

## درس هوش مصنوعی

مثال زیر به عنوان یک نمونه تمرین از نحوه نمایش دانش یک محیط آشنا (دنیای جاروبرقی) در دو زبان منطق گزاره‌ای (PL) و منطق درجه اول (FOL) و اصول بکارگیری روش‌های مختلف استنتاج (inference) ارائه شده است. با توجه به بزرگ بودن محیط و قوانین ناظر به آن فقط بخشی از دانش محیط بیان شده است. دانشجویان می‌توانند برای آشنایی بیشتر با نحوه بیان دانش یک مسأله به زبان منطق و روش‌های استنتاج به این مثال مراجعه کنند. برای مثال‌های بیشتر به سری اسلایدهای داده شده برای آموزش پرولوگ (prolog) مراجعه کنید. پیشنهاد می‌شود قبل از مراجعه به پاسخ این نمونه سوالات، ابتدا سعی کنید خود دانش مورد نیاز برای حل این مسائل را بیان کنید (نه لزوماً به زبان پرولوگ). از جمله مثال‌های موجود در این اسلایدها عبارتند از:

- روابط خانوادگی
- مسأله میمون و موز
- کار با لیست‌ها (پیاده‌سازی عملیاتی مانند بررسی عضویت، الحاق، اضافه و حذف عناصر، زیرلیست‌گیری و طول)
- فاکتوریل‌گیری
- الگوریتم مرتب‌سازی سریع (quick sort)
- شبیه‌سازی یک ماشین متناهی غیرقطعی (NFA)
- انتقال حلقه‌ها بین برج‌های هانوی

### تمرین ۷ – دنیای جاروبرقی زیر را در نظر بگیرید:

«محیط جاروبرقی از دو خانه مجاور به هم تشکیل شده است که هر یک می‌تواند دارای آلودگی باشد. وظیفه جاروبرقی تمیز کردن آلودگی‌ها در کمترین زمان ممکن است. جاروبرقی دارای دو حسگر است که به ترتیب موقعیت فعلی (LeftSquare یا RightSquare) و وجود آلودگی در آن (Dirt) را نشان می‌دهد. جاروبرقی دارای محرک‌هایی برای انجام چهار کنش حرکت به راست (MoveRight) با امتیاز 1-، حرکت به چپ (MoveLeft) با امتیاز 1-، مکش (Suck) با امتیاز 2- و خاموشی (TurnOff) با امتیاز 1- است. اعمال کنش‌های حرکت به راست و چپ در صورتی که باعث خارج شدن از محیط نشود باعث انتقال جاروبرقی به ترتیب به خانه‌ی سمت راست و چپ می‌شود (در غیر اینصورت اثری ندارد). اعمال کنش مکش در صورتی که خانه‌ی فعلی دارای آلودگی باشد باعث تمیز شدن آلودگی می‌گردد و در غیر اینصورت اثری ندارد. خانه‌های تمیز شده دیگر آلوده نمی‌شوند. اعمال کنش خاموشی جاروبرقی را غیرفعال می‌کند و دیگر امکان انجام هیچ کنشی را نخواهد داشت.»

می‌خواهیم این جاروبرقی را به صورت یک عامل مبتنی بر دانش پیاده‌سازی کنیم. برای اینکار دوران فعالیت عامل جاروبرقی را به واحدهای زمانی یکسانی تقسیم می‌کنیم که در هر واحد زمانی عامل ابتدا یک ادراک را دریافت می‌کند

و سپس با انتخاب یکی از کنش‌ها، آن را در محیط اعمال می‌کند. عامل به ازای هر خانه دارای آلودگی در هر واحد زمانی امتیاز 1- دریافت می‌کند. بر این اساس:

۱. پایگاه دانش این جاروبرقی را با تعریف نمادها (symbols) و اصول (axioms) لازم به زبان منطق گزاره‌ای (propositional logic) به نحوی بیان کنید که فقط دارای عبارت‌های شاخ (horn clauses) باشد.

۲. اگر در اولین واحد زمانی هر دو خانه دارای آلودگی باشند و جاروبرقی در خانه سمت چپ باشد، مراحل بررسی رابطه التزام بین جمله مربوط به «تمیز بودن خانه سمت راست در دومین واحد زمانی» و پایگاه دانش تعریف شده در سوال قبل را با کمک الگوریتم‌های زیر نشان دهید:

أ) زنجیربندی جلورو (forward chaining)

ب) زنجیربندی عقب‌رو (backward chaining)

ج) رفع (resolution)

۳. پایگاه دانش این جاروبرقی را با تعریف ثابت‌ها (constants)، مسندها (predicates) و در صورت لزوم توابع (functions) در زبان منطق درجه اول (first-order logic) به نحوی بیان کنید که فقط دارای عبارت‌های شاخ (horn clauses) باشد.

۴. در نظر داشتن شرایط اولیه گفته شده در سوال ۲ مراحل بررسی رابطه التزام بین جمله پرسش و پایگاه دانش بیان شده به زبان منطق درجه اول در سوال قبلی را با کمک الگوریتم‌های زیر نشان دهید:

أ) زنجیربندی جلورو

ب) زنجیربندی عقب‌رو

ج) رفع

نکته ۱: در صورت نیاز به استفاده از دانشی اضافه بر تعریف داده شده از مسأله برای بررسی رابطه التزام بین پایگاه دانش و جمله پرسش، آن را ذکر و دلیل ضرورت آن را بیان کنید.

نکته ۲: بیان بخش‌هایی از پایگاه دانش که در بررسی رابطه التزام با جمله پرسش اثرگذار نیست، اختیاری است.

## جواب تمرین ۷:

۱. نمادهای در نظر گرفته شده در پایگاه دانش:

نمادها	معنی
$D_L^t$	وجود آلودگی در خانه سمت چپ در واحد زمانی t
$D_R^t$	وجود آلودگی در خانه سمت راست در واحد زمانی t
$A_L^t$	قرار داشتن جاروبرقی در خانه سمت چپ در واحد زمانی t

$A_R^t$	قرار داشتن جاروبرقی در خانه سمت راست در واحد زمانی $t$
$A_O^t$	خاموش بودن جاروبرقی در واحد زمانی $t$
$Dirt^t$	ادراک وجود آلودگی در واحد زمانی $t$
$RightSquare^t$	ادراک قرار داشتن جاروبرقی در خانه سمت راست در واحد زمانی $t$
$LeftSquare^t$	ادراک قرار داشتن جاروبرقی در خانه سمت چپ در واحد زمانی $t$
$MoveLeft^t$	اجرای کنش حرکت به چپ در واحد زمانی $t$
$MoveRight^t$	اجرای کنش حرکت به راست در واحد زمانی $t$
$Suck^t$	اجرای کنش مکش در واحد زمانی $t$
$TurnOff^t$	اجرای کنش خاموشی در واحد زمانی $t$

برخی از اصول محیط ناظر به اولین واحد زمانی در زیر آورده شده است.

R1	$RightSquare^1 \Rightarrow A_R^1$	R2	$RightSquare^1 \Rightarrow \neg A_L^1$
R3	$LeftSquare^1 \Rightarrow A_L^1$	R4	$LeftSquare^1 \Rightarrow \neg A_R^1$
R5	$A_L^1 \wedge Dirt^1 \Rightarrow D_L^1$	R6	$A_R^1 \wedge Dirt^1 \Rightarrow D_R^1$
R7	$A_R^1 \wedge D_R^1 \wedge Suck^1 \Rightarrow A_R^2$	R8	$A_R^1 \wedge D_R^1 \wedge Suck^1 \Rightarrow \neg D_R^2$
R9	$A_L^1 \wedge D_L^1 \wedge Suck^1 \Rightarrow A_L^2$	R10	$A_L^1 \wedge D_L^1 \wedge Suck^1 \Rightarrow \neg D_L^2$
R11	$A_R^1 \wedge MoveLeft^1 \Rightarrow A_L^2$	R12	$A_L^1 \wedge MoveRight^1 \Rightarrow A_R^2$
R13	$A_R^1 \wedge TurnOff^1 \Rightarrow A_O^2$	R14	$A_R^1 \wedge TurnOff^1 \Rightarrow \neg A_R^2$
R15	$A_L^1 \wedge TurnOff^1 \Rightarrow A_O^2$	R16	$A_L^1 \wedge TurnOff^1 \Rightarrow \neg A_L^2$
R17	$A_L^1 \Rightarrow \neg A_R^1$	R18	$A_R^1 \Rightarrow \neg A_L^1$

انتخاب کنش‌ها در اصل مرتبط با تولید یک برنامه (plan) می‌باشد. می‌توان یک برنامه از پیش طراحی شده را مستقیماً به پایگاه دانش اضافه کرد مثلاً:  $Suck^1, MoveRight^2, Suck^3, TurnOff^4$ . ما در اینجا با در نظر گرفتن دو نماد جدید ( $C_R^t, C_L^t$ ) بعضی جملات برای انتخاب کنش‌ها در اولین واحد زمانی را به پایگاه دانش اضافه می‌کنیم:

R19	$A_R^1 \wedge D_R^1 \Rightarrow Suck^1$	R20	$A_L^1 \wedge D_L^1 \Rightarrow Suck^1$
R21	$C_L^1 \wedge C_R^1 \Rightarrow TurnOff^1$		
R22	$A_R^1 \wedge C_R^1 \Rightarrow MoveLeft^1$	R23	$A_L^1 \wedge C_L^1 \Rightarrow MoveRight^1$

که برخی اصول ناظر به این دو نماد جدید در اولین و دومین واحد زمانی عبارتند از:

R24	$D_R^1 \Rightarrow \neg C_R^1$	R25	$D_R^2 \Rightarrow \neg C_R^2$	R26	$D_L^1 \Rightarrow \neg C_L^1$	R27	$D_L^2 \Rightarrow \neg C_L^2$
R28	$C_R^1 \Rightarrow \neg D_R^1$	R29	$C_R^2 \Rightarrow \neg D_R^2$	R30	$C_L^1 \Rightarrow \neg D_L^1$	R31	$C_L^2 \Rightarrow \neg D_L^2$
R32	$A_R^1 \wedge D_R^1 \wedge Suck^1 \Rightarrow C_R^2$	R33	$A_L^1 \wedge D_L^1 \wedge Suck^1 \Rightarrow C_L^2$				

۲. حقایق اضافه شده به پایگاه دانش بر اساس فرضیات سوال و نحوه کار عامل عبارتند از:  $Dirt^1$  و  $LeftSquare^1$ .  
و هدف نیز بررسی صحت  $\neg D_R^2$  یا  $C_R^2$  است.

أ) حقایقی که در جستجوی جلورو با توجه به جملات بالا تولید شده و به پایگاه دانش اضافه می‌شوند عبارتند از:

$R3 \rightarrow A_L^1$	$R4 \rightarrow \neg A_R^1$	$R5 \rightarrow D_L^1$	$R17 \rightarrow \neg A_R^1$	$R20 \rightarrow Suck^1$
------------------------	-----------------------------	------------------------	------------------------------	--------------------------

$$R9 \rightarrow A_L^2 \quad R10 \rightarrow -D_L^2 \quad R33 \rightarrow C_L^2 \quad R31 \rightarrow -D_L^2 \quad \dots$$

با توجه به اینکه الگوریتم نمی‌تواند جمله پرسش را تولید کند (ادامه فرآیند جستجو اندیس زمان نمادها را افزایش خواهد داد) پس رابطه التزام بین این جمله و پایگاه دانش وجود ندارد.

(ب) در جستجوی عقب‌رو، با شروع از جمله هدف به سمت حقایق مسأله حرکت می‌کنیم و در هر مرحله اهداف میانی جدیدی را در نظر می‌گیریم. اهداف میانی ایجاد شده توسط جملات مختلف پایگاه دانش در زیر نشان داده شده‌اند (اهداف محقق شده با خط زیر نشان داده شده‌اند):

$$\begin{array}{ll} R32 \rightarrow A_R^1, D_R^1, \underline{Suck^1} & R1 \rightarrow \underline{RightSquare^1} \\ R6 \rightarrow A_R^1, \underline{Dirt^1} & R19 \rightarrow A_R^1, D_R^1 \\ R20 \rightarrow \underline{A_L^1}, \underline{D_L^1} & R3 \rightarrow \underline{LeftSquare^1} \\ R5 \rightarrow \underline{A_L^1}, \underline{Dirt^1} & \end{array}$$

از آنجا که تمام اهداف میانی تولید شده توسط الگوریتم نمی‌توانند محقق شوند، پس رابطه التزام بین جمله پرسش و پایگاه دانش وجود ندارد.

(ج) معادل CNF عبارات پایگاه دانش عبارتند از:

$$\begin{array}{ll} R1 & \neg RightSquare^1 \vee A_R^1 \\ R3 & \neg LeftSquare^1 \vee A_L^1 \\ R5 & \neg A_L^1 \vee \neg Dirt^1 \vee D_L^1 \\ R7 & \neg A_R^1 \vee \neg D_R^1 \vee \neg Suck^1 \vee A_R^2 \\ R9 & \neg A_L^1 \vee \neg D_L^1 \vee \neg Suck^1 \vee A_L^2 \\ R11 & \neg A_R^1 \vee \neg MoveLeft^1 \vee A_L^2 \\ R13 & \neg A_R^1 \vee \neg TurnOff^1 \vee A_O^2 \\ R15 & \neg A_L^1 \vee \neg TurnOff^1 \vee A_O^2 \\ R17 & \neg A_L^1 \vee \neg A_R^1 \\ R19 & \neg A_R^1 \vee \neg D_R^1 \vee Suck^1 \\ R21 & \neg C_L^1 \vee \neg C_R^1 \vee TurnOff^1 \\ R23 & \neg A_L^1 \vee \neg C_L^1 \vee MoveRight^1 \\ R25 & \neg D_R^2 \vee \neg C_R^2 \\ R27 & \neg D_L^2 \vee \neg C_L^2 \\ R29 & \neg C_R^2 \vee \neg D_R^2 \\ R31 & \neg C_L^2 \vee \neg D_L^2 \\ R33 & \neg A_L^1 \vee \neg D_L^1 \vee \neg Suck^1 \vee C_L^2 \\ R2 & \neg RightSquare^1 \vee \neg A_L^1 \\ R4 & \neg LeftSquare^1 \vee \neg A_R^1 \\ R6 & \neg A_R^1 \vee \neg Dirt^1 \vee D_R^1 \\ R8 & \neg A_R^1 \vee \neg D_R^1 \vee \neg Suck^1 \vee \neg D_R^2 \\ R10 & \neg A_L^1 \vee \neg D_L^1 \vee \neg Suck^1 \vee \neg D_L^2 \\ R12 & \neg A_L^1 \vee \neg MoveRight^1 \vee A_R^2 \\ R14 & \neg A_R^1 \vee \neg TurnOff^1 \vee \neg A_R^2 \\ R16 & \neg A_L^1 \vee \neg TurnOff^1 \vee \neg A_L^2 \\ R18 & \neg A_R^1 \vee \neg A_L^1 \\ R20 & \neg A_L^1 \vee \neg D_L^1 \vee Suck^1 \\ R22 & \neg A_R^1 \vee \neg C_R^1 \vee MoveLeft^1 \\ R24 & \neg D_R^1 \vee \neg C_R^1 \\ R26 & \neg D_L^1 \vee \neg C_L^1 \\ R28 & \neg C_R^1 \vee \neg D_R^1 \\ R30 & \neg C_L^1 \vee \neg D_L^1 \\ R32 & \neg A_R^1 \vee \neg D_R^1 \vee \neg Suck^1 \vee C_R^2 \end{array}$$

با توجه به این پایگاه دانش و اضافه کردن حقایق اولیه مسأله ( $LeftSquare^1$  و  $Dirt^1$ ) و همچنین نفی جمله پرسش ( $D_R^2$  یا  $\neg C_R^2$ ) به آن باید شروع به رفع عبارات با یکدیگر کنیم. مسیرهای متفاوتی برای رفع عبارات با یکدیگر می‌توان در نظر گرفت. در اینجا ما از رفع نفی جمله پرسش با یکی از عبارات پایگاه دانش شروع می‌کنیم و هر بار جمله حاصل از رفع را با جمله دیگری از پایگاه دانش رفع می‌کنیم:

$$\begin{array}{l} [\neg C_R^2] \& R32 \rightarrow [\neg A_R^1 \vee \neg D_R^1 \vee \neg Suck^1] \& R20 \rightarrow [\neg A_R^1 \vee \neg D_R^1 \vee \neg A_L^1 \vee \neg D_L^1] \& R6 \rightarrow \\ [\neg A_R^1 \vee \neg A_L^1 \vee \neg D_L^1 \vee \neg Dirt^1] \& R1 \rightarrow [\neg A_L^1 \vee \neg D_L^1 \vee \neg Dirt^1 \vee \neg RightSquare^1] \& R3 \rightarrow \\ [\neg D_L^1 \vee \neg Dirt^1 \vee \neg RightSquare^1 \vee \neg LeftSquare^1] \& R5 \rightarrow \end{array}$$

$$[\neg \text{Dirt}^1 \vee \neg \text{RightSquare}^1 \vee \neg \text{LeftSquare}^1 \vee \neg A_L^1] \& R3 \rightarrow$$

$$[\neg \text{Dirt}^1 \vee \neg \text{RightSquare}^1 \vee \neg \text{LeftSquare}^1] \& \text{Dirt}^1 \rightarrow$$

$$[\neg \text{RightSquare}^1 \vee \neg \text{LeftSquare}^1] \& \text{LeftSquare}^1 \rightarrow [\neg \text{RightSquare}^1]$$

با توجه با اینکه در فرایند رفع به عبارت تهی نخواهیم رسید (در تمام مسیرهای ممکن)، پس نمی‌توان

نفی جمله پرسش را رد کرد و در نتیجه رابطه التزام بین جمله پرسش و پایگاه دانش وجود ندارد.

۳. مسندهای در نظر گرفته شده در پایگاه دانش:

مسندها	معنی
Dirty(x, t)	وجود آلودگی در خانه x در واحد زمانی t
Clean(x, t)	تمیزی خانه x در واحد زمانی t
Located(x, t)	قرار داشتن جاروبرقی در خانه x در واحد زمانی t
Off(t)	خاموش بودن جاروبرقی در واحد زمانی t
Dirt(t)	ادراک وجود آلودگی در واحد زمانی t
RightSquare(t)	ادراک قرار داشتن جاروبرقی در خانه سمت راست در واحد زمانی t
LeftSquare(t)	ادراک قرار داشتن جاروبرقی در خانه سمت چپ در واحد زمانی t
MoveLeft(t)	اجرای کنش حرکت به چپ در واحد زمانی t
MoveRight(t)	اجرای کنش حرکت به راست در واحد زمانی t
Suck(t)	اجرای کنش مکش در واحد زمانی t
TurnOff(t)	اجرای کنش خاموشی در واحد زمانی t
نمادها	معنی
Left	خانه سمت چپ
Right	خانه سمت راست
توابع	معنی
t+1	واحد زمانی بعد از t را نشان می‌دهد

برخی از اصول محیط در زیر آورده شده است (به تفاوت آنها با اصول مربوطه در منطق گزاره‌ای توجه کنید).

- R1  $\forall t \text{ RightSquare}(t) \Rightarrow \text{Located}(\text{Right}, t)$
- R2  $\forall t \text{ RightSquare}(t) \Rightarrow \neg \text{Located}(\text{Left}, t)$
- R3  $\forall t \text{ LeftSquare}(t) \Rightarrow \text{Located}(\text{Left}, t)$
- R4  $\forall t \text{ LeftSquare}(t) \Rightarrow \neg \text{Located}(\text{Right}, t)$
- R5  $\forall x, t \text{ Located}(x, t) \wedge \text{Dirt}(t) \Rightarrow \text{Dirty}(x, t)$
- R6  $\forall x, t \text{ Located}(x, t) \wedge \text{Dirty}(x, t) \wedge \text{Suck}(t) \Rightarrow \neg \text{Dirty}(x, t+1)$
- R7  $\forall x, t \text{ Located}(x, t) \wedge \text{Dirty}(x, t) \wedge \text{Suck}(t) \Rightarrow \text{Clean}(x, t+1)$
- R8  $\forall x, t \text{ Located}(x, t) \wedge \text{Dirty}(x, t) \wedge \text{Suck}(t) \Rightarrow \text{Located}(x, t+1)$
- R9  $\forall t \text{ Located}(\text{Right}, t) \wedge \text{MoveLeft}(t) \Rightarrow \text{Located}(\text{Left}, t+1)$
- R10  $\forall t \text{ Located}(\text{Left}, t) \wedge \text{MoveRight}(t) \Rightarrow \text{Located}(\text{Right}, t+1)$
- R11  $\forall x, t \text{ Located}(x, t) \wedge \text{TurnOff}(t) \Rightarrow \text{Off}(t+1)$
- R12  $\forall x, t \text{ Located}(x, t) \wedge \text{TurnOff}(t) \Rightarrow \neg \text{Located}(x, t+1)$
- R13  $\forall x, y, t \text{ Located}(x, t) \wedge x \neq y \Rightarrow \neg \text{Located}(y, t)$
- R14  $\forall x, t \text{ Located}(x, t) \wedge \text{Dirty}(x, t) \Rightarrow \text{Suck}(t)$

- R15  $\forall t \text{ Clean}(\text{Left}, t) \wedge \text{Clean}(\text{Right}, t) \Rightarrow \text{TurnOff}(t)$   
 R16  $\forall t \text{ Located}(\text{Left}, t) \wedge \text{Clean}(\text{Left}, t) \Rightarrow \text{MoveRight}(t)$   
 R17  $\forall t \text{ Located}(\text{Right}, t) \wedge \text{Clean}(\text{Right}, t) \Rightarrow \text{MoveLeft}(t)$   
 R18  $\forall x, t \text{ Dirty}(x, t) \Rightarrow \neg \text{Clean}(x, t)$   
 R19  $\forall x, t \text{ Clean}(x, t) \Rightarrow \neg \text{Dirty}(x, t)$

۴. حقایق اضافه شده به پایگاه دانش بر اساس فرضیات سوال و نحوه کار عامل عبارتند از:  $\text{Dirt}(1)$  و

$\text{LeftSquare}(1)$ ، و پرسش نیز به صورت  $\neg \text{Dirty}(\text{Right}, 2)$  یا  $\text{Clean}(\text{Right}, 2)$  قابل بیان است.

أ) حقایق اضافه شده به پایگاه دانش به همراه یکسان‌سازی استفاده شده با اعمال قانون شیوه تصدیق کلی عبارتند از:

- |  |   |
|--|---|
| R3 $\xrightarrow{\{t/1\}}$ Located(Left, 1)                      | R4 $\xrightarrow{\{t/1\}}$ $\neg$ Located(Right, 1)                                 |
| R5 $\xrightarrow{\{x/\text{Left}, t/1\}}$ Dirty(Left, 1)         | R13 $\xrightarrow{\{x/\text{Left}, y/\text{Right}, t/1\}}$ $\neg$ Located(Right, 1) |
| R14 $\xrightarrow{\{x/\text{Left}, t/1\}}$ Suck(1)               | R18 $\xrightarrow{\{x/\text{Left}, t/1\}}$ $\neg$ Clean(Left, 1)                    |
| R6 $\xrightarrow{\{x/\text{Left}, t/1\}}$ $\neg$ Dirty(Left, 2)  | R7 $\xrightarrow{\{x/\text{Left}, t/1\}}$ Clean(Left, 2)                            |
| R8 $\xrightarrow{\{x/\text{Left}, t/1\}}$ Located(Left, 2)       | R13 $\xrightarrow{\{x/\text{Left}, y/\text{Right}, t/2\}}$ $\neg$ Located(Right, 2) |
| R19 $\xrightarrow{\{x/\text{Left}, t/2\}}$ $\neg$ Dirty(Left, 2) | R16 $\xrightarrow{\{t/2\}}$ MoveRight(2)  |
| R10 $\xrightarrow{\{t/2\}}$ Located(Right, 3)                    | R13 $\xrightarrow{\{x/\text{Right}, y/\text{Left}, t/3\}}$ $\neg$ Located(Left, 3)  |

...

با توجه به اینکه الگوریتم نمی‌تواند جمله پرسش را تولید کند (ادامه فرآیند جستجو متغیر زمان را افزایش خواهد داد) پس رابطه التزام بین این جمله و پایگاه دانش وجود ندارد.

ب) اهداف میانی ایجاد شده توسط جملات مختلف پایگاه دانش هنگام شروع از جمله هدف و حرکت به سمت حقایق مسأله در زیر نشان داده شده‌اند (اهداف میانی محقق شده با خط زیر نشان داده شده‌اند):

- R7  $\xrightarrow{\{x/\text{Right}, t/1\}}$  Located(Right, 1), Dirty(Right, 1), Suck(1)  
 R1  $\xrightarrow{\{t/1\}}$  RightSquare(1)  
 R5  $\xrightarrow{\{x/\text{Right}, t/1\}}$  Located(Right, 1), Dirt(1)  
 R14  $\xrightarrow{\{x/\text{Right}, t/1\}}$  Located(Right, 1), Dirty(Right, 1)

از آنجا که تمام اهداف میانی تولید شده توسط الگوریتم نمی‌توانند محقق شوند، پس رابطه التزام بین جمله پرسش و پایگاه دانش وجود ندارد.

ج) معادل CNF عبارات پایگاه دانش:

- R1  $\neg \text{RightSquare}(t) \vee \text{Located}(\text{Right}, t)$   
 R2  $\neg \text{RightSquare}(t) \vee \neg \text{Located}(\text{Left}, t)$   
 R3  $\neg \text{LeftSquare}(t) \vee \text{Located}(\text{Left}, t)$   
 R4  $\neg \text{LeftSquare}(t) \vee \neg \text{Located}(\text{Right}, t)$   
 R5  $\neg \text{Located}(x, t) \vee \neg \text{Dirt}(t) \vee \text{Dirty}(x, t)$   
 R6  $\neg \text{Located}(x, t) \vee \neg \text{Dirty}(x, t) \vee \neg \text{Suck}(t) \vee \neg \text{Dirty}(x, t+1)$   
 R7  $\neg \text{Located}(x, t) \vee \neg \text{Dirty}(x, t) \vee \neg \text{Suck}(t) \vee \text{Clean}(x, t+1)$   
 R8  $\neg \text{Located}(x, t) \vee \neg \text{Dirty}(x, t) \vee \neg \text{Suck}(t) \vee \text{Located}(x, t+1)$   
 R9  $\neg \text{Located}(\text{Right}, t) \vee \neg \text{MoveLeft}(t) \vee \text{Located}(\text{Left}, t+1)$   
 R10  $\neg \text{Located}(\text{Left}, t) \vee \neg \text{MoveRight}(t) \vee \text{Located}(\text{Right}, t+1)$

- R11  $\neg \text{Located}(x, t) \vee \neg \text{TurnOff}(t) \vee \text{Off}(t+1)$
- R12  $\neg \text{Located}(x, t) \vee \neg \text{TurnOff}(t) \vee \neg \text{Located}(x, t+1)$
- R13  $\neg \text{Located}(x, t) \vee x=y \vee \neg \text{Located}(y, t)$
- R14  $\neg \text{Located}(x, t) \vee \neg \text{Dirty}(x, t) \vee \text{Suck}(t)$
- R15  $\neg \text{Clean}(\text{Left}, t) \vee \neg \text{Clean}(\text{Right}, t) \vee \text{TurnOff}(t)$
- R16  $\neg \text{Located}(\text{Left}, t) \vee \neg \text{Clean}(\text{Left}, t) \vee \text{MoveRight}(t)$
- R17  $\neg \text{Located}(\text{Right}, t) \vee \neg \text{Clean}(\text{Right}, t) \vee \text{MoveLeft}(t)$
- R18  $\neg \text{Dirty}(x, t) \vee \neg \text{Clean}(x, t)$
- R19  $\neg \text{Clean}(x, t) \vee \neg \text{Dirty}(x, t)$

با اضافه کردن نفی جمله پرسش ((Dirty(Right, 2) یا Clean(Right, 2)−) و حقایق اولیه مسأله به پایگاه دانش، یکی از مسیرهای ممکن برای رفع که در آن نفی جمله پرسش با یکی از عبارات پایگاه دانش رفع شده و سپس هر بار جمله حاصل از رفع با جمله دیگری از پایگاه دانش رفع می‌شود، همراه با یکسان‌سازی‌های انجام شده، در زیر نشان داده شده است:

$$\begin{aligned}
 & [-\text{Clean}(\text{Right}, 2)] \& R7 \xrightarrow{\{x/\text{Right}, t/1\}} \\
 & [-\text{Located}(\text{Right}, 1) \vee \neg \text{Dirty}(\text{Right}, 1) \vee \neg \text{Suck}(1)] \& R14 \xrightarrow{\{x/\text{Right}, t/1\}} \\
 & [-\text{Located}(\text{Right}, 1) \vee \neg \text{Dirty}(\text{Right}, 1)] \& R5 \xrightarrow{\{x/\text{Right}, t/1\}} \\
 & [-\text{Located}(\text{Right}, 1) \vee \neg \text{Dirt}(1)] \& R1 \xrightarrow{\{t/1\}} \\
 & [-\text{RightSquare}(1) \vee \neg \text{Dirt}(1)] \& \text{Dirt}(1) \xrightarrow{\{\}} \\
 & [-\text{RightSquare}(1)]
 \end{aligned}$$

با توجه با اینکه در فرایند رفع به عبارت تهی نخواهیم رسید (در تمام مسیرهای ممکن)، پس نمی‌توان نفی جمله پرسش را رد کرد و در نتیجه رابطه التزام بین جمله پرسش و پایگاه دانش وجود ندارد.