

أفشين عميدي وشروين عميدي  
ترجمة سري السباعي

هذه الورقة الرصينة تُقدِّم لمحة عامة عمَّا يتضمَّنه كتاب *"Super Study Guide: Transformers & Large Language Models"* الذي يحتوي على ما يقارب ٦٠٠ رسمة توضيحية موزَّعة على ٢٥٠ صفحة، ويتناول المفاهيم التالية بشيء من التفصيل. للزيد من التفاصيل: <https://superstudy.guide>.

## ١.١ الأجزاء اللغوية

ملاحظة: كُلمة المجهول [UNK] تمثل الأجزاء النصية المجهولة بينما كُلمة الحشو [PAD] تُستعمل للملئ الأماكن الفارغة لضمان اتساق طول السلسلة المُدخلة.

هذا الدب ————— دُوب جميل جدا →  $T$  → هذا الدب [UNK] دُوب جميل جدا [PAD] ... [PAD]

وهناك أنواع المقسمات الأساسية:

النوع	المحاسن	المساوئ	الرسم التوضيحي
الكَلْبِي	<ul style="list-style-type: none"> <li>• سهل الفهم</li> <li>• قصير السلاسل</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• تضخم عدد المفردات</li> <li>• لا يستوعب تَشَكُّلات الكلمات</li> </ul>	الديبوب
كُلَيْمِي	<ul style="list-style-type: none"> <li>• محاكي للتقسيم التصريفي</li> <li>• مُضَمَّنَاتُه لها دلالة شبه معنوي</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• يزيد في طول السلسلة</li> <li>• التقسيم أكثر تعقيدا</li> </ul>	الذب##دوب
الحرفي البيّ	<ul style="list-style-type: none"> <li>• لا يفوته شيء في التقسيم</li> <li>• عدد المفردات صغير</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• السلاسل طويلة جدا</li> <li>• الأنماط صعبة الفهم لضآلة مستوى التقسيم</li> </ul>	الذبابوب

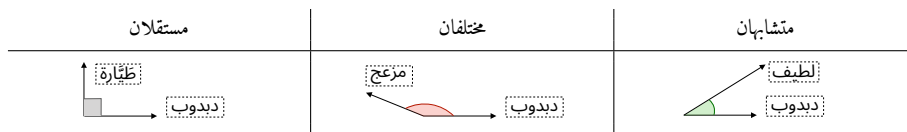
ملاحظة: المزوج البتي (Byte-Pair Encoding, BPE) وأحادي الكلم Unigram مقسمان كُليمان مشهوران.

□ **التعريف** - التضمين هو تمثيل رقمي لعنصر (كالكلمات والجمل) وهو معرف بمتجه  $x \in \mathbb{R}^n$ .

□ التشابه - تشابه جيب التمام بين كلمتين  $t_1, t_2$  يُحسب بالمعادلة التالية:

$$\boxed{\text{التشابه}(t_1, t_2) = \frac{t_1 \cdot t_2}{||t_1|| \cdot ||t_2||} = \cos(\theta) \in [-1, 1]}$$

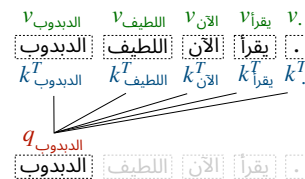
الزاوية  $\theta$  تمثل مقدار التشابه بين الكلمتين:



ملاحظة: تقريب الجار ذي القرني (*Approximate Nearest Neighbors, ANN*) والتلييد المحلي الحساس (*Locality Sensitive Hashing, LSH*) طريقتان تُقَرَّبان عملية التشابه عند المعطيات الكثيرة.

## ١.٢ الإنتباه

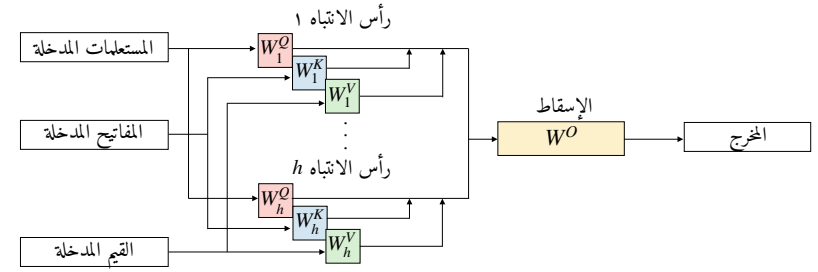
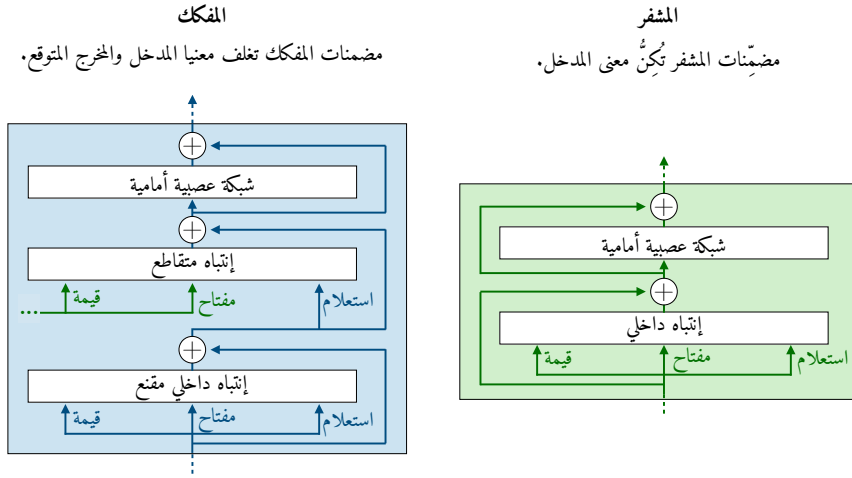
□ **الصيغة الرياضية** - مُعطى مُستفسر  $q$  فنريد معرفة لأي مفتاح  $k$  يجب على المستعلم أن "ينتبه" له مع الأخذ بعين الاعتبار القيمة المرتبطة  $v$ .



يمكن حساب الإنتروبيا بفعالية باستعمال المصفوفات  $Q, K, V$  المحتوية المُستفَرات  $q$  والمفاتيح  $k$  والقيم  $v$  ترتيباً مع طول بُعد متجه المفتاح  $d_k$ .

$$\text{الانتباه} = \text{softmax} \left( \frac{QK^T}{\sqrt{d_k}} \right) V$$

□ **MHA** - طبقة الإنتباه متعدد الرؤوس (*Multi-Head Attention*, MHA) تحسب عمليات الانتباه عبر أُنبيات كثيرة ثم تُسقط النتيجة في فضاء المُخرج.



هي مركبة من رؤوس انتباه عدتها  $h$  تكون مصفوفاتها  $W^Q, W^K, W^V$  والتي تُسقط المدخل لحسب المستعملات  $Q$  والمفاتيح  $K$  والقيم  $V$ . الإسقاط يُنهي باستعمال المصفوفة  $W^O$ .

ملاحظة: (Grouped-Query Attention, GQA) وكذا (Multi-Query Attention, MQA) يُعتبران نوعين من الأنثبات التي تقلل الحوسبة من خلال مشاركة المفاتيح والقيم عبر رؤوس الانتباه.

□ **مُضمّنات المكان** - تضمينات الموقع تعبر عن مكان الكلمة في الجملة وهي بنفس بُعد الكلمة الأصلي. وقد يكون مُنشأً اعتباطياً بمعادلة ثابتة أو متعلّماً من المعطيات أثناء التدريب.

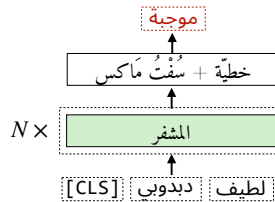
ملاحظة: التضمينات الموقعية الدوّارة (Rotary Position Embeddings, RoPE) طريقة مشهورة وفعالة تُدوّر متجه المُستفسر والمفتاح لتضمين معلومات الموقع.

## ٢٠٢ الهيكلية

□ **صورة عامة** - المحول علامة فارق وهو نموذج معتمد على طريقة الإنتباه الذاتي وهو مكوّن من مُشفّرات ومُفكّكات. فالمشفّرات تحسب مُضمّنات معنوية تمثل المدخل والتي تستعملها المفكّكات لتتوقع الكلمة التالي في السلسلة.

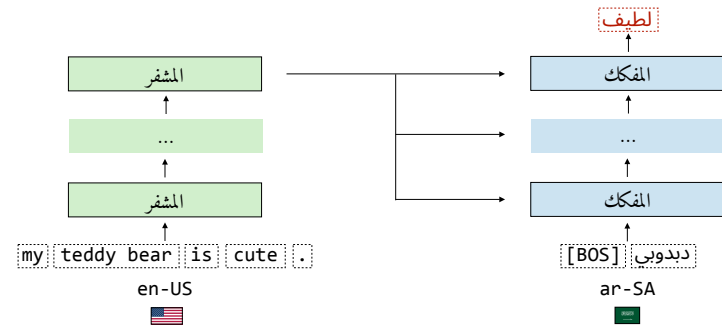
## ٣٠٢ بُنى مُجتزأة

□ **المشفّر وحده** - المشفّر الاتجاهاني من المحولات (Bidirectional Encoder Representations from Transformers, BERT) هو محول يكتفي بكدسة مشفّرات تستقبل مدخلا نصيا وتخرج مُضمّنات معنوية قد تستعمل في مهمات التصنيف وغيرها.



رمز [CLS] يضاف أوائل السلسلة ليلتقط معناها، فهي تختزل تضمينا يُستعمل عادة في مهام تطبيقية كتصنيف المشاعر.

□ **المفكّك وحده** - المحولات التوليدية المدربة (Generative Pre-trained Transformer, GPT) هي محولات مُتكفئة ذاتيا مكونة من كدسة مفكّكات معاكسة للمفهمات ومشتقاتها فالتتمعات تعامل المشاكل باعتبارها مشاكل نصي لنص.



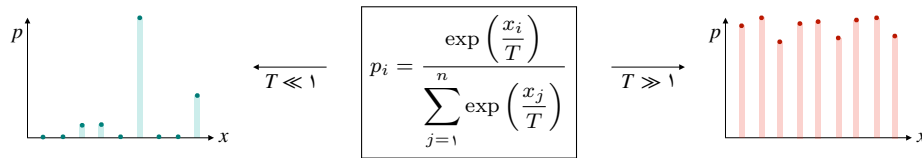
ملاحظة: مع أن المحولات كانت ابتداءً نموذجَ ترجمة فإنها الآن مستعملة في كل أنواع التطبيقات.

□ **المكونات** - المشفّر والمفكّك أساسيّ تركيب المحول وهما مختلفا الوظيفة:

## ٢.٣ الدرس

□ طول السياق - طول السياق هو أقصى عدد من الكلمات التي يسمعها المدخل وعادةً تتراوح بين عشرات الآلاف للملايين.

□ تفكيك الاعتيان - توقعات الكلمة مُعتانة من توزيع احتمالي متوقع  $p_i$  والذي يُحكم فيه بالمتغير المنحرج  $T$  واسمه حرارة.



ملاحظة: الحرارة العالية تؤدي إلى مخرجات مُبدعة بينما النازلة لأكثر حتمية.

□ سلسلة الأفكار - الفكرة المتتابعة (Chain-of-Thought, CoT) هي منهجية استدلالية يُفَتِّتُ النموذج فيها المشكلة المُقدَّمة إلى سلسلة من الخطوات الوسيطة والتي تساعد النموذج على توليد رد نهائي صحيح. (Tree of Thoughts, ToT) نوع متقدم من CoT.

ملاحظة: الاتساق الذاتي هو طريقة تجمع الأجوبة من الفكر المُسلَّس عبر مسارات استدلالها.

## ٣.٣ الضبط الدقيق

□ المعيرة المُهيكلة - المعيرة المهيكلة (Supervised FineTuning, SFT) أسلوب تدريب بعدي يُنسَّقُ أداء النموذج المهمة معينة. ويعتمد على أزواج مدخلات ومخرجات متقنة جوية للمهمة المحددة.

ملاحظة: إن كانت مُعطيات المعيرة المهيكلة تعليمات فاسم هذه المرحلة "المعيرة التعليمية".

□ توليف الأوزان الفعال - توليف الأوزان الفعال (Parameter-Efficient FineTuning, PEFT) قسم من الطرق تُستعمل لتدريب المعيرة المهيكلة بشكل فعال. فثلاً التكيف الريب (Low-Rank Adaptation, LoRA) يُقَرِّبُ الأوزان المُتعلمة  $W$  بتثيبت  $W$ . وتُعلَّمُ مصفوفتين ذواتا رتبة صغيرة  $A, B$  بدلها:

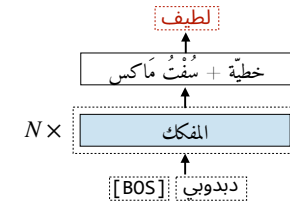
$$W \approx W' + B \times A$$

ملاحظة: أساليب التوليف الفعال تتضمن ضبط البادئة وإدراج طبقة المهائ.

## ٤.٣ الضبط الخلفي

□ نموذج المكافأة - نموذج المكافأة (Reward Model, RM) هو نموذج يتوقع توافق مخرج محدد  $\hat{y}$  مع سلوك مراد بالنسبة للمدخل  $x$ . أفضل المُحتاتن المحددة (Best-of-N, BoN) ويُسمى أيضاً الاعتيان المرفوض هو طريقة تستعمل المجازي لاختيار أفضل رد ضمن توليدات محددة  $N$ .

$$x \rightarrow f \rightarrow \hat{y}_1, \hat{y}_2, \dots, \hat{y}_N \rightarrow \text{RM} \rightarrow k = \underset{i \in \{1, N\}}{\operatorname{argmax}} r(x, \hat{y}_i)$$



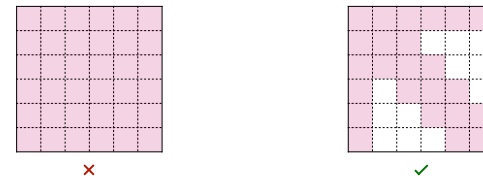
معظم النماذج اللغوية الضخمة (LLM) البارزة قائمة على هيكلية المفكك مثل التتمات (GPT) والألمات (LLaMA) ومستمر (Mistral) وجامعة (Gemma)، وديب سيك (DeepSeek) وغيرهم.

ملاحظة: المترجمات المشفرة المفككة مثل T5 أيضاً منكشفة ذاتياً وتشابه بكثير من خصائصها مع المفككات التتمات.

## ٤.٢ الاستمالات

□ مُقَرِّبات الانتباه - حساب الانتباه تعقيده  $\mathcal{O}(n^2)$  وهو مكلف باطراد مع طول النص  $n$  وهناك طريقتان أساسيتان لتقريب هذه الحسابات:

- التشتت: الانتباه الداخلي لا يقع خلال كل السلسلة بل فقط بين الكلمات المتعلقة ببعضها والأكثر صلة.



- رتبة أصغر: أن تبسَّط معادلة الانتباه لتصبح مصفوب ذات رتبة أقل والذي يقلل الحوسبة المطلوبة.

□ الانتباه الوضوي - الانتباه الوضوي (flash attention) عملية دقيقة تستعمل حسابات الانتباه بالتلاعب بعداد كروت الشاشة باستعمال ذاكرة الوصول العشوائي الثابتة (Static Random-Access Memory, SRAM) السريعة لعمليات المصفوفة قبل كتابة النتائج في ذاكرة عرض النطاق العالي (High Bandwidth Memory, HBM) البطيئة.

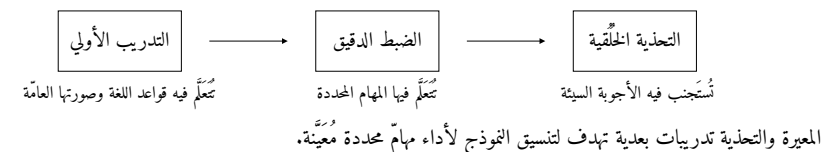
ملاحظة: تجريبياً هذا يُسرِّع الحوسبات ويقلل الذاكرة المستعملة.

## ٣ النماذج اللغوية الضخمة

## ١.٣ صورة عامة

□ التعريف - النموذج اللغوي الضخم (Large Language Model, LLM) هو نموذج يحول له قدرات متينة في معالجة اللغة الطبيعية. وهو موسوم بـ"ضخم" في معنى أن فيه مليارات الأوزان.

□ منهجيته - يُدرَّب LLM على ثلاث مراحل، التدريب الأولي وفيها التلقين، ثم الضبط الدقيق وفيها يُعبَّرُ ثم التحذية الخلفية وفيها يُنسَّقُ حسب تفضيل المُدرَّب.

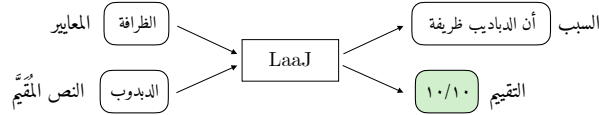


المعيرة والتحذية تدريبات بعدية تهدف لتنسيق النموذج لأداء مهام محددة مُعينة.

## ٤ التطبيقات

## ١٠٤ النموذج اللغوي الضخم الحكم

□ **التعريف** - النموذج اللغوي الضخم الحكم (LaaJ) هو طريقة في استعمال النماذج اللغوية الضخمة لتقييم مخرجات معينة بناءً على معيارٍ مُعطى. ويلاحظ أيضاً أن بمقدرته أن يُعَلِّلَ سبب تقييمه وهذا يساعد في الحكم والتفسير.



على نقيض حُقة ما قبل النماذج اللغوية الضخمة فإن مقاييس مثل روج (Recall-Oriented Understudy for Gisting Evaluation, ROUGE)، والنموذج اللغوي الضخم الحكم (LaaJ) لا يحتاج نصاً مرجعياً مما يجعلها مناسبة لتقييم أي نوع من المهمات. بشكل أدق النموذج اللغوي الضخم الحكم يظهر ارتباطاً قوياً بتقييمات الانسان عند الاعتماد على نموذج قوي مُحكم مثل GPT-4 والذي يتطلب قدرات منطقية للأداء الجيد.

ملاحظة: النموذج اللغوي الضخم الحكم مفيد عند استخدامه في جولات تقييم سريعة ولكن من الضروري مراقبة الفارق بين التقييم البشري والمُولَد خوفاً التباعد والتخالف.

□ **الانحيازات مشهورة** - قد ينحاز النموذج اللغوي الضخم الحكم لهذه الانحيازات:

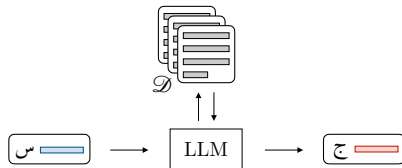
التحيز الذاتي	التحيز اللفظي	التحيز المكاني
المشكلة	يُفضل المواقع الأولى في المقارنات الزوجية	يُفضل النصوص المُسهبة
الحل	وَسَطَ المقياس على مواقع عشوائية	عاقب على طول المُخرج
	يُفضل مخرجاته	استعمل حكماً من نموذج آخر

ولهذه المشاكل يمكن معيرة نلضي حكمٍ مخصص ولكنه أمرٌ مكلف.

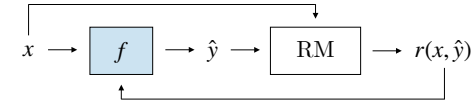
ملاحظة: القائمة السابقة ليست شاملة.

## ٢٠٤ التوليد المعزز بالاسترجاع

□ **التعريف** - التوليد المعزز بالاسترجاع (Retrieval-Augmented Generation, RAG) طريقة تسمح للنموذج اللغوي الضخم أن يصل لمعلومات خارجية ليجيب عن سؤال مُعطى. هذا مفيد إن أردنا إفادة النموذج اللغوي الضخم بمعلومات مجاوزة لما تدرب عليه تاريخياً.



□ **التعلم التعزيزي** - التعلم التعزيزي (Reinforcement Learning, RL) هي طريقة تساعد النموذج المكافئ وتحدث النموذج  $f$  بناءً على المكافآت حسب مخرجه المولد. إن كان النموذج المكافئ مبنيًا على المُفضَّلات البشرية فتُسمى هذه العملية تعلماً معززاً من الإثارة البشرية (Reinforcement Learning from Human Feedback, RLHF).

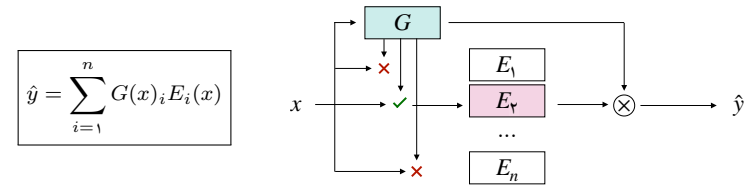


استمثال السياسة التقريبية (Proximal Policy Optimization, PPO) هي خزيمة تعلم معزز مشهورة تساعد على استهداف مكافآت كبيرة مع المحافظة على نموذج قريب من الأصل لتجنب احتراق المكافأة.

ملاحظة: هناك أيضاً مناهج خاضعة للإشراف مثل الاستمثال التفضيلي المباشر (Direct Preference Optimization, DPO)، والتي تدمج نموذج المكافأة مع التعلم المعزز في خطوة مُنشرة واحدة.

## ٥٠٣ مُستَمَثَلات

□ **مُخَلِّط الخبراء** - مُخَلِّط الخبراء (Mixture of Experts, MoE) هو نموذج يُفَعِّلُ قطعة من عُصبوناته عند التوليد. هو معتمد على بوابة  $G$  وخبراء  $E_1, \dots, E_n$ .



نلضات الخبراء تستعمل هذه الطريقة في شبكتها العصبية.

ملاحظة: تدريب نلضة خبراءية عسير جداً فكما ذُكر في ورقة لLaMa قُرِّرَ عدم استعمال هذه الهيكلية حتى مع فعالية وقت التوليد.

□ **التقطير** - التقطير هو عملية فيها نموذج طالب (صغير)  $S$  متدرِّباً على توقعها مخرجات نموذج مُعلِّم  $T$  (كبير) باستعمال خطأ تباعد كولباك وليبلير:

$$KL(\hat{y}_T || \hat{y}_S) = \sum_i \hat{y}_T^{(i)} \log \left( \frac{\hat{y}_T^{(i)}}{\hat{y}_S^{(i)}} \right)$$

ملاحظة: يُعتبر تدريب الوسوم "ناعماً" لأنها تمثل احتمالات الفئة.

□ **تكمية** - تكمية النموذج أحد أساليب التي تقلل من دقة أوزانه بينما تحدد أثرها على نتائج أداء النموذج. ونتيجة ذلك تقليل استخدام النموذج للذاكرة وُسْرَ توليده.

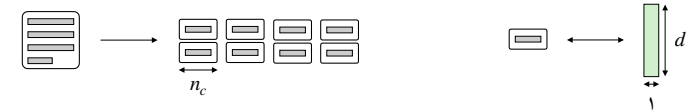
ملاحظة: التكاليف الترتيب المُكَمَّم (QLoRA) أحد أشهر أشكال التكاليف الترتيب المُستخدمة.

الوصف	الرسم التوضيحي
التحجيم أثناء التدريب أن تُطال مدة تدريب التعلم المعزز ليتمكن النموذج من توليد سلاسل تفكيرية قبل أن يجاب	الأداء خطوات التعلم المعزز →
التحجيم أثناء الاختبار أن يُمكن النموذج من التفكير قبل الإجابة باستعمال كلمات مُميّزة تُفرضها الميزانية مثل "انتظر"	الأداء طول سلسلة التفكير →

مُعطى قاعدة معلومات  $\mathcal{D}$  وسؤال فالُسترجع يُستقدم المُستندات الأكثر تعلقًا ثم يُلجُمها مع سؤال المُستخدم قبل توليد المُخرج.

ملاحظة: جُزئية الاسترجاع تعتمد على نماذج تضمين مُشفرة فقط.

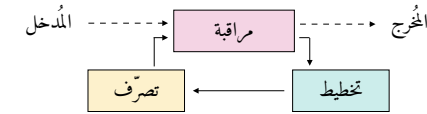
□ المتغيرات المُنعكسة - قاعدة المعلومات  $\mathcal{D}$  تُنشأ بتقطيع المُستندات لقطع طول أحدها  $n_c$  وتضمينه  $\mathbb{R}^d$ .



### ٣.٤ الوُكلاء

□ التعريف - الوكيل هو نظام آلي يُجز الأُهداف والمهام ذاتيًا بدل المُستخدم. قد يُستخدم عدّة سلاسل مختلفة من استدعاءات النماذج اللغوية الضخمة لذلك.

□ ReAct - إطار ( $Reason + Act$ , ReAct) تركيب السبب والفعل يسمح لعدّة سلاسل من النماذج اللغوية الضخمة أن تُستدعى لإكمال مهام مُركبة معقدة.



الإطار مُنهج بالخطوات التالية:

- المراقبة: توليف الأفعال السابقة وتحديد ما قد عُرِف.
  - التخطيط: تفصيل المهام المُحتاج إنجازها وأدواتها.
  - التصرف: التصرف باستعمال واجهة إطار برمجة أو رؤية المعلومات المشابهة في قاعدة المعرفة.
- ملاحظة: تقييم الأنظمة التوكيلية أمر فيه تحدي. ومع ذلك فقد يتم التقييم على مستوى أفراد النظام بُدخلات ومخرجات محلية وعلى مستوى النظام كلاً بسلاسل استدعاوية.

### ٤.٤ النماذج المبررة

□ التعريف - نموذج التبرير هو ما يعتمد على سلاسل تفكيرية تتابع حل مهام معقدة في الفروع المنطقية (رياضيات، برمجة، منطق). أمثلته سلاسل نماذج أُنباي (OpenAI) وديب سِيك (DeepSeek-R1) وجِمْنائِي (Gemini) الومضي المفكر من فُوقِل (Google).

ملاحظة: ديب سِيك يولد الجزء النصي النص المبرر بشكل مُحدد بين رموز  $\langle think \rangle$ .

□ التحجيم - هناك نوعان من أساليب التحجيم المُستعملة لإثراء القُدرات الاستدلالية: