

به نام خدا

زبان‌های برنامه‌نویسی

آرش شفيعی



برنامه نویسی تابعی

- در این فصل به معرفی برنامه نویسی تابعی و چند زبان برنامه نویسی تابعی می‌پردازیم.
- ابتدا با مفاهیم برنامه نویسی تابعی و حساب لامبدا که پایه و اساس زبان‌های تابعی است آشنا می‌شویم.
- سپس زبان‌های برنامه نویسی تابعی لیسپ، اسکیم، ام‌ال و هسکل را به اختصار معرفی می‌کنیم.
- در پایان به معرفی چندین تکنیک برنامه نویسی تابعی که در زبان‌های رویه‌ای و شیء‌گرا مانند پایتون می‌توانند مورد استفاده قرار بگیرند می‌پردازیم.

- یکی از تفاوت‌های بنیادین زبان‌های تابعی و زبان‌های دستوری به شرح زیر است:
- در زبان‌های دستوری در هر لحظه در حین اجرا، برنامه دارای حالت است بدین معنی که تعدادی متغیر وجود دارند که مقادیر آنها مشخص است و نتیجه دستورات برنامه و همچنین نتیجه توابع به مقادیر این متغیرها بستگی پیدا می‌کند. برای مثال نتیجه یک تابع فقط وابسته به ورودی‌های آن نیست بلکه وابسته به حالت برنامه نیز هست. یک متغیر عمومی می‌تواند حالت برنامه را تغییر دهد. می‌گوییم زبان‌های دستوری دارای حالت¹ هستند.
- در زبان‌های تابعی برنامه‌ها بدون حالت هستند بدین معنی که متغیری وجود ندارد که حالت برنامه را تغییر دهد و نتیجه دستورات و همچنین توابع تنها وابسته به ورودی آنهاست. زبان‌های تابعی شباهت زیادی به زبان ریاضی دارند چرا که در زبان‌های تابعی همچون زبان ریاضی، محاسبات نتیجه اعمال چندین تابع بر ورودی است و نتیجه هر یک از توابع تنها به ورودی آن تابع بستگی دارد. می‌گوییم زبان‌های تابعی بدون حالت² هستند.

¹ stateful

² stateless

- زبان‌های برنامه نویسی تابعی مطمئن‌تر از زبان‌های دستوری هستند چرا که برای بررسی درستی برنامه تنها باید بررسی کنیم که هر یک از توابع نتیجه درست باز می‌گردانند.
- لیسپ یکی از زبان‌های برنامه نویسی تابعی بود که در ابتدا تنها توسط مفاهیم برنامه نویسی تابعی پیاده سازی شد و به عبارت دیگر یک زبان برنامه نویسی خالص بود ولی به مرور زمان مفاهیمی را از برنامه نویسی دستوری وام گرفت. این زبان هنوز بسیار مورد توجه و پر استفاده است.
- هسکل یک زبان برنامه نویسی تابعی دیگر است که یک زبان تابعی خالص باقی مانده است. هنوز هم در بسیاری از کاربردهای محاسبات ریاضی آماری این زبان به همراه زبان‌های دیگر تابعی مورد استفاده قرار می‌گیرند.

- زبان‌های برنامه نویسی تابعی بر اساس حساب لامبدا به وجود آمده‌اند که در اینجا به معرفی آن می‌پردازیم.
- حساب لامبدا¹ در واقع یک دستگاه صوری² به زبان منطق ریاضی است برای توصیف محاسبات بر اساس توابع انتزاعی.
- یک دستگاه صوری ساختاری است برای بیان اصول و استنتاج قضایا بر پایه اصول با استفاده از تعدادی قوانین منطقی.

¹ lambda calculus

² formal system

- حساب لامبدا تشکیل شده است از تعدادی متغیر و عباراتی که از متغیرها تشکیل شده‌اند، یک روش علامت‌گذاری¹ برای تعریف توابع، و مجموعه‌ای از قوانین برای اعمال یک تابع بر روی یک عبارت که قوانین کاهش² نامیده می‌شوند.
- در حساب لامبدا، توابع با حرف لامبدای یونانی (λ) تعریف می‌شوند و به همین دلیل اینگونه نام گرفته است.
- در حساب لامبدای ساده متغیرها بدون نوع هستند ولی حساب لامبدای نوع‌دار³ نیز وجود دارد که در آن متغیرها نوع‌دار هستند.

¹ notation

² reduction rules

³ typed lambda calculus

- یک تابع در واقع یک قانون است که براساس مقادیر ورودی که آرگومان یا پارامتر نیز نامیده می‌شود مقادیر خروجی را تعیین می‌کند.
- برای مثال توابع $f(x) = x^2 + 3$ و $g(x, y) = \sqrt{x^2 + y^2}$ در ریاضی مورد مطالعه قرار می‌گیرند.

- در حساب لامبدای خالص هیچ عملگری مانند جمع و تفریق وجود ندارد و تنها عملیات ممکن تعریف تابع و اعمال تابع است.
- بنابراین می‌توان محاسباتی را به صورت $h(x) = f(g(x))$ تعریف کرد.
- خواهیم دید که عملگرهای ریاضی را می‌توان با استفاده از توابع تعریف کرد.
- پس تنها دو ساختار در حساب لامبدا وجود دارند : انتزاع لامبدا¹ که برای تعریف تابع به کار می‌رود و عملیات اعمال² که برای اعمال تابع بر روی یک عبارت به کار می‌رود.

¹ lambda abstraction

² application

- اگر M یک عبارت باشد، آنگاه $\lambda x.M$ تابعی است که x را دریافت می‌کند و M را به عنوان تابعی از x باز می‌گرداند.
- برای مثال $\lambda x.x$ یک انتزاع لامبدا است که x را دریافت کرده و x را باز می‌گرداند. به عبارت دیگر تابع همانی $I(x) = x$ توسط این انتزاع لامبدا تعریف می‌شود.
- در تعریف ریاضی یک تابع، همیشه باید نامی برای تابع در نظر بگیریم ولی در حساب لامبدا یک تابع بدون نام تعریف می‌شود.

حساب لامبدا

- برای اعمال یک تابع بر روی یک عبارت، تابع لامبدا را یک پرانتز قرار می‌دهیم و عبارتی را که می‌خواهیم تابع بر روی آن انجام شود را در مقابل آن می‌نویسیم.
- برای مثال $(\lambda x.x)M$ ، تابع $\lambda x.x$ را بر روی عبارت M اعمال می‌کند و به دست می‌دهد :
$$(\lambda x.x)M = M$$
- عبارت M در اینجا می‌تواند هر عبارت دلخواهی تشکیل شده از تعدادی متغیر باشد.
- برای مثال $(\lambda x.x)(wyz)$ ، تابع $\lambda x.x$ را بر روی عبارت wyz اعمال می‌کند و به دست می‌دهد :
$$(\lambda x.x)(wyz) = wyz$$
- همچنین عبارت M می‌تواند عبارتی باشد که یک تابع را تعریف می‌کند.
- برای مثال $(\lambda x.x)(\lambda y.yy)$ ، تابع $\lambda x.x$ را بر روی عبارت $\lambda y.yy$ اعمال می‌کند و به دست می‌دهد :
$$(\lambda x.x)(\lambda y.yy) = \lambda y.yy$$

- یک زبان برنامه نویسی می‌تواند توسط حساب لامبدا مدلسازی شود با این تفاوت که در زبان‌های برنامه نویسی نوع‌های داده‌ای وجود دارند. در واقع یک زبان برنامه نویسی معادل حساب لامبدای نوع‌دار است. می‌توانیم حساب لامبدای خالص را تعمیم دهیم به طوری که متغیرهای آن دارای نوع باشند.
- حساب لامبدا برای مدلسازی زبان‌های غیر تابعی نیز می‌تواند به کار رود چرا که حالت سیستم می‌تواند به عنوان یک ورودی به تابع لامبدا تعریف شود.

- با استفاده از گرامر مستقل از متن می‌توانیم ساختار نحوی حساب لامبدا را به عنوان یک زبان برنامه نویسی ساده بدون نوع تعریف کنیم.
 - فرض می‌کنیم یک مجموعه نامحدود V از متغیرها داریم که معمولاً آنها را با x و y و z و غیره نشان می‌دهیم.
 - گرامر حساب لامبدا به صورت زیر است :
- $$M \rightarrow x \mid MM \mid \lambda x.M$$
- به طوری که x یک متغیر از مجموعه V است.
 - عبارت $\lambda x.M$ انتزاع لامبدا یا تعریف تابع و عبارت M_1M_2 اعمال تابع نامیده می‌شوند.
 - در واقع $\lambda x.M$ تعریف تابعی است که x را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و عبارت M را باز می‌گرداند و M_1M_2 اعمال تابع M_1 بر روی عبارت M_2 است.

- برای مثال $\lambda x.(f(gx))$ تعریف تابعی است که به عنوان ورودی x را دریافت می‌کند و به عنوان خروجی، عبارت g را بر روی x و عبارت f را بر gx اعمال می‌کند.
- عملیات اعمال $(\lambda x.x)5$ تابع همانی را تعریف کرده و آن را بر روی 5 اعمال می‌کند.
- عبارت $f(gx)$ با عبارت $(fg)x$ متفاوت است. در عبارت اول ابتدا g بر روی x اعمال می‌شود و سپس f بر روی gx اعمال می‌شود، اما در عبارت $(fg)x$ ابتدا f بر روی g اعمال می‌شود و تابع به دست آمده بر روی x اعمال می‌شود.
- عبارت fgx در واقع به معنی $(fg)x$ است.
- اعمال تابع اولویت بالاتری نسبت به تعریف تابع دارد.
- بنابراین $\lambda x.MN$ به معنی $(\lambda x.(MN))$ است، نه به معنی $(\lambda x.M)N$

- در یک عبارت، یک متغیر می‌تواند آزاد¹ یا مقید² باشد.
- یک متغیر آزاد متغیری است که تعریف نشده است و مقداری به آن انتساب داده نشده است. برای مثال در حساب ریاضی عبارت $(x + 3)$ غیر قابل محاسبه است زیرا x یک متغیر آزاد و تعریف نشده است. اما متغیر x در عبارت $f(x) = x + 3$ مقید است، زیرا تعریف شده است و می‌توان آن را مقداردهی کرد.
- نماد لامبدا، عملگر انقیاد³ نیز نامیده می‌شود، زیرا یک متغیر را در یک عبارت تعریف می‌کند. متغیر x در عبارت $\lambda x.M$ مقید شده است، زیرا می‌توان به جای x هر مقداری را قرار داد و عبارت M را محاسبه کرد.

¹ free

² bound

³ binding operator

- دو عبارت $\lambda x.x$ و $\lambda y.y$ معادل هستند زیرا تابعی یکسان را تعریف می‌کنند و تنها اسامی ورودی آنها متفاوت است. دو عبارت یکسان که فقط در اسامی متغیرها متفاوت هستند را معادل آلفا¹ می‌نامیم. بنابراین می‌نویسیم:

$$\lambda x.x =_{\alpha} \lambda y.y$$

- در تابع $\lambda x.M$ ، عبارت M حوزه تعریف² انقیاد λx نامیده می‌شود.
- همچنین در تابع $\lambda x.M$ ، عبارت M را بدنه تابع و x را متغیر ورودی تابع می‌نامیم.
- متغیر x مقید است اگر در بدنه تابع $\lambda x.M$ وجود داشته باشد، در غیر این صورت x یک متغیر آزاد است.

¹ α -equivalent

² scope

- می‌توانیم تابع FV را به صورت زیر تعریف کنیم که متغیرهای آزاد یک عبارت را محاسبه می‌کند :

$$FV(x) = \{x\}$$

$$FV(MN) = FV(M) \cup FV(N)$$

$$FV(\lambda x.M) = FV(M) - \{x\}$$

- برای مثال

$$FV(\lambda f.\lambda x.(f(g(x)))) = \{g\}$$

- در یک عبارت لامبدا، یک متغیر مقید یک بار به عنوان مقید کننده¹ و یک بار به عنوان مقید شده² به کار می‌رود.
- در عبارت $\lambda x. (\lambda y. xy)y$ اولین وقوع y مقید کننده، دومین وقوع y مقید شده و سومین وقوع y به عنوان متغیر آزاد است.
- معمولا از آنجایی که تکرار یک متغیر در یک عبارت وقتی حوزه تعریف آن متفاوت باشد، می‌تواند گیج کننده باشد، نام متغیرها را می‌توانیم به نحوی تغییر دهیم که دو متغیر متفاوت با نام یکسان در یک عبارت وجود نداشته باشد، برای مثال عبارت پیشین را به صورت $\lambda x. (\lambda z. xz)y$ بازنویسی می‌کنیم.

¹ binding

² bound

- زبان لیسپ شبیه حساب لامبدا طراحی شده است. تابع لامبدا در لیسپ را به صورت زیر می‌نویسیم.

```
\ (lambda (x)    function-body)
```

- در یک عبارت در حساب لامبدا می‌توانیم یک متغیر را با یک متغیر دیگر جایگزین کنیم. برای مثال $[y/x]M$ بدین معناست که همه متغیرهای x در M با متغیر y جایگزین شوند، البته y نباید در M از قبل وجود داشته باشد.

- بنابراین می‌توانیم بنویسیم :

$$\lambda x.M = \lambda y.[y/x]M$$

- در عبارت $(\lambda x.M)N$ در واقع $\lambda x.M$ عبارت M را به عنوان تابعی از x تعریف می‌کند. سپس این تابع را بر روی N اعمال می‌کنیم. پس نتیجه عبارت $(\lambda x.M)N$ عبارت M است که در آن همه متغیرهای x را با N جایگزین شده باشد. پس می‌توانیم بنویسیم :

$$(\lambda x.M)N = [N/x]M$$

- با استفاده از این قانون مقدار عبارت زیر را بدست می‌آوریم :

$$(\lambda f.fx)(\lambda y.y) = (\lambda y.y)x = x$$

- از آنجایی که نام‌های یکسان در یک عبارت می‌توانند پیچیدگی‌های بسیاری ایجاد کنند، در اولین قدم برای ساده کردن یک عبارت، متغیرهای هم‌نام که حوزه تعریف آنها متفاوت است را تغییر نام می‌دهیم.
- در مثال زیر قبل از شروع محاسبات در پراگماتر اول x را به z تبدیل می‌کنیم :

$$\begin{aligned}
 (\lambda f. \lambda x. f(fx))(\lambda y. y + x) &= (\lambda f. \lambda z. f(fz))(\lambda y. y + x) \\
 &= \lambda z. ((\lambda y. y + x)((\lambda y. y + x)z)) \\
 &= \lambda z. ((\lambda y. y + x)(z + x)) \\
 &= \lambda z. (z + x + x)
 \end{aligned}$$

- می‌توانیم قوانین جایگزینی را برای عبارت‌های متفاوت از تعریف جایگزینی به صورت زیر بدست آوریم :

$$[N/x]x = N$$

$$[N/x]y = y$$

$$[N/x](M_1 M_2) = ([N/x]M_1)([N/x]M_2)$$

$$[N/x](\lambda x.M) = \lambda x.M$$

$$[N/x](\lambda y.M) = \lambda y.([N/x]M)$$

- گفتیم با استفاده از انتزاع لامبدا می‌توانیم عبارت M را به عنوان تابعی از متغیر x به صورت $\lambda x.M$ بیان کنیم.
- اما چگونه می‌توانیم عبارت M را به عنوان تابعی از x و y در نظر بگیریم ؟
- می‌توانیم دو تابع تعریف کنیم به طوری که تابع اول متغیر x را دریافت کرده و تابعی باز می‌گرداند که آن تابع متغیر y را به عنوان ورودی دریافت می‌کند.
- با استفاده از دو انتزاع لامبدا که هر کدام، یک متغیر دریافت می‌کند، می‌توانیم بنویسیم : $\lambda x.(\lambda y.M)$

- محاسبات در حساب لامبدا با استفاده از کاهش¹ انجام می‌شوند.
- کاهش در واقع نوعی استدلال معادله‌ای² است.
- وقتی می‌نویسیم $(\lambda x.M)N = [N/x]M$ ، در واقع می‌گوییم یک گام کاهش انجام داده‌ایم.

¹ reduction

² equational reasoning

- برای مثال :

$$\begin{aligned}(\lambda f. \lambda z. f(fz))(\lambda y. y + x) &= \lambda z. ((\lambda y. y + x)((\lambda y. y + x)z)) \\ &= \lambda z. z + x + x\end{aligned}$$

- محاسبات تا جایی ادامه پیدا می‌کند که گامی برای کاهش وجود نداشته باشد. اگر عبارتی تا جایی کاهش پیدا کند که دیگر نتوان آن را کاهش داد می‌گوییم به یک عبارت فرم نرمال¹ رسیده‌ایم.

¹ normal form

- برای مثال فرایند کاهش زیر را در نظر بگیرید :

$$\begin{aligned} (\lambda f. \lambda x. f(fx))(\lambda y. y + 1)2 &= (\lambda x. (\lambda y. y + 1)((\lambda y. y + 1)x))2 \\ &= (\lambda x. (\lambda y. y + 1)(x + 1))2 \\ &= (\lambda x. (x + 1 + 1))2 \\ &= (2 + 1 + 1) \end{aligned}$$

- عبارت نهایی به دست آمده فرمال نرمال در فرایند کاهش است. اما اگر تابع + را تعریف کنیم، آنگاه می‌توانیم فرایند کاهش را ادامه دهیم :

$$(2 + 1 + 1) = 3 + 1 = 4$$

- در واقع تعریف می‌کنیم $x + y$ برابر است با اعمال تابع plus بر روی دو متغیر x و y بنابراین $x + y = \text{plus } x \ y$. سپس باید تابع plus را تعریف کنیم.

- یکی از خواص حساب لامبدا این است که اگر در یک فرایند کاهش چند انتخاب در یک گام برای کاهش وجود داشته باشد، همهٔ انتخاب‌ها در نهایت به یک فرم نرمال واحد منجر می‌شوند. این خاصیت را تلاقی¹ می‌نامیم.
- برای مثال در عبارت $2((\lambda y.y + 1)x)(\lambda x.(\lambda y.y + 1))$ می‌توانیم ابتدا عبارت $(\lambda y.y + 1)x$ را محاسبه کنیم که به طور جداگانه در پرانتز قرار گرفته است و یا عبارت $(\lambda y.y + 1)((\lambda y.y + 1)x)$ را ابتدا محاسبه کنیم.

¹ confluence

- کدگذاری چرچ¹ وسیله‌ای است برای نمایش داده‌ها و عملگرها در حساب لامبدا. همان طور که گفته شده هر نوع محاسباتی را که توسط یک مدل محاسباتی قابل انجام است، می‌توان توسط حساب لامبدا انجام داد.
- در اینجا نشان می‌دهیم چگونه می‌توان اعداد صحیح و چندین عملگر ساده را توسط حساب لامبدا نمایش داد.
- از آنجایی که در حساب لامبدا تنها ابزاری که در اختیار داریم توابع هستند پس تنها توسط توابع می‌توانیم اعداد را نشان دهیم.

¹ church encoding

- می‌توانیم عدد n را بدین صورت تعریف کنیم: n بار اعمال تابع f بر روی x . بنابراین اعداد را به صورت جدول زیر نمایش می‌دهیم.

عدد	تابع	عبارت لامبدا
0	x	$\lambda f. \lambda x. x$
1	$f(x)$	$\lambda f. \lambda x. fx$
2	$f(f(x))$	$\lambda f. \lambda x. f(fx)$
3	$f(f(f(x)))$	$\lambda f. \lambda x. f(f(fx))$
\vdots	\vdots	\vdots
n	$f^n(x)$	$\lambda f. \lambda x. f^n x$

- حال باید توابعی را به عنوان عملگر تعریف کنیم که بر روی توابعی که به عنوان عدد تعریف شدند، اعمال شوند و عملیات محاسبات را انجام دهند.
 - یکی از عملیات مقدماتی عملگر افزایش یک واحد به یک عدد است.
 - عملگر افزایش واحد را می‌توانیم به صورت زیر نشان دهیم که در واقع اعمال یک بار تابع f بر عدد n است.
- $$\text{inc} \equiv \lambda n. \lambda f. \lambda x. f(nfx)$$

- می‌خواهیم مقدار عبارت $inc\ 3$ را محاسبه کنیم.
- در واقع باید تابع inc را بر روی تابع 3 اعمال کنیم.
- ابتدا معادل عبارت های inc و 3 را می‌نویسیم.

$$inc \equiv \lambda n. \lambda f. \lambda x. f(nfx)$$

$$3 \equiv \lambda f. \lambda x. f(f(fx))$$

- حال محاسبات را به صورت زیر انجام می‌دهیم.

$$\begin{aligned}\text{inc } 3 &= (\lambda n. \lambda f. \lambda x. f(nfx))(\lambda f. \lambda x. f(f(fx))) \\ &= (\lambda n. \lambda f. \lambda x. f(nfx))(\lambda g. \lambda y. g(g(gy))) \\ &= \lambda f. \lambda x. f((\lambda g. \lambda y. g(g(gy))))fx \\ &= \lambda f. \lambda x. f((\lambda y. f(f(fy))))x \\ &= \lambda f. \lambda x. f(f(f(fx))) \\ &= 4\end{aligned}$$

- مقدار $\lambda f. \lambda x. f(f(f(fx)))$ همان کدگذاری عدد چهار است، بنابراین $\text{inc } 3 = 4$.

- برای جمع دو عدد m و n کافی است ابتدا n بار و سپس m بار تابع f را بر روی x اعمال کنیم :

$$\text{plus} \equiv \lambda m. \lambda n. \lambda f. \lambda x. mf(nfx)$$

- برای مثال می‌خواهیم دو عدد ۲ و ۳ را با یکدیگر جمع کنیم.

- توابع متناظر با عملگر جمع، عدد ۲، و عدد ۳ را به صورت زیر می‌نویسیم.

$$\text{plus} \equiv \lambda m. \lambda n. \lambda f. \lambda x. m f (n f x)$$

$$2 \equiv \lambda f. \lambda x. f(fx)$$

$$3 \equiv \lambda f. \lambda x. f(f(fx))$$

- حال محاسبات را به صورت زیر انجام می‌دهیم.

$$\begin{aligned}
 \text{plus } 2 \ 3 &= (\lambda m. \lambda n. \lambda f. \lambda x. m f (n f x)) (\lambda g. \lambda y. g (g y)) (\lambda h. \lambda z. h (h (h z))) \\
 &= ((\lambda n. \lambda f. \lambda x. (\lambda g. \lambda y. g (g y)) f (n f x))) (\lambda h. \lambda z. h (h (h z))) \\
 &= ((\lambda n. \lambda f. \lambda x. (\lambda y. f (f y)) (n f x))) (\lambda h. \lambda z. h (h (h z))) \\
 &= ((\lambda n. \lambda f. \lambda x. (f (f (n f x)))) (\lambda h. \lambda z. h (h (h z)))) \\
 &= \lambda f. \lambda x. (f (f ((\lambda h. \lambda z. h (h (h z))) f x))) \\
 &= \lambda f. \lambda x. (f (f ((\lambda z. f (f (f z))) x))) \\
 &= \lambda f. \lambda x. f (f (f (f x))) \\
 &= 5
 \end{aligned}$$

- مقدار $\lambda f. \lambda x. f (f (f (f x)))$ همان کدگذاری عدد ۵ است، بنابراین $\text{plus } 2 \ 3 = 5$.

- همه عملگرهای حسابی دیگر از جمله تفریق، ضرب، تقسیم، و توان می‌توانند با استفاده از توابع حساب لامبدا تعریف شوند.

- برای تعریف مقادیر منطقی درست و نادرست می‌توانیم دو تابع به صورت زیر تعریف کنیم.
- مقدار درست تابعی است که دو ورودی می‌گیرد و ورودی اول را انتخاب می‌کند و مقدار نادرست تابعی است که دو ورودی می‌گیرد و ورودی دوم را انتخاب می‌کند.
- بنابراین داریم :

$\text{true} \equiv \lambda a. \lambda b. a$

$\text{false} \equiv \lambda a. \lambda b. b$

- حال ساختار شرطی در حساب لامبدا را می‌توان تعریف کرد. یک گزاره اگر مقدارش درست باشد ورودی اول (then) را انتخاب می‌کند و اگر مقدارش نادرست باشد ورودی دوم (else) را انتخاب می‌کند.

predcate then-clause else-clause

- عملگر شرطی را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

$\text{if} \equiv \lambda p. \lambda a. \lambda b. p a b$

- برای مثال :

$\text{if true } M_1 \ M_2 = \text{true } M_1 \ M_2 = M_1$
 $\text{if false } M_1 \ M_2 = \text{false } M_1 \ M_2 = M_2$

- همچنین می‌توان عملگرهای عطف و فصل و نقیض منطقی را به صورت زیر تعریف کرد.

$$\text{and} \equiv \lambda p. \lambda q. p q p$$

$$\text{or} \equiv \lambda p. \lambda q. p p q$$

$$\text{not} \equiv \lambda p. \lambda a. \lambda b. p b a$$

$$\text{not} \equiv \lambda p. (p \text{ false true})$$

- برای مثال :

$$\text{and true false} = (\lambda p. \lambda q. p q p) \text{ true false} = \text{true false true} = \text{false}$$

$$\text{or true false} = (\lambda p. \lambda q. p p q) \text{ true false} = \text{true true false} = \text{true}$$

$$\text{not true} = (\lambda p. (p \text{ false true})) \text{ true} = \text{true false true} = \text{false}$$

$$\text{not false} = (\lambda p. \lambda a. \lambda b. p b a) (\lambda a. \lambda b. b) = \lambda a. \lambda b. a = \text{true}$$

- در ریاضیات نقطه ثابت¹ در یک تابع، نقطه‌ای است که توسط یک تابع به خودش نگاشت می‌شود. به عبارت دیگر c یک نقطه ثابت در تابع f است اگر $f(c) = c$.
- حال ببینیم چگونه از مفهوم نقطه ثابت برای تعریف توابع بازگشتی در حساب لامبدا استفاده می‌کنیم.
- فرض کنیم f یک نقطه ثابت برای تابع G است. بنابراین می‌توانیم بنویسیم:
$$f = G(f) = G(G(f)) = G(G(G(f))) = \dots$$
- بدین ترتیب بازگشت را توسط نقطه ثابت تعریف می‌کنیم.

¹ fixed point

- عملگر نقطه ثابت در حساب لامبدا به صورت زیر تعریف می شود :

$$Y \equiv \lambda f. (\lambda x. f(xx)) (\lambda x. f(xx))$$

- اگر G یک تابع باشد، آنگاه YG یک نقطه ثابت برای تابع G است. می توانیم عملگر Y را به صورت زیر بر روی تابع G اعمال کنیم :

$$YG = (\lambda x. G(xx)) (\lambda x. G(xx)) = G((\lambda x. G(xx)) (\lambda x. G(xx))) = G(YG)$$

- بنابراین داریم :

$$YG = G(YG) = G(G(YG)) = \dots$$

- حال می‌خواهیم تابع فاکتوریل را تعریف کنیم. می‌توانیم تابع غیربازگشتی f را به صورت زیر بنویسیم:

$$f = \lambda n. \text{ if } n == 1 \text{ then } 1 \text{ else } n * f(n - 1)$$
- سپس تابع G را به صورت زیر تعریف می‌کنیم:

$$G = \lambda f. \lambda n. \text{ if } n == 1 \text{ then } 1 \text{ else } n * f(n - 1)$$
- همانطور که مشاهده می‌کنیم $f = G(f)$ بنابراین f یک نقطه ثابت برای تابع G است. حال برای به دست آوردن نقطه ثابت G عملگر نقطه ثابت Y را بر روی G اعمال می‌کنیم.
- بنابراین تابع فاکتوریل در واقع یک نقطه ثابت برای تابع G است. پس می‌توانیم بنویسیم:

$$\text{fact} \equiv YG$$

$$\text{fact } n = (YG)n$$

- برای مثال :

$$\begin{aligned}\text{fact } 2 &= (\text{YG})2 \\ &= G(\text{YG})2 \\ &= (\lambda f. \lambda n. \text{ if } n == 1 \text{ then } 1 \text{ else } n * f(n - 1))(\text{YG})2 \\ &= (\lambda n. \text{ if } n == 1 \text{ then } 1 \text{ else } n * (\text{YG})(n - 1))2 \\ &= \text{if } 2 == 1 \text{ then } 1 \text{ else } 2 * ((\text{YG})(2 - 1)) \\ &= 2 * ((\text{YG})1) \\ &= 2 * 1 \\ &= 2\end{aligned}$$

- قدیمی‌ترین زبان برنامه نویسی تابعی که هنوز هم استفاده می‌شود، زبان لیسپ¹ است که در سال ۱۹۵۹ توسط جان مک کارتی² در مؤسسه فناوری ماساچوست³ توسعه یافت.
- زبان لیسپ به مرور زمان تغییرات زیادی کرده است و نسخه‌های متعددی از آن توسعه داده شده‌اند. به جز نسخه اولیه که یک زبان تابعی خالص است، در بقیه نسخه‌ها مفاهیم برنامه نویسی دستوری نیز در زبان اضافه شده‌اند.

¹ Lisp

² John McCarthy

³ Massachusetts Institute of Technology (MIT)

- در زبان لیسپ تنها دو نوع داده وجود دارد : اتم‌ها¹ و لیست‌ها²
- هر یک از عناصر یک لیست از دو قسمت تشکیل شده است. قسمت اول محتوای داده‌ای عنصر را در بر می‌گیرد که در واقع یک اشاره‌گر به یک اتم یا یک اشاره‌گر به یک لیست دیگر است. قسمت دوم عنصر یک لیست می‌تواند اشاره‌گر به یکی از عناصر دیگر لیست یا مقدار تهی باشد. عناصر لیست توسط قسمت دوم هر عنصر به یکدیگر متصل شده‌اند.
- لیسپ به گونه‌ای طراحی شده بود که برای کاربردهای پردازش لیست بتواند مورد استفاده قرار بگیرد.
- لیست‌ها می‌توانند ساده³ یا تودرتو⁴ باشند.

¹ atoms

² lists

³ simple list

⁴ nested list

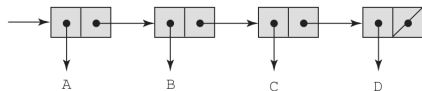
- لیست‌های ساده به صورت دنباله‌ای از اتم‌ها درون پرانتز می‌توانند توصیف شوند. برای مثال (A B C D) یک لیست ساده با چهار عنصر است.
- لیست‌های تودرتو نیز با افزودن لیست‌ها به عنوان عناصر لیست‌های دیگر توصیف می‌شوند. برای مثال (A (B C) D (E (F G))) یک لیست تودرتو با چهار عنصر است.

- در پیاده سازی لیسپ، لیست‌ها به صورت لیست‌های پیوندی¹ ساخته می‌شوند به طوری که اولین قسمت هر عنصر اشاره‌گر به داده آن عنصر و قسمت دوم عنصر برای تشکیل لیست پیوندی مورد استفاده قرار می‌گیرد.
- یک لیست توسط اشاره‌گری به اولین عنصر آن مشخص می‌شود و قسمت دوم آخرین عنصر لیست تهی² است.

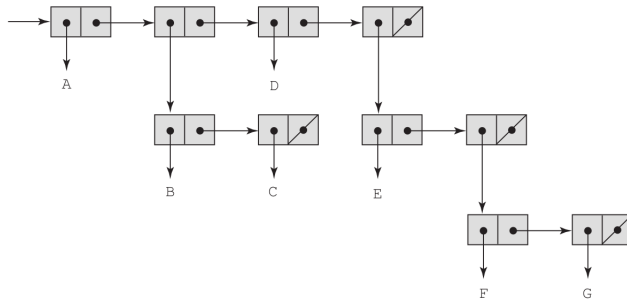
¹ linked list

² nil

- ساختار دو لیست در زبان لیسپ در شکل زیر نشان داده شده‌اند.



(A B C D)



(A (B C) D (E (F G)))

- در طراحی زبان لیسپ سعی شده است که قواعد نحوی همگن و ساده باشند تا بتوان توسط این زبان به راحتی محاسبه پذیری را مطالعه کرد، همان طور که محاسبه پذیری توسط ماشین تورینگ و حساب لامبدا استفاده می شود.
- بنابراین در زبان لیسپ فراخوانی توابع نیز مانند لیست ها درون پرانتز توصیف می شود. یک تابع به صورت `(function-name param-1 ... param-n)` فراخوانی می شود.
- برای مثال اگر + تابعی باشد که مقادیر عددی را با هم جمع می کند، می توانیم آن را به صورت `(+ 5 7)` فراخوانی کنیم.
- همچنین برای تعریف توابع از همین نشانه گذاری¹ استفاده می شود.
`(function-name (LAMBDA (param-1 ... param-n) expression))`

¹ notation

- زبان اسکیم¹ یکی از گویش‌های² زبان لیسپ است که در اواسط دهه ۱۹۷۰ در مؤسسه فناوری ماساچوست توسعه داده شد. در زبان اسکیم توابع می‌توانند عناصر یک لیست باشند یا به عنوان پارامتر به توابع دیگر ارسال شوند یا توسط توابع دیگر بازگردانده شوند.
- سادگی زبان اسکیم باعث شده است که این زبان در دانشگاه‌ها برای یادگیری برنامه نویسی تابعی مورد استفاده قرار بگیرد.

¹ scheme

² dialect

- در زبان اسکیم توابع ساده برای محاسبات عددی مانند جمع، تفریق، ضرب و تقسیم به صورت $+$ ، $-$ ، $*$ ، $/$ تعریف شده‌اند.
- توابع $*$ و $+$ می‌توانند تعداد صفر یا بیشتر پارامتر داشته باشند. اگر $*$ صفر پارامتر داشته باشد مقدار یک را بازمی‌گرداند و اگر $+$ صفر پارامتر داشته باشد مقدار صفر را بازمی‌گرداند.
- در عملیات تفریق همه پارامترها به جز پارامتر اول از مقدار پارامتر اول کم می‌شوند. به همین ترتیب در عملیات تقسیم پارامتر اول بر پارامترهای دوم به بعد تقسیم می‌شود.
- توابع دیگری برای محاسبات ریاضی تعریف شده‌اند از جمله `MODULO` ، `ROUND` ، `MAX` ، `MIN` ، `LOG` ، `SIN` ، `SQRT` و غیره.
- یک برنامه اسکیم مانند هر برنامه دیگر در زبان تابعی مجموعه‌ای از فراخوانی توابع است.

- یک تابع بدون نام با کلمه کلیدی LAMBDA می تواند تعریف شود که این تعریف یک عبارت لامبدا¹ نام دارد.
برای مثال :

۱ (LAMBDA (x) (*xx))

- این تابع یک ورودی دریافت می کند، بنابراین می توان آن را به صورت زیر با یک ورودی فراخوانی کرد :

۱ ((LAMBDA (x) (*xx)) 7)

- در این عبارت متغیر x به مقدار ۷ مقید شده است. پس از انقیاد مقدار یک متغیر، مقدار آن دیگر تغییر نمی کند.

¹ lambda expression

- با استفاده از کلمه کلیدی DEFINE می‌توان برای یک مقدار یا برای یک عبارت لامبدا، یک نام انتخاب کرد. در واقع کلمه DEFINE تنها مقادیر را نامگذاری می‌کند و نمی‌توان مقدار منتسب به اسامی را تغییر داد.
- با استفاده از عبارت تعریف می‌توان یک مقدار را به صورت (DEFINE symbol expression) نامگذاری کرد.
- برای مثال :

```
۱ (DEFINE pi 3.14159 )
```

- همچنین از عبارت تعریف، برای نامگذاری یک عبارت لامبدا نیز می‌توان استفاده کرد. در چنین مواقعی کلمه لامبدا حذف می‌شود. یک تابع لامبدا به صورت
`(expression) (DEFINE (function-name parameters) (expression))` نامگذاری می‌شود.
- برای مثال تابع محاسبه مربع را به صورت زیر تعریف می‌کنیم.

```
۱ (DEFINE (square number) (* number number) )
```

- سپس برای محاسبه مربع یک عدد می‌نویسیم `(square 5)` که مقدار ۲۵ را باز می‌گرداند.

- مثال یک تابع دیگر در زیر آمده است که از تابع مربع برای محاسبه وتر مثلث قائم الزاویه استفاده می‌کند.

```
۱ (DEFINE (hypotenuse side1 side2) (SQRT (+ (square side1)
۲                                     (square side2))))
```

- تابع مسندی یا گزاره‌ای ¹ تابعی است که یک مقدار منطقی (درست یا نادرست) باز می‌گرداند.
- اسکیم چندین تابع گزاره‌ای برای کار با مقادیر عددی دارد. از جمله $=$ ، $>$ ، $<$ ، $>=$ ، $<=$ برای برابری، بزرگتری، کوچکتی، بزرگتر یا برابری و کوچکتی یا برابری. همچنین توابع $ZERO?$ ، $ODD?$ ، $EVEN?$ تعیین می‌کنند آیا یک عدد زوج یا فرد یا صفر است یا خیر.
- مقادیر درست و نادرست در اسکیم به صورت $\#T$ و $\#F$ تعیین می‌شوند. همچنین یک لیست خالی در اسکیم برابر با مقدار نادرست است.
- توابع AND ، OR ، NOT برای عطف، فصل و نقیض به کار می‌روند.

¹ predicate function

- زبان اسکیم دارای دو ساختار کنترلی است. اولی تابع IF است که اگر مقدار پارامتر دوم آن درست باشد پارامتر سوم را باز می‌گرداند و در غیر این صورت پارامتر چهارم را باز می‌گرداند.
- بنابراین ساختار کنترل IF یک تابع به صورت (IF predicate then-expr else-expr) است.
- برای مثال تابع فاکتوریل را می‌توان به صورت زیر تعریف کرد :

```

۱ (DEFINE (factorial n)
۲   ( IF (<= n 1) 1 (* n (factorial (- n 1))) )
۳ )

```

- همچنین تابع COND یک ساختار کنترلی دیگر است که برای انتخاب یک گزینه از بین چندین گزینه استفاده می‌شود. اولین گزینه‌ای که مقدار آن برابر درست است محاسبه و بازگردانده می‌شود.
- تابع COND به صورت زیر تعریف می‌شود.

```
۱ ( COND      (pred-1 expr-1)
۲             (pred-2 expr-2)
۳             ...
۴             (pred-n expr-n)
۵             [(else expr)]
۶ )
```

- برای مثال تابع زیر تعیین می‌کند آیا یک سال کبیسه است یا خیر.

```
۱ (DEFINE (leap? year)
۲   (COND
۳     ((ZERO? (MODULO year 400 )) #T)
۴     ((ZERO? (MODULO year 100 )) #F)
۵     ((ELSE (ZERO? (MODULO year 4))))
۶   )
۷ )
```

– یک برنامه اسکیم توسط تابع EVAL ارزیابی و اجرا می‌شود. تابع EVAL با هر تابعی که مواجه می‌شود، ابتدا پارامترهای آن را ارزیابی می‌کند و سپس خود تابع را ارزیابی و محاسبه می‌کند. توجه کنید که پارامترهای یک تابع می‌توانند خود فراخوانی توابع دیگر باشند که ابتدا باید محاسبه شوند. برای مثال فرض کنید تابع افزایش یک واحد را به صورت زیر تعریف کنیم.

```
\ (DEFINE (inc n) (+ n 1))
```

– حال فراخوانی زیر را در نظر بگیرید:

```
\ (inc (inc 3))
```

– در اینجا ابتدا پارامتر تابع اول که (inc 3) است ارزیابی شده و مقدار ۴ بازگردانده می‌شود. سپس تابع اول به صورت (inc 4) ارزیابی شده و مقدار ۵ بازگردانده می‌شود.

– این برنامه را به صورت زیر می‌توان ارزیابی کرد.

```
\ EVAL (inc (inc 3))
```

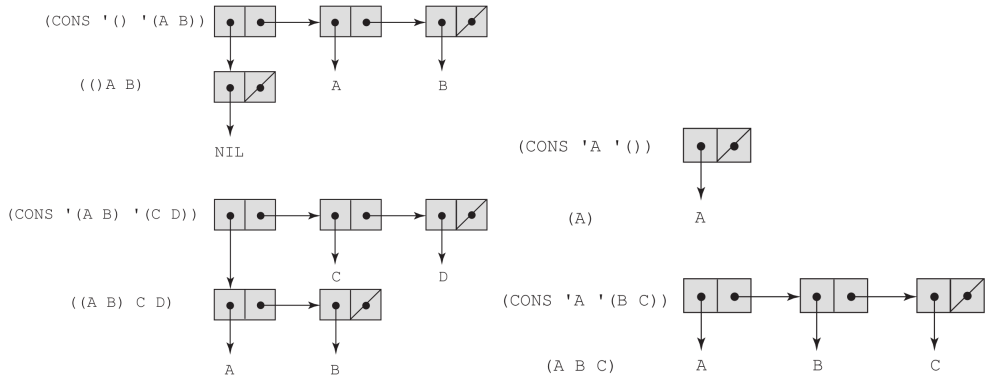
- حال فرض کنید در هنگام محاسبات، نمی‌خواهیم پارامترهای یک تابع ارزیابی و محاسبه شوند، بلکه می‌خواهیم پارامترها به عنوان لیست و اتم در نظر گرفته شوند.
- برای جلوگیری از ارزیابی شدن یک پارامتر در اسکیم از تابع `QUOTE` استفاده می‌شود. این تابع مقدار ورودی را بدون هیچ تغییری بازمی‌گرداند.
- برای مثال `(QUOTE A)` مقدار `A` را بازمی‌گرداند و `(QUOTE (A B C))` مقدار `(A B C)` را بازمی‌گرداند.
- فراخوانی `(QUOTE (inc (inc 3)))` مقدار `(inc (inc 3))` را بازمی‌گرداند، در صورتی که فراخوانی `(inc (inc 3))` مقدار `۵` را بازمی‌گرداند.

- از آنجایی که در موارد زیادی نیاز به استفاده از تابع QUOTE می‌باشد، یک مخفف برای این تابع ساخته شده است که علامت آپوستروف (') است. بنابراین به جای (QUOTE (A B)) می‌توان نوشت (A B) ' .
- برای مثال فراخوانی (inc (inc 3)) ' مقدار (inc (inc 3)) را باز می‌گرداند، در صورتی که فراخوانی (inc (inc 3)) مقدار ۵ را باز می‌گرداند.

- برای پردازش لیست‌ها سه تابع در اسکیم وجود دارد که عبارتند از CAR، CDR و CONS. تابع CAR اولین عنصر یک لیست را بازمی‌گرداند. تابع CDR همهٔ لیست به جز عنصر اول را بازمی‌گرداند.
 - برای مثال ((A B) C) مقدار (CAR ' ((A B) C)) بازمی‌گرداند. (CAR ' A) خطا می‌دهد زیرا A یک لیست نیست و همچنین (CAR ' ()) خطا می‌دهد چون یک لیست تهی عنصر اولیه ندارد. فراخوانی ((CDR ' ((A B) C D)) مقدار (C D) را بازمی‌گرداند و ((CDR ' (A)) مقدار لیست تهی () را بازمی‌گرداند.
 - می‌توان تابعی به صورت زیر تعریف کرد که عنصر دوم یک لیست را بازمی‌گرداند.
-
- ۱) (DEFINE (second lst) (CAR (CDR lst)))
-

- توابعی نیز در اسکیم وجود دارند که ترکیب توابع CAR و CDR هستند.
- برای مثال (CADDR x) برابر است با ((CAR (CDR (CDR x)))) که چهارمین عنصر لیست را بازمی‌گرداند.
- همه ترکیب‌های A و D تا چهار حرف به صورت تابع تعریف شده‌اند.
- تابع CONS برای ساختن یک لیست جدید با افزودن یک مقدار به ابتدای یک لیست استفاده می‌شود.
- برای مثال ((CONS 'A (B C)) مقدار (A B C) بازمی‌گرداند. همچنین ((CONS '(A B) (C D)) مقدار (A B C D) را بازمی‌گرداند.

- در شکل زیر نحوه کار عملگر CONS نشان داده شده است.



- برای ساختن یک لیست توسط تعدادی اتم با استفاده از تابع CONS لازم است هر کدام از اتم‌ها را به طور مجزا لیست اضافه کنیم.
- برای مثال ((CONS 'apple (CONS 'orange (CONS 'grape '())))) لیستی از سه عنصر باز می‌گرداند.
- روش دیگر استفاده از دستور LIST است که تعداد دلخواهی عنصر را به صورت لیست در می‌آورد.
- برای مثال (LIST 'apple 'orange 'grape) لیست (apple orange grape) را باز می‌گرداند.
- در اسکیم می‌توان برای تساوی دو مقدار از تابع EQV? استفاده کرد. تابع LIST? بررسی می‌کند ورودی یک لیست است یا خیر. همچنین تابع NULL? بررسی می‌کند آیا یک لیست تهی است یا خیر.

- تابعی بنویسید که بررسی کند آیا یک اتم متعلق به یک لیست است یا خیر.
- برای مثال $(\text{member } 'B' (A \ B \ C))$ مقدار #T و $(\text{member } 'B' (A \ C \ D))$ مقدار #F را باز می‌گرداند.

- در برنامه نویسی رویه‌ای معمولاً با استفاده از یک حلقه این کار را انجام می‌دهیم.
- در برنامه نویسی تابعی حلقه‌ها با استفاده از توابع بازگشتی توصیف می‌شوند.

```
۱ (DEFINE (member atm lst)
۲     (COND
۳         ((NULL? lst) #F)
۴         ((EQ? atm (CAR lst)) #T)
۵         (ELSE (member atm (CDR lst)))
۶     )
۷ )
```

- تابعی بنویسید که دو لیست ساده را دریافت کرده و بررسی کند آیا دو لیست برابر هستند یا خیر. لیست ساده لیستی است که اعضای آن فقط اتم هستند.

```
۱ (DEFINE (equalsimp list1 list2)
۲   (COND
۳     ((NULL? list1) (NULL? list2))
۴     ((NULL? list2) #F)
۵     ((EQ? (CAR list1) (CAR list2))
۶       (equalsimp (CDR list1) (CDR list2)))
۷   (ELSE #F)
۸ )
۹ )
```

- تابعی بنویسید دو لیست معمولی را دریافت کند و بررسی کند آیا با یکدیگر برابرند یا خیر. دو لیست معمولی می‌توانند شامل اتم‌ها یا لیست‌های دیگر باشند.

```
۱  DEFINE (equal list1 list2)
۲      (COND
۳          ((NOT (LIST? list1)) (EQ? list1 list2))
۴          ((NOT (LIST? list2)) #F)
۵          ((NULL? list1) (NULL? list2))
۶          ((NULL? list2) #F)
۷          ((equal (CAR list1) (CAR list2))
۸              (equal (CDR list1) (CDR list2)))
۹      (ELSE #F)
۱۰  )
۱۱  )
```

- برنامه‌ای بنویسید که یک لیست را به یک لیست دیگر اضافه کند.

- برای مثال

```
(append '(A B) '(C D R))
```

لیست (A B C D R) را بازمی‌گرداند و

```
(append '((A B) C) '(D (E F)))
```

لیست ((A B) C D (E F)) را بازمی‌گرداند.

```
۱ (DEFINE (append list1 list2)
۲   (COND
۳     ((NULL? list1) list2)
۴     (ELSE (CONS (CAR list1) (append (CDR list1) list2))))
۵   )
۶ )
```

- تابع LET یک حوزه تعریف محلی می‌سازد که در آن یک نام به یک مقدار انتساب داده می‌شود.
- معمولاً از تابع LET وقتی استفاده می‌کنیم که یک عبارت طولانی و پیچیده می‌شود و در نتیجه نیاز داریم قسمتی از عبارت را به صورت جداگانه با استفاده از یک نام تعریف کنیم.
- مقدار این اسامی را نمی‌توان تغییر داد، زیرا در برنامه نویسی تابعی تعریف متغیر وجود ندارد. تعریف متغیر باعث ایجاد حالت¹ می‌شود، در حالی که برنامه نویسی تابعی بدون حالت² است.

¹ state

² stateless

- برای مثال فرض کنید می‌خواهیم ریشه یک معادله درجه دو را با استفاده از تابعی محاسبه کنیم. معادله درجه دو به صورت $ax^2 + bx + c$ است که ریشه‌های آن $-b/2a + \sqrt{b^2 - 4ac})/2a$ و $-b/2a - \sqrt{b^2 - 4ac})/2a$ هستند.

```
۱ (DEFINE (quadratic_roots a b c)
۲   (LET (
۳     (root_part_over_2a
۴       (/ (SQRT (- (* b b) (* 4 a c))) (* 2 a)))
۵     (minus_b_over_2a (/ (- 0 b) (* 2 a)))
۶   )
۷   (LIST (+ minus_b_over_2a root_part_over_2a)
۸         (- minus_b_over_2a root_part_over_2a))
۹   )
۱۰ )
```

- با استفاده از LET می‌توانیم عباراتی همانند عبارت لامبدا بنویسیم وقتی لامبدا بر روی مقداری اعمال می‌شود.

```
۱ (LET ((alpha 7)) (* 5 alpha))  
۲ ((LAMBDA (alpha) (* 5 alpha)) 7)
```

- به یک تابع بازگشتی از آخر¹ گفته می‌شود، اگر فراخوانی تابع بازگشتی آن آخرین فراخوانی در تابع باشد.
- تابع member را که قبلاً پیاده سازی کردیم در نظر بگیرید.

```

۱ (DEFINE (member atm a_list)
۲   (COND
۳     ((NULL? a_list) #F)
۴     ((EQ? atm (CAR a_list)) #T)
۵     (ELSE (member atm (CDR a_list))))
۶   )
۷ )

```

- آخرین فراخوانی در این تابع، فراخوانی بازگشتی است و کامپایلر نیازی به نگهداری مقادیر فراخوانی‌های متعدد در این فراخوانی بازگشتی ندارد و آخرین فراخوانی بازگشتی مقدار نهایی تابع را به دست می‌دهد.

¹ tail recursive

- حال تابع فاکتوریل را در نظر بگیرید

```
۱ (DEFINE (factorial n)
۲   (IF (<= n 1)
۳     1
۴     ( * n (factorial (- n 1))))
۵ )
۶ )
```

- آخرین فراخوانی در این تابع، فراخوانی تابع ضرب است. پس برای محاسبه فاکتوریل کامپایلر نیاز دارد مقادیر همه فراخوانی‌های بازگشتی را نگه دارد تا پس از اتمام فراخوانی‌های بازگشتی به عقب بازگردد و مقدار نهایی را محاسبه کند.

- توابع بازگشتی از آخر سرعت بیشتری دارند و برنامه نویسان بهتر است سعی کنند توابع بازگشتی را به صورت بازگشتی از آخر بنویسند.
- برای مثال تابع فاکتوریل را می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد.

```
۱ (DEFINE (fact n factval)
۲   (IF (<= n 1)
۳     factval
۴     (fact(- n 1) (* n factval)))
۵   )
۶ )
۷
۸ (DEFINE (factorial n) (fact n 1))
```

- تابع فاکتوریل بازگشتی از آخر را در زبان پایتون می‌توان به صورت زیر نوشت.

```
۱ def fact(n, factval) :  
۲     if n<=1 :  
۳         return factval  
۴     else :  
۵         return fact(n-1,n*factval)  
۶  
۷ def factorial(n) :  
۸     return fact(n,1)
```

- فرض کنید می‌خواهیم با استفاده از دو تابع f و g تابع $h(x) = f(g(x))$ را محاسبه کنیم. می‌توانیم این مقدار را به طور دستی محاسبه کنیم. برای مثال

```
۱ (DEFINE (g x) (* 3 x))
۲ (DEFINE (f x) (+ 2 x))
۳ (DEFINE (h x) (+ 2 (* 3 x)))
```

- برای ترکیب¹ دو تابع می‌توانیم تابعی به نام `compose` به صورت زیر بنویسیم:

```
۱ (DEFINE (compose f g) (LAMBDA (x) (f (g x))))
```

¹ compose

- حال می‌توانیم ترکیب دو تابع را بر روی یک مقدار ورودی اعمال کنیم.

```
۱ (DEFINE (g x) (* 3 x))  
۲ (DEFINE (f x) (+ 2 x))  
۳ (DEFINE (compose f g) (LAMBDA (x) (f (g x))))  
۴ ((compose f g) 6)
```

- همچنین می‌توانیم از ترکیب دو تابع یک تابع تعریف کنیم.

```
۱ (DEFINE (h x) ((compose f g) x))  
۲ (h 6)
```

- به عنوان مثال دیگر با استفاده از ترکیب توابع به صورت زیر می‌توانیم سومین عنصر یک لیست را محاسبه کنیم.

```
۱ (DEFINE (third a_list)
۲   ((compose CAR (compose CDR CDR)) a_list))
```

- این تابع معادل تابع CADDR است.

- یکی از توابع مهم در برنامه نویسی تابعی، تابع نگاشت¹ است. این تابع یک تابع و یک لیست را به عنوان ورودی می‌گیرد و آن تابع را بر روی همه عناصر لیست اعمال می‌کند.
- به عبارت دیگر تابع map عملیات زیر را انجام می‌دهد.

```

۱ (DEFINE (map fun a_list)
۲   (COND
۳     ((NULL? a_list) '())
۴     (ELSE (CONS (fun (CAR a_list)) (map fun (CDR a_list)))))
۵   )
۶ )

```

¹ map

- برای مثال فرض کنید می‌خواهیم همهٔ عناصر یک را به توان ۳ برسانیم. می‌توانیم بنویسیم:

```
\ (map (LAMBDA (num) (* num num num)) '(3 4 2 6))
```

که لیست (27 64 8 216) را باز می‌گرداند.

- مفسر اسکیم در واقع یک تابع است به نام EVAL که یک برنامه اسکیم را دریافت می‌کند و مقدار آن را محاسبه می‌کند. در واقع EVAL بر روی کل برنامه اعمال می‌شود و سپس هرکدام از اجزای آن به طور بازگشتی ارزیابی می‌شوند.
- برنامه نویسان اسکیم نیز می‌توانند از تابع EVAL استفاده کنند.

- فرض کنید می‌خواهیم برنامه‌ای بنویسیم که عناصر یک لیست را با هم جمع کند. می‌توانیم تابعی به صورت زیر تعریف کنیم.

```
۱ (DEFINE (adder a_list)
۲   (COND
۳     ((NULL? a_list) 0)
۴     (ELSE (+ (CAR a_list) (adder (CDR a_list)))))
۵   )
۶ )
```

- این تابع به طور بازگشتی به صورت زیر محاسبات را انجام می‌دهد.

```
۱ (adderr '(3 4 5))  
۲ (+ 3 (adderr (4 5)))  
۳ (+ 3 (+ 4 (adderr (5))))  
۴ (+ 3 (+ 4 (+ 5 (adderr ())))))  
۵ (+ 3 (+ 4 (+ 5 0)))  
۶ (+ 3 (+ 4 5))  
۷ (+ 3 9)  
۸ (12)
```

- با استفاده از تابع EVAL می‌توانیم این تابع را با استفاده از تابع عملگر + تعریف کنیم.

```
۱ (DEFINE (adder a_list)
۲   (COND
۳     ((NULL? a_list) 0)
۴     (ELSE (EVAL (CONS '+ a_list))))
۵   )
۶ )
```

- بنابراین تابع به صورت زیر محاسبه می‌شود.

```
۱ (adder '(3 4 5))
۲ (EVAL (+ 3 4 5))
۳ (12)
```

- امال¹ یکی دیگر از زبان‌های برنامه نویسی تابعی است. تفاوت آن با لیسپ و اسکیم در این است که یک زبان نوع دهی قوی است بدین معنی که نوع همه داده‌ها در زمان کامپایل مشخص می‌شود.

- در زبان امال یک تابع به صورت `fun function-name (parameters) = expression` تعریف می‌شود.

- نوع‌ها اگر به صورت صریح تعیین نشده باشند، به صورت ضمنی توسط کامپایلر تشخیص داده می‌شوند برای مثال تابع زیر مقدار اعشاری `real` باز می‌گرداند.

```
\ fun circumf (r) = 3.14159 * r * r ;
```

¹ ML

- می‌توانیم نوع بازگشتی یک تابع و یا نوع پارامترهای آن را نیز به صورت زیر مشخص کنیم.

```
۱ fun square (x) : real = x * x ;
۲ fun square (x : real) = x * x ;
```

- در زبان امال ساختار کنترلی if-then-else نیز وجود دارد.

- به طور مثال تابع فاکتوریل به صورت زیر محاسبه می‌شود.

```
۱ fun fact ( n : int ) : int    = if    n <= 1 then 1
۲                               else    n * fact (n-1) ;
```

- یک تابع می‌تواند با استفاده از چند پارامتر متنوع به صورت‌های متفاوت تعریف شود. تعاریف متفاوت یک تابع با استفاده از علامت (|) از یکدیگر جدا می‌شوند.
- برای مثال فاکتوریل را می‌توان به صورت زیر نیز تعریف کرد :

```
۱ fun fact (0) = 1
۲ | fact (1) = 1
۳ | fact (n : int) : int = n * fact (n - 1);
```

- در زبان لیسپ و اسکیم، اولین عنصر لیست را با استفاده از تابع CAR جدا می‌کنیم. در زبان امال این کار توسط عملگر (::) انجام می‌شود.
- برای مثال طول یک لیست را به صورت زیر می‌توانیم محاسبه کنیم.

```
\ fun length ([ ]) = 0
۲ | length ( h :: t ) = 1 + length(t);
```

- برنامه‌ای بنویسید که دو لیست را به یکدیگر الحاق کند.

```
۱ fun append ([ ] , list2) = list2
۲ | append ( h :: t , list2) = h :: append (t , list2);
```

- با استفاده از کلمه کلیدی `val` می‌توان یک نام را به یک مقدار مقید کرد. البته مقدار را نمی‌توان بعد از انقیاد تغییر داد. این انقیاد مقدار به نام معمولاً برای ساده کردن عبارات به کار می‌رود.

- برای مثال :

```
۱ let val radius = 2.7
۲     val pi = 3.14159
۳ in pi * radius * radius
۴ end;
```

- توابع لامبدا در امال توسط کلمه `fn` تعریف می‌شوند. برای مثال $x < 100 \Rightarrow fn(x)$ یک تابع لامبدا است که اگر ورودی آن کوچکتر از ۱۰۰ باشد مقدار درست را بازمی‌گرداند.

- تابع فیلتر دو ورودی می‌گیرد. ورودی اول آن یک تابع است که مقدار درست یا نادرست باز می‌گرداند و ورودی دوم آن یک لیست است. تابع فیلتر هر یک از اعضای لیست را به عنوان ورودی به تابع ورودی آن می‌دهد. اگر تابع مقدار درست به ازای آن عنصر لیست بازگرداند، آن عضو به لیست خروجی تابع فیلتر افزوده می‌شود.
- برای مثال :

```
۱ val lst = List.filter ( fn(x) => x<100 )  
۲ [25, 1, 50, 710, 100, 7, 160, 3] ;  
۳ -- lst = [25, 1, 50, 7, 3]
```

- تابع نگاشت تابع مهم دیگری است که دو ورودی می‌گیرد و یک لیست بازمی‌گرداند. ورودی اول آن یک تابع و ورودی دوم آن یک لیست است. تابع نگاشت تابع ورودی خود را بر روی همهٔ اعضای لیست ورودی اعمال می‌کند و به عنوان لیست خروجی بازمی‌گرداند.

- برای مثال :

```
۱ val lst = List.map (fn x => x * x * x) [1, 3, 5]
۲ -- lst = [1, 27, 125]
```

- می‌توانیم از تابع نگاشت به صورت زیر نیز استفاده کنیم :

```
۱ fun cube x = x * x * x ;
۲ val cubList = List.map cube ;
۳ val list = cubList [1, 3, 5] ;
```

- توابع امال همانند عملگر لامبدا در حساب لامبدا عمل می‌کنند. هر تابع فقط یک ورودی می‌گیرد.
- وقتی ورودی‌های یک تابع با علامت ویرگول جدا می‌شوند، در واقع امال ورودی‌ها را به عنوان یک ورودی چندتایی¹ در نظر می‌گیرد.
- اگر ورودی‌ها با ویرگول جدا نشود، امال به ازای هر ورودی یک تابع می‌سازد و ورودی بعدی را بر روی تابع ساخته شده اعمال می‌کند.

¹ tuple

- برای مثال تابع زیر را در نظر بگیرید :

```
۱ fun add a b = a + b ;
```

- این تابع را می‌توانیم با یک ورودی یا دو ورودی فراخوانی کنیم. اگر تابع با دو ورودی فراخوانی شود، حاصل جمع محاسبه می‌شود، اما اگر تابع با یک ورودی فراخوانی شود، یک تابع بازگردانده می‌شود. برای مثال اگر عبارت `add 4` فراخوانی شود، تابع `add4` به صورت زیر ساخته می‌شود.

```
۱ fun add4 b = 4 + b ;
```

- سپس می‌توانیم مقدار ۶ را به تابع `add4` به عنوان ورودی ارسال کنیم که مقدار ۱۰ حاصل می‌شود.

- همچنین می‌توانیم تابعی به صورت زیر تعریف کنیم:

```
۱ val addfour = add 4 ;
۲ val res = addfour 6;
۳ -- res = 10
```

- زبان هسکل همانند ام‌ال یک زبان نوع دهنده قوی است به این معنی که نوع‌ها قبل از اجرای برنامه مشخص می‌شوند.
- هسکل یک زبان تابعی خالص است بدین معنی که عبارات حالت برنامه را تغییر نمی‌دهند (در ام‌ال امکان تعریف متغیر وجود دارد که باعث ایجاد حالت می‌شوند). به عبارت دیگر می‌گوییم در هسکل هیچ دستوری اثر جانبی¹ ایجاد نمی‌کند.
- تابع فاکتوریل را در هسکل می‌توان به صورت زیر تعریف کرد.

```
۱  :{  
۲  fact 0 = 1  
۳  fact 1 = 1  
۴  fact n = n * fact (n - 1)  
۵  :}
```

¹ side effect

- در هسکل توابع می‌توانند ورودی‌ها با نوع‌های متفاوت بگیرند.
- برای مثال در تابع `Square x = x * x` نوع `x` می‌تواند بسته به استفاده از تابع صحیح یا اعشاری باشد.
- عملگرهایی برای کار با لیست‌ها وجود دارند که در برنامه زیر به برخی از آنها اشاره شده است :

```

۱  5 : [2, 7, 9]           -- results in  [5, 2, 7, 9]
۲  [1, 3 .. 11]           -- results in  [1, 3, 5, 7, 9, 11]
۳  [1, 3, 5] ++ [2, 4, 6] -- results in  [1, 3, 5, 2, 4, 6]

```

- عملگر : برای افزودن یک عنصر به لیست، عملگر `..` برای تعریف لیست‌های طولانی با یک الگوی معین، و عملگر `++` برای افزودن دو لیست به یکدیگر استفاده می‌شوند.

- در هسکل ورودی یک تابع بر روی تعریف انطباق داده می‌شود. به عبارت دیگر می‌گوییم اعمال تابع بر اساس تطبیق الگو¹ صورت می‌گیرد.
- برای مثال برنامه زیر را در نظر بگیرید :

```

۱  :{
۲  prod [] = 1
۳  prod (a : x) = a * prod x
۴  :}
```

- لیست ورودی تابع یا خالی است که بر روی الگوی اول تطبیق داده می‌شود، و یا دارای حداقل یک عنصر است که بر روی الگوی دوم تطبیق داده شده و توسط عملگر (:) در فرایند تطبیق الگو اولین عنصر لیست جدا می‌شود.

¹ pattern matching

برنامه زیر را در نظر بگیرید :

```
۱  :{  
۲  tell [] = "The list is empty"  
۳  tell (x:[]) = "The list has one element: " ++ show x  
۴  tell (x:y:[]) = "The list has two elements: "  
۵                      ++ show x ++ " and " ++ show y  
۶  tell (x:y:_) = "This list is long. The first two elements are: "  
۷                      ++ show x ++ " and " ++ show y  
۸  :}
```

- وقتی تابع tell با یک ورودی فراخوانی می‌شود، ورودی بر روی یکی از حالات تعریف شده تطبیق داده می‌شود.
- عملگر ++ برای الحاق دو رشته یا دو لیست استفاده می‌شود. در تطبیق الگو کاراکتر زیرخط _ برای تطبیق هرگونه الگویی به کار می‌رود.

- در هسکل می‌توان لیست‌ها را به روشی به نام شمول کامل لیست¹ ایجاد کرد.
- برای مثال در زیر لیستی از همه اعداد بین ۱ تا ۵۰ به توان ۳ ایجاد شده است.

```
\ [n * n * n | n <- [1 .. 50]]
```

- تابع زیر به ازای عدد داده شده n لیست مقسوم علیه‌های آن را تولید می‌کند.

```
\ factor n = [ i | i <- [1 .. n 'div' 2], n 'mod' i == 0]
```

¹ List comprehension

- یک زبان برنامه نویسی دارای مکانیزم ارزیابی کندرو¹ یا فراخوانی به هنگام نیاز است، اگر همه محاسبات را در هنگام فراخوانی انجام ندهد، بلکه محاسبات را به زمانی موکول کند که به آنها نیاز پیدا می‌شود.
- بر خلاف ارزیابی کندرو، در ارزیابی تندرو²، محاسبات به محض فراخوانی انجام می‌شوند.
- برای مثال فرض کنید تابع h دو عدد به عنوان ورودی دریافت می‌کند. فرض کنید این دو ورودی را به صورت خروجی دو تابع $f(x)$ و $g(y)$ به تابع h ارسال کنیم. در ارزیابی تندرو، ابتدا هر دو ورودی f و g محاسبه می‌شوند و سپس مقادیر خروجی دو تابع به تابع h ارسال می‌شوند. در ارزیابی کندرو، اگر به ورودی دوم نیاز نباشد (برای مثال ورودی دوم در یک بلوک شرطی قرار داشته باشد و اجرا نشود)، در اینصورت تابع ورودی دوم ارزیابی نمی‌شود که باعث صرفه جویی در زمان می‌شود.

¹ lazy evaluation

² eager evaluation

- مکانیزم ارزیابی کندرو باعث می‌شود بتوان عبارتهایی را بیان کرد که در زبان‌هایی با ارزیابی تندرو قابل بیان نیستند. برای مثال یک لیست با تعداد نامحدود عنصر را می‌توان در یک زبان با ارزیابی کندرو تعریف کرد. ولی در عمل تنها قسمتی از لیست محاسبه می‌شود که به آن نیاز است.
- بنابراین در زبان هسکل که دارای مکانیزم ارزیابی کندرو است، می‌توان لیست‌هایی به صورت زیر تعریف کرد.

```

۱ poisitive = [0 ..]
۲ evens    = [2, 4 ..]
۳ squares = [n * n | n < - [0 ..] ]

```

- همه این لیست‌ها دارای تعداد نامحدودی از مقادیر هستند ولی با تعریف آنها مقدار آنها محاسبه نمی‌شود، چرا که در غیر این‌صورت برنامه پایان ناپذیر می‌شد. بلکه تنها قسمتی از این لیست‌ها محاسبه می‌شود که به آنها نیاز است.

- تابع بررسی عضویت یک عنصر در یک لیست را در زبان هسکل در نظر بگیرید :

```

۱  :{
۲  member    b [ ]    =  False
۳  member    b ( a : x )  =  ( a == b ) || member b x
۴  :}
```

- علامت `||` نمایانگر یای منطقی است. پس تابع درست را بر می گرداند، اگر اولین عنصر لیست برابر با مقدار `b` باشد و یا اینکه مقدار `b` در باقیمانده لیست باشد.

- حال فراخوانی `squares 16 member` را در نظر بگیرید. از آنجایی که لیست `squares` دارای تعداد نامحدودی عنصر است، این لیست تنها به مقداری محاسبه می شود که نتیجه فراخوانی به دست بیاید.

- فرض کنید در یک برنامه، تابع f وجود دارد که تابع g را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و می‌خواهیم مقدار $f(g(x))$ را محاسبه کنیم. حال فرض کنید که g مقدار زیادی داده تولید می‌کند و f باید این داده‌ها را به ترتیب پردازش کند.
- در یک زبان برنامه نویسی با ارزیابی تدریجی، f باید صبر کند تا g همه داده‌ها را پردازش کند و تنها پس از اتمام پردازش g ، تابع f می‌تواند محاسبات را آغاز کند.
- اما در یک زبان با ارزیابی کندرو، به محض آماده شدن تعدادی از مقادیر توسط g ، تابع f آغاز به کار می‌کند چرا که داده‌های مورد نیاز را به دست آورده است. این مکانیزم باعث افزایش راندمان برنامه می‌شود. همچنین g ممکن است تابعی باشد که پایان ناپذیر است ولی به محض اینکه f مقدار مورد نیاز را به دست آورد محاسبات پایان می‌پذیرد.
- قطعاً چنین مکانیزمی بدون سربار و هزینه نخواهد بود. چنین انعطاف پذیری در یک زبان نیاز به توصیف معنایی پیچیده‌تر و همچنین پیاده سازی‌های پیچیده‌تر کامپایلر دارد که باعث می‌شود سرعت اجرای برنامه‌ها نیز کاهش پیدا کند.

- پایتون زبانی است که پارادایم (الگوواره) های متعددی از جمله برنامه نویسی رویه‌ای، شیء‌گرا و تابعی را پشتیبانی می‌کند. در یک برنامه ممکن است قسمت‌های مختلف به روش‌های مختلف نوشته شوند. مثلاً برای پردازش لیست‌ها برنامه نویسی تابعی و برای طراحی ساختار داده‌ها و طراحی گرافیکی، برنامه نویسی شیء‌گرا می‌تواند مورد استفاده قرار بگیرد.
- همانطور که گفته شد، در برنامه نویسی تابعی ورودی برنامه به مجموعه‌ای از توابع ارسال می‌شود و هر تابع بر روی ورودی‌های خود عمل می‌کند و خروجی تولید می‌کند. در برنامه نویسی تابعی آثار جانبی¹ وجود ندارد بدین معنی که تابع حالت داخلی² ندارد و اینگونه نیست که خروجی تابع وابسته به حالت داخلی تابع باشد. پس خروجی تابع تنها وابسته به ورودی آن است. بنابراین هیچ ساختاری در یک زبان برنامه نویسی خالص نمی‌تواند وجود داشته باشد که مقدارش تغییر کند و به روز رسانی شود یا به عبارت دیگر دارای حالت باشد.

¹ side effect

² internal state

- برخی از زبان‌های برنامه نویسی تابعی، انتساب را ممنوع کرده‌اند تا از آثار جانبی جلوگیری کنند. اما در زبان پایتون انتساب وجود دارد و اگر بخواهیم به روش برنامه نویسی تابعی خالص برنامه نویسی کنیم باید در نظر داشته باشیم که خروجی تابع به حالت متغیرهای سیستم بستگی نداشته باشد. برای مثال از متغیرهای عمومی یا ایستا در روش برنامه نویسی تابعی نمی‌توان استفاده کرد.
- برنامه نویسی تابعی می‌تواند چندین مزیت داشته باشد که از جمله آنها می‌توان به اثبات پذیری رسمی¹ برنامه، ماژولار² بودن برنامه‌ها، و سهولت تست³ نام برد.

¹ formal provability

² modularity

³ ease of test

- هدف از اثبات رسمی برنامه‌ها، این است که به صورت ریاضی بدون آزمایش و خطا اثبات شود که برنامه درست است. معمولاً برنامه نویسان با تست کردن برنامه‌ها توسط تعداد زیادی داده به این نتیجه می‌رسند که برنامه عملکرد درستی دارد اما ممکن است هنوز داده‌هایی باشند که برنامه برای آنها نتیجه نادرست تولید کند. در اثبات رسمی برنامه برای هر تابع اثبات می‌شود به ازای یک محدود از داده‌ها با ویژگی‌های معین، نتایج مورد نظر تولید می‌شود. البته از روش‌های اثبات درستی برای برنامه‌های بزرگ نمی‌توان استفاده کرد چرا که بسیار طولانی هستند، اما به فهم بهتر برنامه کمک خواهند کرد.
- مزیت دیگر برنامه نویسی تابعی در این است که برنامه‌ها به واحدهای کوچکتر یعنی توابع شکسته می‌شوند و راحت‌تر می‌توان برنامه را بررسی کرد و متغیر داد.
- همچنین تست کردن برنامه‌های تابعی بسیار ساده است چرا که کافی است نشان دهیم هر تابع نتیجه مورد نظر را تولید می‌کند و هیچ تابعی به حالت سیستم بستگی ندارد، پس درستی یک تابع درستی برنامه را نتیجه می‌دهد.

- از ویژگی مهم برنامه نویسی تابعی می‌توان به دریافت تابع به عنوان آرگومان توابع و بازگرداندن تابع از توابع دیگر اشاره کرد. همچنین از لیست‌ها در برنامه نویسی تابعی به کثرت استفاده می‌شود. همه این ویژگی‌ها در زبان پایتون وجود دارد. لیست‌ها به عنوان یکی از انواع داده‌ای اصلی در پایتون استفاده می‌شوند و همچنین توابع را می‌توان به صورت لامبدا یا بدون نام و همچنین به صورت تابع نامگذاری شده به توابع دیگر به عنوان ورودی ارسال کرد. توابع می‌توانند تابع نیز بازگردانند.

- یکی از ویژگی‌های برنامه‌نویسی تابعی این است که می‌توان به توابع تابع ارسال کرد و از توابع تابع بازگرداند.
- در پایتون نیز می‌توان به یک تابع، یک تابع به عنوان ورودی ارسال کرد. برای مثال فرض کنید می‌خواهیم لیستی را مرتب کنیم. اما مرتب کردن لیست می‌تواند بر اساس معیارهای متفاوت صورت بگیرد. معیار مرتب سازی را می‌توانیم به صورت یک تابع به تابع مرتب‌سازی ارسال کنیم، تا مرتب‌سازی با استفاده از آن صورت بگیرد.

```
۱ def get_length(word):  
۲     return len(word)  
۳ words = ['apple', 'banana', 'cherry', 'date', 'strawberry']  
۴ sorted_words = sorted(words, key=get_length)  
۵ print(sorted_words)  
۶ # ['date', 'apple', 'banana', 'cherry', 'strawberry']
```

- همچنین می‌توان از یک تابع تابع بازگرداند.

- برای مثال فرض کنید می‌خواهیم تابعی تعریف کنیم که بر اساس رشته ورودی (که مازولی است که در آن خطا رخ داده است) تابعی تولید کند که آن تابع یک پیام خطا به همراه زمان ایجاد خطا تولید کند.

```
۱ def error(module):  
۲     return lambda message : "In Module " + module + " ["  
۳         + datetime.now().strftime("%m/%d/%Y, %H:%M:%S")  
۴         + " ] : " + message  
۵ e = error("Test")  
۶ e("wrong number")  
۷ # 'In Module Test [11/28/2023, 08:09:06 ] : wrong number'
```

- در زبان پایتون می‌توان همانند هسکل از روش شمول کامل لیست¹ برای تولید لیست‌ها استفاده کرد.
- برای مثال :

```
۱ seq1 = 'a12'  
۲ seq2 = (1, 2, 3)  
۳ lst = [ (x,y) for x in seq1 for y in seq2 if x != str(y)]  
۴ # lst = [('a',1),('a',2),('a',3),('1',2),('1',3),('2',1),('2',3)]
```

¹ List comprehension

- عبارت مولد¹ در پایتون به صورت زیر توصیف می‌شوند.

```
۱ (expression for expr1 in seq1 if cond1
۲     for expre2 in seq2 if cond2
۳     ...
۴     for expreN in seqN if condN)
```

¹ generator expression

- در برنامه نویسی رویه‌ای، عبارات مولد به صورت زیر نوشته می‌شود که خوانایی پایین‌تری دارد و همچنین زمان بیشتری برای نوشتن برنامه صرف می‌شود:

```
۱ for expr1 in seq1 :  
۲     if not (cond1) :  
۳         continue  
۴     for expr2 in seq2 :  
۵         if not (cond2) :  
۶             continue  
۷         ...  
۸     for exprN in seqN :  
۹         if not (condN) :  
۱۰             continue  
۱۱         ...  
۱۲         # Output the value of the expression.
```

- پیمایشگرها¹ اشیائی هستند که جریانی از داده‌ها را نشان می‌دهند. بر روی لیست‌ها می‌توان پیمایشگرهایی را داشت که عناصر یک لیست را پیمایش می‌کنند. توسط تابع `iter()` می‌توان یک پیمایشگر از یک لیست تولید کرد.
- برای مثال :

```

۱ L = [1, 2, 3]
۲ it = iter (L)
۳ n = next (it)      # n = 1
۴ n = next (it)      # n = 2

```

¹ iterator

- چندین تابع مهم وجود دارند که در برنامه نویسی تابعی بسیار مورد استفاده قرار می‌گیرند که در اینجا به آنها اشاره می‌کنیم.

- تابع نگاشت یک تابع و یک پیمایشگر را به عنوان ورودی دریافت می‌کند و تابع ورودی را بر روی عناصری که پیمایشگر تولید می‌کند اعمال می‌کند.

- برای مثال :

```

۱ def upper (s) :
۲     return s.upper()
۳ list (map (upper, ['a', 'b']))
۴ # ['A', 'B']
۵ list (map (sum, [[1, 2], [3, 4]]))
۶ # [3, 7]
```

- تابع نگاشت را می‌توان با استفاده از شمول کامل لیست نیز به صورت زیر نوشت :

```

۱ [s.upper() for s in ['a', 'b']]
```

- تابع فیلتر یک تابع را به عنوان ورودی اول و یک پیمایشگر را به عنوان ورودی دوم می‌گیرد. تابع ورودی باید مقدار منطقی درست یا نادرست بازگرداند. به ازای هر یک از عناصر تولید شده توسط پیمایشگر اگر مقدار خروجی درست بود، تابع فیلتر آن عنصر را در خروجی درج می‌کند.
- برای مثال :

```
۱ def is_even(x):  
۲     return (x % 2) == 0  
۳ list (filter (is_even, range(10)))  
۴ # [0, 2, 4, 6, 8]
```

- تابع فیلتر را می‌توان با استفاده از شمول کامل لیست نیز به صورت زیر نوشت :

```
۱ [x for x in range (10) if x % 2 == 0]
```

- تابع any در صورتی که یکی از عناصر لیست ورودی آن درست باشد مقدار درست بازمی‌گرداند و تابع all در صورتی که همه عناصر لیست ورودی آن درست باشد، مقدار درست بازمی‌گرداند.

۱	any ([0,1,0])	#True
۲	any ([0,0,0])	#False
۳	all ([0,1,1])	#False
۴	all ([1,1,1])	#True

- تابع zip یک عنصر از هر یک از پیمایشگرهای ورودی خود می‌گیرد و آنها را به صورت یک چندتایی درمی‌آورد.

```
۱ list (zip ( ['a','b'] , [1,2,3] ) )  
۲ # [ ('a',1) , ('b',2) ]
```

- تابع کاهش، یک تابع به عنوان ورودی اول خود و یک پیمایشگر به عنوان ورودی دوم می‌گیرد. سپس تابع را بر روی هر یک از عناصر پیمایشگر اعمال می‌کند و خروجی تابع در هر گام اعمال را به عنوان ورودی تابع در گام بعد استفاده می‌کند.
- بنابراین تابع ورودی در تابع کاهش باید دو ورودی داشته باشد.

```
۱ from functools import reduce
۲ def add(a,b) : return a+b
۳ reduce (add , ['A','BB','C'])
۴ # 'ABBC'
۵ reduce (add , [1,2,3,4])
۶ # 10
```

- همچنین تابع کاهش می‌تواند یک مقدار اولیه به عنوان سومین پارامتر دریافت کند.

```
۱ def mul(a,b) : return a*b
۲ reduce (mul , [1,2,3,4] , 1)
۳ # 24
```

- توابع بدون نام لامبدا با استفاده از کلمه lambda نوشته می‌شوند.

```
۱ adder = lambda a,b : a+b
۲ reduce(lambda a,b : a+b , [1,2,3,4] )
۳ # 10
۴ list (map (lambda x : x ** 3 , [2,4,6,8]))
۵ # [8,64,216,512]
```

- در طراحی زبان راست از برنامه نویسی تابعی بسیار تأثیر گرفته شده است.
- در برنامه نویسی تابعی توابع می‌توانند به عنوان پارامتر ورودی به توابع دیگر ارسال شوند و همچنین توابع می‌توانند توابعی را بازگردانند. همچنین در برنامه نویسی تابعی متغیر وجود ندارد، زیرا متغیرها باعث ایجاد حالت می‌شوند. در زبان راست نیز در حالت عادی با کلمه `let` می‌توان نماد تعریف کرد و اگر نیاز به متغیر بود باید به طور صریح با کلمه `mut` اعلام شود.
- در زبان راست به توابعی که می‌توان در متغیر ذخیره کرد بستار¹ گفته می‌شود. برای پیمایش و پردازش دنباله‌ها نیز از پیمایشگرها² استفاده می‌شود.
- بستارها در زبان راست در واقع توابع بی‌نام هستند که می‌توانند در یک متغیر ذخیره شوند یا به عنوان آرگومان به پارامترهای یک تابع ارسال شوند. برخلاف توابع که فقط به پارامترهای خود دسترسی دارند، بستارها می‌توانند به متغیرهای حوزه تعریف خود نیز دسترسی داشته باشند.

¹ closure

² iterator

- بستارها در راست در واقع همان توابع لامبدا در زبان‌های دیگر هستند.

- بستار را می‌توان به شکل‌های زیر با توجه به صریح و ضمنی بودن ورودی و خروجی آن تعریف کرد.

```
۱ fn add_one_v1    (x: u32) -> u32 { x + 1 }
۲ let add_one_v2 = |x: u32| -> u32 { x + 1 };
۳ let add_one_v3 = |x|           { x + 1 };
۴ let add_one_v4 = |x|           x + 1 ;
```

- اگر نوع داده‌های ورودی و خروجی بستار به طور صریح مشخص نشده باشند، در اولین فراخوانی کامپایلر برای آنها نوع تعیین می‌کند.

```
۱ let example_closure = |x| x;  
۲ let s = example_closure(String::from("hello"));  
۳ let n = example_closure(5); //error: x is String
```

- یک بستار می‌تواند به متغیر هایی در حوزهٔ تعریف خود دسترسی داشته باشد که این دسترسی به سه نوع می‌تواند وجود داشته باشد : قرض گرفتن بدون تغییر¹ ، قرض گرفتن با تغییر² و گرفتن مالکیت³

¹ borrowing immutably

² borrowing mutably

³ taking ownership

- در مثال زیر بستار مقدار متغیری را که از حوزه تعریف گرفته¹ تغییر نمی‌دهد، پس دسترسی به صورت قرض گرفتن بدون تغییر است.

```

۱ fn main() {
۲     let list = vec![1, 2, 3];
۳     println!("Before defining closure: {:?}", list);
۴     let only_borrows = || println!("From closure: {:?}", list);
۵     println!("Before calling closure: {:?}", list);
۶     only_borrows();
۷     println!("After calling closure: {:?}", list);
۸ }

```

¹ cature

- در برنامه زیر بستار متغیر تسخیر شده¹ را تغییر می‌دهد، پس دسترسی به صورت قرض گرفتن با تغییر است.

```
۱ fn main() {  
۲     let mut list = vec![1, 2, 3];  
۳     println!("Before defining closure: {:?}", list);  
۴     let mut borrows_mutably = || list.push(7);  
۵     borrows_mutably();  
۶     println!("After calling closure: {:?}", list);  
۷ }
```

¹ captured variable

- توجه کنید که بعد از تعریف بستار و قبل فراخوانی آن متغیر مرجعی تعریف شده که به لیست اشاره می‌کند پس نمی‌توانیم از `println!` استفاده کنیم چرا که این تابع مرجع تغییر ناپذیر تعریف می‌کند که با این اختلاف قوانین تعریف مرجع و قوانین قرض گرفتن است.

- وقتی می‌خواهیم مالکیت یک متغیر را به بستار انتقال بدهیم، از کلمه `move` استفاده می‌کنیم.
- برای مثال وقتی می‌خواهیم یک ریشه¹ کنترلی بسازیم، باید مالکیت را انتقال دهیم.

```
۱ use std::thread;
۲ fn main() {
۳     let list = vec![1, 2, 3];
۴     println!("Before defining closure: {:?}", list);
۵     thread::spawn(move || println!("From thread: {:?}", list))
۶         .join()
۷         .unwrap();
۸ }
```

¹ thread

- فرض کنید در مثال قبل مالکیت لیست به ریشه داده نشود. در این صورت، ممکن است تابع `main` زودتر از ریشه به اتمام برسد در اینصورت در زمان اتمام، حافظه `list` را آزاد می‌کند و دسترسی ریشه به متغیر `list` غیر مجاز خواهد بود.
- اگر مالکیت متغیر تسخیر شده به ریشه انتقال داده نشود، کامپایلر پیام خطا صادر می‌کند که برای جلوگیری از خطر احتمالی توصیف شده است.

- در راست برای بسیاری از ساختارهای داده پیمایشگر پیاده سازی شده است. از پیمایشگرها به صورت زیر استفاده می‌کنیم.

```
۱ let v1 = vec![1, 2, 3];  
۲ let v1_iter = v1.iter();  
۳ for val in v1_iter {  
۴     println!("Got: {}", val);  
۵ }
```

- همچنین تابع `next` یک پیمایشگر را مصرف می‌کند، بدین معنی که مقدار بعدی پیمایشگر را می‌خواند و از صف پیمایش آن را دور می‌ریزد.

```
۱ fn iterator_demonstration() {  
۲     let v1 = vec![1, 2, 3];  
۳     let mut v1_iter = v1.iter();  
۴     assert_eq!(v1_iter.next(), Some(&1));  
۵     assert_eq!(v1_iter.next(), Some(&2));  
۶     assert_eq!(v1_iter.next(), Some(&3));  
۷     assert_eq!(v1_iter.next(), None);  
۸ }
```

- تابع `sum` را می‌توان بر روی یک پیمایشگر فراخوانی کرد: این تابع مجموع همهٔ مقادیر در پیمایشگر را با هم جمع می‌کند و پیمایشگر را مصرف می‌کند.

```
۱ fn iterator_sum() {  
۲     let v1 = vec![1, 2, 3];  
۳     let v1_iter = v1.iter();  
۴     let total: i32 = v1_iter.sum();  
۵     assert_eq!(total, 6);  
۶ }
```

- تابع نگاشت یا map بر روی یک پیمایشگر فراخوانی می‌شود و یک تابع دریافت می‌کند و تابع دریافتی را بر روی همه مقادیر پیمایشگر اعمال می‌کند و در نهایت یک پیمایشگر باز می‌گرداند.

```
۱ let v1: Vec<i32> = vec![1, 2, 3];  
۲ let v2: Vec<_> = v1.iter().map(|x| x + 1).collect();  
۳ assert_eq!(v2, vec![2, 3, 4]);
```

- تابع فیلتر یا filter بر روی پیمایشگر تعریف شده است به طوری که یک تابع دریافت می‌کند که مقدار منطقی باز می‌گرداند. تابع دریافتی بر روی عناصر پیمایشگر اعمال می‌شود و عناصری که به ازای آنها مقدار درست بازگردانده شده است جمع‌آوری و بازگردانده می‌شوند.

- برای مثال :

```
۱ struct Shoe {  
۲     size: u32,  
۳     style: String,  
۴ }  
۵ fn shoes_in_size(shoes: Vec<Shoe>, shoe_size: u32) -> Vec<Shoe> {  
۶     shoes.into_iter().filter(|s| s.size == shoe_size).collect()  
۷ }
```

```
۱ fn filters_by_size() {  
۲     let shoes = vec![  
۳         Shoe {  
۴             size: 10,  
۵             style: String::from("sneaker"),  
۶         },  
۷         Shoe {  
۸             size: 13,  
۹             style: String::from("sandal"),  
۱۰        },  
۱۱        Shoe {  
۱۲            size: 10,  
۱۳            style: String::from("boot"),  
۱۴        },  
۱۵    ];  
۱۶    let in_my_size = shoes_in_size(shoes, 10);  
۱۷ }
```

- نشان داده شده است که استفاده از پیمایشگرها و روش برنامه نویسی تابع از استفاده از حلقه در زبان راست سریع تر است.
- به عبارت دیگر این ساختارهای انتزاعی مانند نگاشت و فیلتر به صورت بهینه پیاده سازی شده اند و نمی توان آنها را به طور دستی بهینه تر پیاده سازی کرد.

برنامه نویسی تابعی

- به طور کلی گفته می‌شود برنامه نویسی تابعی چندین برتری نسبت به برنامه نویسی رویه‌ای دارد. یکی اینکه توصیف معنایی آن به دلیل ساختار ساده‌تری که دارد ساده‌تر است و دیگر آنکه اثبات درستی برنامه‌های آن آسان‌تر است.
- برخی بر این باورند که برنامه نویسی رویه‌ای برای برنامه نویسان راحت‌تر است ولی کسانی که برنامه نویسی را به صورت تابعی از ابتدا یاد گرفته‌اند بر این باورند که سختی برنامه نویسی تابعی به دلیل عادت نداشتن به آن است.
- برنامه نویسان تابعی معتقدند به دلیل اینکه برنامه‌ها توسط برنامه نویسی تابعی کوتاه‌تر و مختصرتر است راندمان برنامه نویسی در آن بالاتر است.
- همچنین در حال حاضر کامپایلرهای سریعی برای زبان‌های تابعی وجود دارد که با کامپایلرهای زبان‌های رویه‌ای و شیء‌گرا قابل مقایسه‌اند.

برنامه نویسی تابعی

- برنامه‌های تابعی به دلیل اختصار آنها برای خواندن نیز ساده‌ترند. برای مثال برنامه زیر به زبان سی را با معادل آن در هسکل مقایسه کنید

```
۱ int sum_cubes (int n) {  
۲     int sum = 0 ;  
۳     for (int index = 1 ; index <= n ; index ++)  
۴         sum += index * index * index ;  
۵     return sum ;  
۶ }
```

```
۱ sumCubes n = sum (map (^3) [1 .. n])
```

- همچنین از آنجایی که توابع در زبان‌های تابعی از یکدیگر مستقل هستند و حالت داخلی وجود ندارد اجرای آنها به صورت موازی توسط کامپایلر ساده‌تر است.