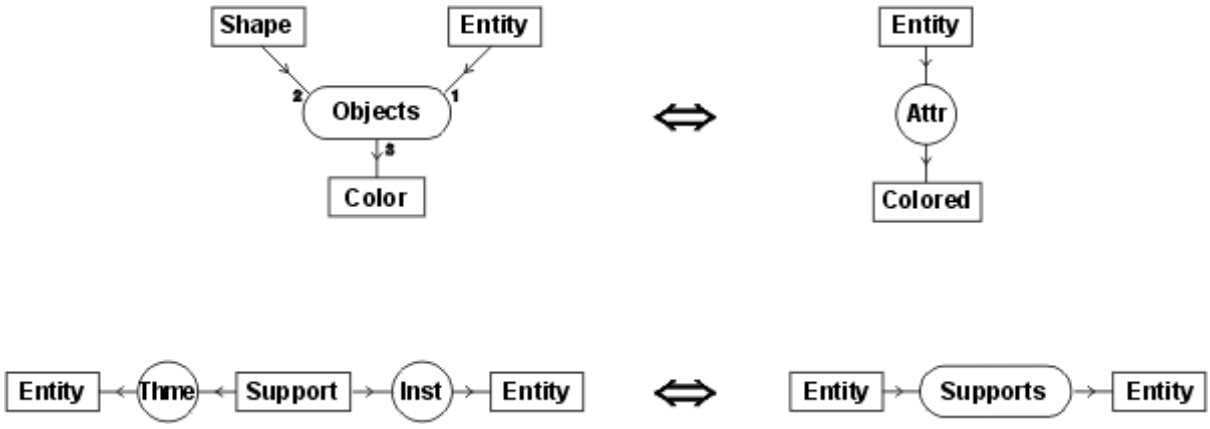
عند ترجمة اللغات الطبيعية إلى رسوم بيانية مفاهيمية، يجب على المفسر الدلالي تطبيق هذه الفروق. يوضح الشكل ٦ رسمًا بيانيًا مفاهيميًا يُمثّل الجملة الإنجليزية: "يدعم الهرم الأحمر A والهرم الأخضر B والهرم الأصفر C كتلة زرقاء D، والتي بدورها تدعم هرمًا برتقاليًا E". تُمثّل العلاقات المفاهيمية المُسمّاة "Thme" و"Inst" علاقتي الحالة "theme" و"instrument". بينما تُمثّل العلاقات المُسمّاة "Attr" علاقة السمة بين مفهوم كيان ما ومفهوم سمة من سمات ذلك الكيان. عادةً ما تُشتقّ تسميات أنواع المفاهيم من الأسماء والأفعال والصفات والظروف في اللغة الإنجليزية.



الشكل ٦ : رسم بياني مفاهيمي مُشتق من جملة إنجليزية.

على الرغم من أن الرسمين البيانيين المفاهيميين يُمثّلان معلومات متكافئة، إلا أنهما يبدوان مختلفين تمامًا. في الشكل ٥، يحتوي الرسم البياني المشتق من قاعدة البيانات العلائقية على ١٥ عقدة مفهوم و٩ عقد علاقة. في الشكل ٦، يحتوي الرسم البياني المشتق من اللغة الإنجليزية على ١٢ عقدة مفهوم و١١ عقدة علاقة. علاوة على ذلك، لا يوجد تصنيف نوع على أي عقدة في الشكل ٥ مطابق لأي تصنيف نوع على أي عقدة في الشكل ٦. على الرغم من تشابه بعض السلاسل النصية، إلا أن مواقعها في الرسوم البيانية تجعلها تُعامل على أنها مختلفة. في الشكل ٥، "برتقالي" هو اسم مثيل من نوع "لون"؛ وفي الشكل ٦، "برتقالي" هو تصنيف نوع مفهوم. في الشكل ٥، "يدعم" هو تصنيف نوع علاقة؛ وفي الشكل ٦، "دعم" ليس فقط تصنيف نوع مفهوم، بل يفتقر أيضًا إلى الحرف الأخير "S".

بسبب هذه الاختلافات، لا يمكن لطريقة التوحيد الصارمة أن تُظهر أن الرسوم البيانية متطابقة أو حتى مرتبطة. حتى الطرق الأكثر مرونة لمطابقة التصنيفات أو مطابقة الرسوم البيانية الفرعية لا تستطيع إثبات أن الرسمين البيانيين متماثلان. مع ذلك، يمكن للطريقة الثالثة من القياس إيجاد تحويلات متطابقة تُترجم الشكل ٥ إلى الشكل ٦ أو العكس. عندما طُلب من VAE مقارنة هذين الرسمين البيانيين، وجد التحويلين الموضحين في الشكل ٧. يُحدد كل تحويل ربطًا بين نوع من الرسوم البيانية الفرعية في الشكل ٥ ونوع آخر في الشكل ٦.



الشكل ٧: تحويلان اكتشفهما VAE

يُحدد التحويلان الموضحان في الشكل ٧ صيغةً من قواعد الرسم البياني لتحليل نوع من الرسوم البيانية وربطه بالنوع الآخر. يمكن تطبيق التحويل الموضح في أعلى الشكل ٧ على الرسوم البيانية الفرعية الخمسة التي تحتوي على علاقات من نوع "كائنات" في الشكل ٥، وربطها بالرسوم البيانية الفرعية

الخمسة التي تحتوي على علاقات من نوع "سمات" في الشكل ٦ . ويمكن تطبيق التحويل نفسه بشكل عكسي لربط الرسوم البيانية الفرعية الخمسة في الشكل ٦ بالرسوم البيانية الفرعية الخمسة في الشكل ٥ . أما التحويل الموضح في أسفل الشكل ٧، فيمكن تطبيقه من اليمين إلى اليسار لربط الشكل ٦ بالشكل ٥ . عند تطبيقه في هذا الاتجاه، سيتم ربط ثلاثة رسوم بيانية فرعية مختلفة، تحتوي على ثلاث عقد مشتركة: الرسم البياني الفرعي الممتد من [الهرم: أ] إلى [الكتلة: د]؛ والرسم البياني الممتد من [الهرم: ب] إلى [الكتلة: د]؛ والرسم البياني الممتد من [الهرم: ج] إلى [الكتلة: د]. عند تطبيقه في الاتجاه المعاكس، سيتم ربط ثلاثة رسوم بيانية فرعية في الشكل ٥ تحتوي على عقدة مشتركة واحدة فقط.

تتمتع التحويلات الموضحة في الشكل ٧ بقوة دلالة عالية لأنها تُستخدم بشكل متكرر وبنفس الطريقة تمامًا. إن تحويل رسم بياني فرعي واحد إلى رسم بياني فرعي آخر بدون تسميات متطابقة لا يُضيف شيئًا إلى قوة الدليل. ولكن إذا طُبِّق التحويل نفسه مرتين، فإن احتمالية نجاحه تزداد بشكل كبير. أما التحويلات التي يمكن تطبيقها ثلاث أو خمس مرات لربط جميع عُقد رسم بياني بجميع عُقد رسم بياني آخر، فتقترب احتمالية نجاحها من اليقين.

من بين طرق القياس الثلاث المستخدمة في VAE، تُستخدم الطريقتان الأوليان – مطابقة التسميات ومطابقة الرسوم البيانية الفرعية – أيضًا في SME. أما الطريقة الثالثة، وهي مطابقة التحويلات، والتي لا يُمكن لـ VAE تنفيذها إلا، فهي أكثر تعقيدًا لأنها تعتمد على قياسات القياسات. على عكس الطريقتين الأوليين، اللتين يُمكن لـ VAE تنفيذهما في زمن (N log N)، تستغرق الطريقة الثالثة زمنًا متعدد الحدود، ولا يُمكن تطبيقها إلا على كميات بيانات أصغر بكثير. عمليًا، تُطبَّق الطريقة الثالثة عادةً على أجزاء صغيرة من القياس حيث يتم إنجاز معظم عملية الربط بوساطة الطريقتين الأوليين، ولا يتبقى سوى عدد قليل من العُقد غير المتطابقة التي تحتاج إلى الربط. في مثل هذه الحالات، يكون العدد N صغيرًا، ويمكن إتمام عملية الربط بسرعة. حتى عند ربط الشكل ٥ (حيث N=9) بالشكل ٦ (حيث N=11)، استغرقت الطريقة رقم ٣ بضع ثوانٍ، بينما كان الوقت اللازم للطريقتين رقم ١ ورقم ٢ على رسوم بيانية بهذا الحجم أقل من جزء من الألف من الثانية.

تحدد كل طريقة من طرق القياس الثلاث ربطًا بين رسم بياني متدرج (CG) وآخر. تحدد الطريقتان الأوليان ربطًا عقديًا بين الرسوم البيانية المتدرجة، حيث تتطابق بعض أو كل عقد الرسم البياني. قد تحمل

أول مجموعة رسوم بيانية تصنيفات أنواع مختلفة عن العقد المقابلة لها في المجموعة الأخرى. تحدد الطريقة الثالثة عملية ربط أكثر تعقيداً، تتضمن عمليات ربط متعددة بين الرسوم البيانية الفرعية لمجموعة رسوم بيانية تصنيفية وأخرى. يمكن تطبيق هذه الطرق على مجموعات الرسوم البيانية التصنيفية المشتقة من أي مصدر، بما في ذلك اللغات الطبيعية والمنطق ولغات البرمجة.

في أحد التطبيقات الرئيسة، استُخدمت تقنية VAE لتحليل برامج ووثائق شركة كبيرة، كانت تستخدم أنظمة يصل عمرها إلى أربعين عامًا (LeClerc & Majumdar 2002). على الرغم من أن الوثائق حددت كيفية عمل البرامج، إلا أنه لم يكن أحد يعلم ما إذا كانت هناك أخطاء أو تناقضات أو إجراءات عمل قديمة مدفونة في الشيفرة. تطلبت المهمة تحليل ١٠٠ ميجابايت من اللغة الإنجليزية، و ١.٥ مليون سطر من برامج COBOL، ومئات من نصوص لغة التحكم التي تستدعي البرامج وتحدد ملفات البيانات وتنسيقاتها. مع مرور الوقت، تغيرت المصطلحات الإنجليزية وتنسيقات الحاسوب وأسماء الملفات. نتجت بعض تغييرات التنسيق عن أنظمة حاسوبية جديدة وممارسات تجارية حديثة، بينما فرضت نسخ مختلفة من اللوائح الفيدرالية تغييرات أخرى. خلال ثلاثة أسابيع من الحوسبة على معالج بنتيوم ٣ بسرعة ٧٥٠ ميجاهرتز، تمكن برنامج VAE، بالاشتراك مع محلل Intellitex، من تحليل الوثائق والبرامج، وترجمة جميع العبارات التي تشير إلى الملفات أو البيانات أو العمليات بأي من اللغات الثلاث (الإنجليزية، وكوبول، ولغة التحكم في الوظائف JCL) إلى رسوم بيانية مفاهيمية، واستخدام هذه الرسوم لإنشاء مسرد إنجليزي لجميع العمليات والبيانات، وتحديد مواصفات قاموس البيانات، وإنشاء مخططات تدفق البيانات لجميع العمليات، والكشف عن التناقضات بين الوثائق والتنفيذ.