

به نام خدا

ساختمان داده

آرش شفيعی



درهم سازی

- الگوریتم‌ها ممکن است نیاز داشته باشند عملیات متعددی بر روی مجموعه‌های پویا انجام دهند. بسیاری از الگوریتم‌ها نیاز دارند تنها عملیات درج، حذف و جستجو انجام دهند. مجموعه‌ای پویا که این عملیات را پشتیبانی کند دیکشنری¹ نامیده می‌شود.
- برای مثال در یک کامپایلر جدولی به نام جدول علائم وجود دارد که متغیرها و ویژگی‌های آنها را ذخیره می‌کند. برای ذخیره‌سازی متغیرهای یک برنامه و ویژگی‌های آن متغیرها از دیکشنری استفاده می‌کنیم.

¹ dictionary

- جدول درهم سازی¹ یک ساختار داده کارا برای پیاده سازی دیکشنری است.
- اگرچه پیچیدگی زمانی جستجوی یک عنصر در جدول درهم سازی می تواند در بدترین حالت مانند جستجو در یک لیست پیوندی یعنی $\Theta(n)$ باشد، اما با تعدادی پیش فرض می توان جستجوی یک عنصر در جدول درهم سازی را در زمان $O(1)$ انجام داد.
- نوع داده ای دیکشنری در زبان پایتون توسط جداول درهم سازی پیاده سازی شده است.
- درواقع جدول درهم سازی مفهوم آرایه ها را تعمیم می دهد تا جستجو در مجموعه پویا همانند دسترسی به یک عنصر در آرایه در زمان $O(1)$ انجام شود.
- ایده اصلی جدول درهم سازی این است که اندیس یک مکان در آرایه، که حاوی یک مقدار کلید است، از طریق مقدار کلید آن با استفاده از روشی که توضیح خواهیم داد، محاسبه می شود.

¹ hash table

– آدرس دهی مستقیم¹ یک روش ساده است که وقتی مجموعه مرجع کلیدها (U) کوچک باشد می تواند مورد استفاده قرار بگیرد.

¹ direct addressing

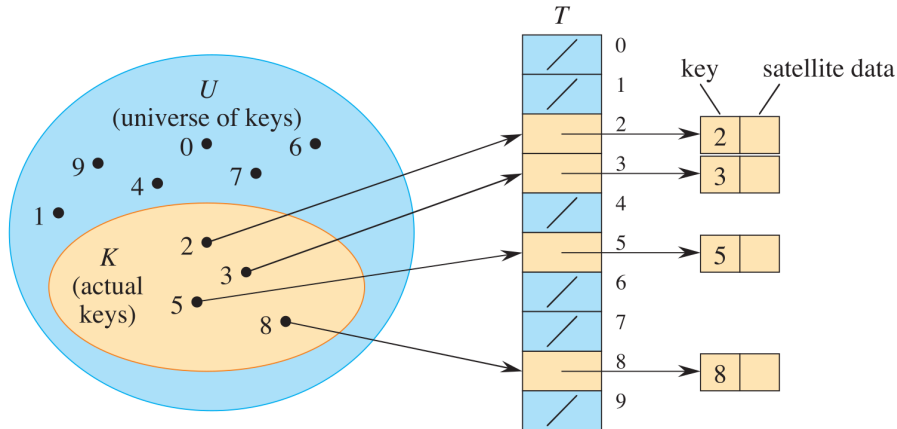
- فرض کنید برنامه‌ای می‌خواهد از یک مجموعهٔ پویا استفاده کند که کلیدهای عناصر آن یکتا بوده و زیر مجموعه‌ای از مجموعهٔ مرجع¹ $U = \{0, 1, \dots, m-1\}$ هستند به طوری که m عدد بسیار بزرگی نیست.
- برای ذخیره‌سازی این مجموعه پویا، می‌توانیم از یک آرایه استفاده کنیم که به آن جدول آدرس دهی مستقیم گفته می‌شود. این آرایه را با $T[0 : m-1]$ نمایش می‌دهیم. هریک از مکان‌های آن (که به آن اسلات² نیز گفته گفته می‌شود) به یکی از کلیدها در مجموعهٔ مرجع U اختصاص دارد.

¹ universal set (universe)

² slot

جداول آدرس دهی مستقیم

- شکل زیر این روش را نمایش می دهد. مکان k به عنصری اشاره می کند که مقدار کلید آن k است. اگر مجموعه هیچ عنصری با کلید k نداشته باشد، آنگاه خواهیم داشت $T[k] = \text{NIL}$.



- همه توابع جستجو Direct-Address-Search و درج Direct-Address-Insert و حذف Direct-Address-Delete در زیر نشان داده شده اند که هر کدام در زمان $O(1)$ انجام می شوند.

Algorithm Direct Address Search

```
function DIRECT-ADDRESS-SEARCH(T,k)
1: return T[k]
```

Algorithm Direct Address Insert

```
function DIRECT-ADDRESS-INSERT(T,x)
1: T[x.key] = x
```

Algorithm Direct Address Delete

– **function** DIRECT-ADDRESS-DELETE(T, x)

1: $T[x.key] = \text{NIL}$

جداول درهم سازی

- اگر مجموعه مرجع U بسیار بزرگ یا نامحدود باشد، ذخیره سازی جدول T به اندازه $|U|$ غیر عملی یا حتی غیرممکن است.
- علاوه بر این، مجموعه k از کلیدهایی که واقعا ذخیره شده اند ممکن است نسبت به مجموعه مرجع U بسیار کوچک باشد و در نتیجه بیشتر فضایی که به T تخصیص داده شده است ممکن است هدر رود.
- وقتی مجموعه k یعنی کلیدهای ذخیره شده در دیکشنری بسیار کوچک تر از مجموعه مرجع U یعنی تمام کلیدهای ممکن باشد، جداول درهم سازی کمک می کنند که فضای بسیار کوچک تری نسبت به جدول آدرس دهی مستقیم اشغال شود.
- پیچیدگی حافظه با استفاده از جداول درهم سازی به $\Theta(|k|)$ کاهش پیدا می کند و پیچیدگی زمانی جستجو همچنان $O(1)$ باقی می ماند.

جداول درهم‌سازی

- در آدرس‌دهی مستقیم یک عنصر با کلید k در مکان k ذخیره می‌شود، اما در جداول درهم‌سازی از یک تابع درهم‌سازی h^1 استفاده می‌کنیم تا مکان کلید k را محاسبه کنیم و بنابراین کلید k در مکان $h(k)$ قرار می‌گیرد. تابع درهم‌سازی h مجموعه مرجع U را به مکان‌های جدول درهم‌سازی $T[0 : m - 1]$ نگاشت می‌کند.

$$h : U \rightarrow \{0, 1, \dots, m - 1\}$$

- در اینجا m اندازه جدول درهم‌سازی است که معمولاً بسیار کوچک‌تر از اندازه U است.

- می‌گوییم عنصر با کلید k به مکان $h(k)$ نگاشت می‌شود ².

- همچنین می‌گوییم $h(k)$ مقدار نگاشت شده یا مقدار هش ³ برای کلید k است.

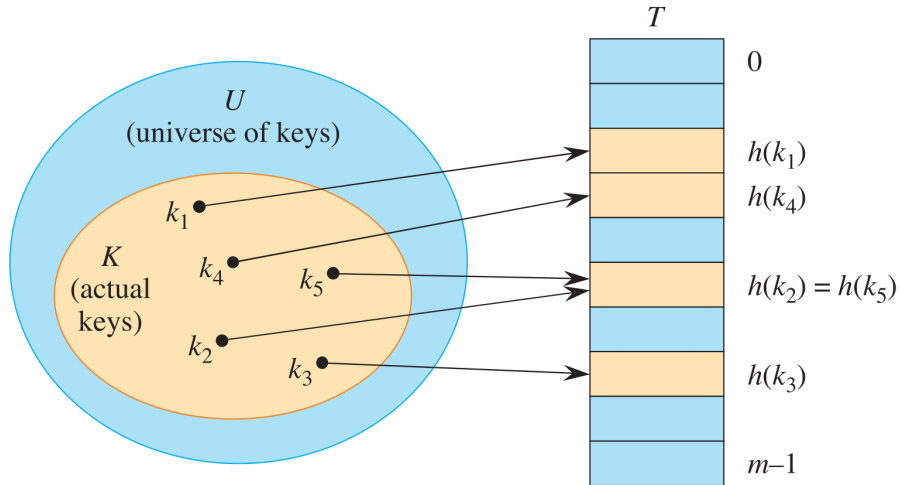
¹ hash function

² k hashes to slot $h(k)$

³ hash value

جداول درهم سازی

- ایده اصلی جدول درهم سازی در زیر نشان داده شده است.



- تابع درهم سازی محدوده اندیس های آرایه را کاهش می دهد و بنابراین اندازه آرایه مورد نیاز برای ذخیره کاهش پیدا می کند، در نتیجه به جای استفاده از جدولی به اندازه $|U|$ از جدولی به اندازه m استفاده می کنیم.
- یک مثال بسیار ساده از تابع درهم سازی تابع $h(k) = k \bmod m$ است.

- مشکلی که ممکن است در فرایند محاسبه تابع درهم‌سازی به وجود آید این است که دو کلید به یک مکان حافظه نگاشت شوند. به چنین وضعیتی برخورد یا تصادم¹ گفته می‌شود.
- روش‌های کارایی برای حل مشکل تصادم وجود دارد.
- در شرایط ایده‌آل هیچ تصادمی نباید رخ دهد و تلاش می‌کنیم تابع درهم‌سازی را به نحوی انتخاب کنیم که تصادم حداقل شود.

¹ collision

- تابع درهم‌سازی باید قطعی¹ باشد به طوری که به ازای ورودی k همیشه خروجی $h(k)$ را تولید کند.
- از آنجایی که $|U| > m$ بنابراین امکان تصادم وجود دارد. بنابراین اگرچه یک تابع درهم‌سازی خوب تعداد تصادم‌ها را کاهش می‌دهد، اما همچنان امکان تصادم وجود دارد و باید روشی برای برطرف کردن تصادم به کار ببریم.
- در ادامه در مورد توابع درهم‌سازی و همچنین روش‌های برخورد با تصادم صحبت خواهیم کرد.

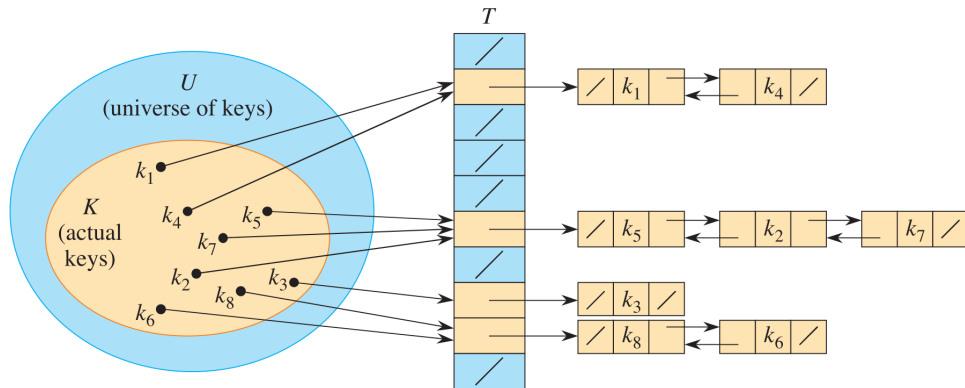
¹ deterministic

- درهم سازی مستقل یکنواخت¹ : یک تابع درهم سازی ایده آل h به ازای هر ورودی k در دامنه U خروجی $h(k)$ را مستقلا به طور یکنواخت از محدوده $\{0, 1, \dots, m-1\}$ انتخاب می کند.
- مستقل بدین معناست که نگاشت یک کلید به کلیدهای دیگر بستگی ندارد و یکنواخت بدین معناست که یک کلید با احتمال یکسان می تواند به هر یک از خانه های جدول درهم سازی نگاشت شود.
- وقتی مقدار $h(k)$ انتخاب شد، هر فراخوانی بعدی h با ورودی k همان مقدار $h(k)$ را تولید می کند.
- تابعی که چنین ویژگی هایی داشته باشد را یک تابع درهم سازی مستقل یکنواخت² می نامیم.

¹ independent uniform hashing

² independent uniform hash function

- رفع تصادم با روش زنجیرسازی: شکل زیر ایده اصلی روش زنجیرسازی¹ برای رفع تصادم را نشان می‌دهد.



¹ chaining

- هر مکان غیرتهی در جدول به یک لیست پیوندی اشاره می‌کند و همه عناصری که به یک مکان نگاشت می‌شوند وارد لیست پیوندی آن مکان می‌شوند.
- مکان z یک اشاره‌گر به ابتدای یک لیست پیوندی دارد که همه عناصری که به مکان z نگاشت می‌شوند را نگهداری می‌کند. اگر هیچ عنصری به مکان z نگاشت نشده باشد، مکان z تهی است و مقدار NIL را نگهداری می‌کند.
- اگر از چنین روشی برای رفع تصادم استفاده کنیم عملیات دیکشنری به صورت زیر پیاده‌سازی خواهند شد.

Algorithm Chained Hash Insert

```
function CHAINED-HASH-INSERT(T,x)
1: List-Prepend (T[h(x.key)],x)
```

Algorithm Chained Hash Search

– **function** CHAINED-HASH-SEARCH(T, k)
1: **return** List-Search ($T[h(k)], k$)

Algorithm Chained Hash Delete

function CHAINED-HASH-DELETE(T, x)
1: List-Delete ($T[h(x.key)], x$)

- زمان اجرای عملیات درج در بدترین حالت $O(1)$ است. عملیات درج سریع است زیرا فرض می کنیم عنصر x که می خواهیم درج کنیم در جدول وجود ندارد. بدون وجود این فرض، قبل از درج باید جستجو کنیم که آیا $x.key$ در لیست پیوندی وجود دارد یا خیر.
- زمان اجرای عملیات جستجو در بدترین حالت متناسب با طول لیست است که این زمان اجرا را دقیق تر مورد بررسی قرار خواهیم داد.
- زمان اجرای عملیات حذف $O(1)$ است اگر لیست های پیوندی دو طرفه باشند. اگر لیست یک طرفه باشد، برای پیدا کردن عنصر قبلی عنصری که می خواهیم حذف کنیم، باید لیست را پیمایش کنیم. از آنجایی که تابع حذف یک اشاره گر x به عنصر مورد نظر دریافت می کند و نه مقدار کلید آن را، بنابراین نیازی به جستجو نیست.

- تحلیل درهم سازی با روش زنجیر سازی : به ازای جدول درهم سازی T شامل m مکان که n عنصر را ذخیره می کند، ضریب بار α^1 برای T را به صورت n/m تعریف می کنیم که تعداد میانگین عناصر ذخیره شده در یک زنجیره است. ضریب بار α می تواند کمتر، مساوی یا بیشتر از یک باشد.
- در بدترین حالت همه n کلید در یک مکان جدول ذخیره می شوند که در واقع لیستی به طول n می سازند. زمان اجرا در بدترین حالت برای جستجو $\Theta(n)$ است به علاوه زمان مورد نیاز برای محاسبه تابع درهم سازی.
- کارایی درهم سازی در حالت میانگین بستگی به این دارد که تابع درهم سازی h چگونه مجموعه n کلید را در m مکان توزیع می کند.

¹ load factor

- فرض کنید به ازای $j = 0, 1, \dots, m-1$ طول لیست $T[j]$ برابر با n_j باشد. بنابراین خواهیم داشت $n = n_0 + n_1 + \dots + n_{m-1}$ و مقدار مورد انتظار¹ برای n_j برابر با $E[n_j] = \alpha = n/m$ است.
- فرض می کنیم زمان $O(1)$ برای محاسبه مقدار هش $h(k)$ کافی است و بنابراین زمان لازم برای جستجوی یک مقدار با کلید k به طول $n_{h(k)}$ از لیست $T[h(k)]$ بستگی دارد.

¹ expected value

- در یک جدول درهم سازی که تصادم با زنجیر سازی رفع می شود، یک جستجوی ناموفق به طور متوسط در زمان $\Theta(1 + \alpha)$ انجام می شود.
- با فرض بر این که درهم سازی مستقل و یکنواخت است، هر کلید k که هنوز در جدول ذخیره نشده است، می تواند با احتمال یکنواخت در هر یک از m مکان جدول ذخیره شود. زمان مورد نیاز برای یافتن کلیدی که در جدول وجود ندارد یعنی برای جستجوی ناموفق کلید k برابر با زمان مورد انتظار آن $E[n_{h(k)}] = \alpha$ است.
- بنابراین تعداد عناصر بررسی شده در یک جستجوی ناموفق برابر با α است و کل زمان مورد نیاز (شامل زمان محاسبه $h(k)$) برابر با $\Theta(1 + \alpha)$ است.

جداول درهم سازی

- بنابراین پیچیدگی زمانی جستجو در جدول درهم سازی که در آن تصادم با زنجیر سازی رفع می شود، در بدترین حالت برابر با $\Theta(1 + \alpha)$ است.
- این تحلیل بدین معناست که اگر تعداد عناصر در جدول متناسب با تعداد مکان های جدول درهم سازی باشد، داریم $n = O(m)$ و $\alpha = n/m = O(m)/m = O(1)$.
- بنابراین جستجو به طور میانگین در زمان ثابت انجام می شود. از آنجایی که درج در بدترین حالت در زمان $O(1)$ و حذف در بدترین حالت در زمان $O(1)$ انجام می شود، وقتی لیست دو طرفه باشد، بنابراین همه عملیات دیکشنری به طور متوسط در زمان $O(1)$ انجام می شوند.
- تحلیل ارائه شده تنها وقتی معتبر است که درهم سازی یکنواخت و مستقل باشد. یکنواخت بودن بدین معناست که کلیدها با احتمال برابر در هریک از m مکان نگاشت می شود و مستقل بودن بدین معناست که وابستگی بین کلیدها در محاسبه مقدار درهم سازی وجود ندارد.

توابع درهم‌سازی

- برای اینکه درهم‌سازی خوبی داشته باشیم نیاز به یک تابع درهم‌سازی خوب داریم.
- یک تابع درهم‌سازی خوب باید به طور کارا قابل محاسبه باشد، و کلیدها را به طور یکنواخت در جدول درهم‌سازی توزیع کند.
- یک تابع درهم‌سازی خوب بر اساس فرض درهم‌سازی یکنواخت مستقل عمل می‌کند بدین معنا که در آن هر کلید با احتمال یکسان به هر کدام از m مکان جدول نگاشت می‌شود مستقل از این که بقیه کلیدها به چه مکانی نگاشت شده‌اند.
- اگر بدانیم کلیدها اعداد تصادفی حقیقی k هستند که به طور یکنواخت و مستقل در محدوده $0 \leq k < 1$ توزیع شده‌اند، آنگاه تابع درهم‌سازی $h(k) = [km]$ یک تابع یکنواخت و مستقل خواهد بود.
- اما معمولاً دسترسی به توزیع احتمالی کلیدهای ورودی نداریم.

- در عمل، یک تابع درهم‌سازی برای نوع داده‌های زیر طراحی می‌شود:

- (۱) کلیدهای که اعداد صحیح غیر منفی کوچک هستند و در w بیت جای می‌گیرند. معمولاً مقدار w برابر با ۳۲ یا ۶۴ است. (اگر کلید ۳۲ بیتی باشد، مقدار آن می‌تواند بین ۰ تا ۴۲۹۴۹۶۷۲۹۵ باشد.)
- (۲) کلیدهایی که یک وکتور کوچک از اعداد صحیح غیر منفی هستند که هر کدام اندازه محدودی دارند. برای مثال، هر عنصر وکتور می‌تواند ۸ بیت باشد. یک وکتور را در این حالت یک رشته نیز می‌نامیم.

- درهم سازی ایستا¹ از یک تابع درهم سازی ثابت استفاده می کند.
- در اینجا در مورد سه روش استاندارد برای درهم سازی ایستا صحبت می کنیم که روش تقسیم، ضرب، و ضرب-انتقال نام دارند.
- در عمل به جای درهم سازی ایستا از درهم سازی تصادفی استفاده می شود که کارایی بالاتری دارد، اما درهم سازی ایستا پایه ای برای یادگیری مفاهیم درهم سازی است.

¹ static hashing

درهم سازی ایستا

- روش تقسیم: در روش تقسیم¹ برای ساختن یک تابع درهم سازی کلید k را به یکی از m مکان، با محاسبه باقیمانده k بر m نگاشت می کنیم. بنابراین تابع درهم سازی برابر است با $h(k) = k \bmod m$.
- برای مثال، اگر اندازه جدول درهم سازی $m = 12$ باشد و کلید مورد نظر $k = 100$ باشد، آنگاه $h(k) = 4$ است. از آنجایی که تنها عملیات مورد نیاز تقسیم است، روش تقسیم روش نسبتاً سریعی است.
- روش تقسیم وقتی m یک عدد اول باشد که به اعداد توان ۲ نزدیک نباشد خوب عمل می کند. اما به ازای ورودی ها با الگوهای خاص ممکن است کارایی خوبی نداشته باشد.
- اگر m عدد اول نباشد، به ازای برخی از الگوهای کلیدهای ورودی، کلیدها به طور یکنواخت توزیع نمی شوند. برای مثال اگر m برابر با ۶ باشد و همه اعداد ورودی مضرب ۳ باشند، اعداد تنها در دو خانه جدول درهم سازی قرار می گیرند. در صورتی که اگر m برابر با ۷ باشد چنین مشکلی به وجود نمی آید.

¹ division method

- روش ضرب : روش ضرب¹ برای ساخت تابع درهم سازی در دو گام عمل می کند. ابتدا، مقدار کلید k را در یک ثابت A در محدوده $0 < A < 1$ ضرب می کند و قسمت اعشاری kA را استخراج می کند. سپس مقدار به دست آمده را m ضرب می کند و کف آن را به عنوان نتیجه محاسبه می کند. بنابراین تابع درهم سازی برابر است با

$$h(k) = \lfloor m(kA \bmod 1) \rfloor = \lfloor m(kA - \lfloor kA \rfloor) \rfloor$$

- در اینجا $kA \bmod 1$ به معنای قسمت اعشاری kA است یعنی $kA - \lfloor kA \rfloor$.
- در عمل، روش ضرب وقتی m توانی از عدد ۲ است یعنی $m = 2^l$ (به ازای عدد صحیح l) به طوری که $l \leq w$ و w تعداد بیت های یک کلمه در ماشین است، خوب عمل می کند.

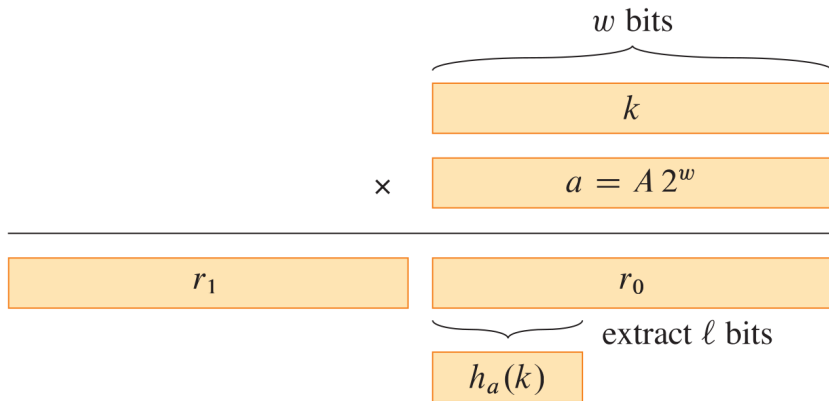
¹ multiplication method

درهم سازی ایستا

- روش ضرب-انتقال¹ : فرض می کنیم کلید k در یک فضای w بیتی جای می گیرد. عدد w بیتی $a = A2^w$ را انتخاب می کنیم، به طوری که $0 < A < 1$ و $0 < a < 2^w$.
- ابتدا k را در عدد صحیح w بیتی a ضرب می کنیم. نتیجه مقدار $2w$ بیتی $r_1 2^w + r_0$ است جایی که r_1 مقدار w بیت مرتبه بالا و r_0 مقدار w بیت مرتبه پایین نتیجه ضرب است.
- مقدار l بیتی هش تشکیل شده است از l بیت پر ارزش r_0 .
- از آنجایی که از r_1 چشم پوشی می شود، تابع درهم سازی می تواند بر روی یک کامپیوتر به گونه ای پیاده سازی شود که باقیمانده یک حاصل ضرب بر 2^w را محاسبه کند.
- تابع درهم سازی در اینجا به صورت $h_a(k) = (ka \bmod 2^w) \gg (w - l)$ محاسبه می شود.
- از آنجایی که حاصل ضرب ka از دو عدد w بیتی، میزان $2w$ فضا اشغال می کند، باقیمانده ضرب بر 2^w تعداد w بیت پر ارزش را حذف می کند (r_1) و w بیت کم ارزش را به دست می دهد (r_0).

¹ multiply-shift method

- این روش در شکل زیر نشان داده شده است.



- عملگر \gg یک انتقال به راست به اندازه $w - l$ بیت انجام می دهد، که معادل است با تقسیم عدد بر 2^{w-l} و محاسبه کف نتیجه.
- تابع درهم سازی h_a می تواند با سه دستور پیاده سازی شود، ضرب، تقسیم و انتقال.
- به عنوان مثال، فرض کنید $k = 123456$ و $l = 14$ و $m = 2^{14} = 16384$ و $w = 32$.
- همچنین فرض کنید $a = 2654435769$. در این صورت
 $ka = 327706022297664 = (76300 \times 2^{32}) + 17612864$ و $r_1 = 76300$ و
 $r_0 = 17612864$.
- اگر ۱۴ بیت پر ارزش r_0 را استخراج کنیم خواهیم داشت $h_a(k) = 67$.

- اگرچه روش ضرب-انتقال روش سریعی است اما ضعف همه روش های درهم سازی ایستا را دارد بدین معنا که به برای الگوهای ورودی خاص کارایی مطلوب ندارد.
- از روش ضرب-انتقال در درهم سازی تصادفی استفاده می شود که در مورد آن صحبت خواهیم کرد.

درهم‌سازی تصادفی

- در درهم‌سازی ایستا می‌توانیم کلیدها را به گونه‌ای انتخاب کنیم که همه آنها به یک مکان جدول نگاشت شوند. در این حالت پیچیدگی زمانی جستجو $\Theta(n)$ خواهد بود. هرگونه درهم‌سازی ایستا دارای این نقطه ضعف است.
- یک روش برای مقابله با این مشکل استفاده از درهم‌سازی تصادفی¹ است.
- یکی از حالات خاص این روش درهم‌سازی سراسری² است که کارایی خوبی دارد وقتی تصادم‌ها با زنجیرسازی مدیریت می‌شوند.
- برای استفاده از درهم‌سازی تصادفی، در ابتدای اجرای برنامه تابع درهم‌سازی را به صورت تصادفی از میان خانواده‌ای از توابع درهم‌سازی انتخاب می‌کنیم. از آنجایی که تابع درهم‌سازی را به صورت تصادفی انتخاب می‌کنیم، الگوریتم در هر اجرا رفتار متفاوتی دارد.

¹ random hashing

² universal hashing

- فرض کنید H یک خانواده محدود از توابع درهم‌سازی باشد که یک مجموعه مرجع U از کلیدها را به بازه $\{0, 1, \dots, m-1\}$ نگاشت می‌کند.
- به این خانواده از توابع یک خانواده سراسری گفته می‌شود، اگر با انتخاب یک تابع درهم‌سازی به صورت تصادفی از مجموعه H ، احتمال تصادم بین دو کلید متمایز k_1 و k_2 بیشتر از $1/m$ نباشد.
- به عبارت دیگر با انتخاب یک تابع درهم‌سازی به صورت تصادفی از مجموعه H ، احتمال تصادم بین دو کلید متمایز k_1 و k_2 بیشتر از احتمال تصادم $1/m$ وقتی که $h(k_1)$ و $h(k_2)$ به صورت یکنواخت و مستقل از مجموعه $\{0, 1, \dots, m-1\}$ انتخاب شده باشند، نیست.

- در اینجا دو روش برای طراحی یک خانواده سراسری از توابع درهم سازی معرفی می کنیم.
- روش اول : عدد اول p که به اندازه کافی بزرگ است را انتخاب می کنیم به طوری که هر کلید k در محدوده 0 تا $p - 1$ قرار بگیرد.
- فرض کنید \mathbb{Z}_p مجموعه $\{0, 1, 2, \dots, p - 1\}$ باشد و \mathbb{Z}_p^* مجموعه $\{1, 2, \dots, p - 1\}$.
- از آنجایی که اندازه مجموعه مرجع کلیدها بزرگتر از تعداد مکان ها در جدول درهم سازی است، داریم $p > m$.

- به ازای هر $a \in \mathbb{Z}_p^*$ و $b \in \mathbb{Z}_p$ ، تابع h_{ab} را به صورت یک تبدیل خطی و یک کاهش با استفاده عملگر باقیمانده بر p و سپس باقیمانده بر m تعریف می کنیم.

$$h_{ab}(k) = ((ak + b) \bmod p) \bmod m$$

- برای مثال اگر $p = 17$ و $m = 6$ باشد، داریم

$$\begin{aligned} h_{3,4}(8) &= ((3 \times 8 + 4) \bmod 17) \bmod 6 \\ &= (28 \bmod 17) \bmod 6 \\ &= 11 \bmod 6 \\ &= 5 \end{aligned}$$

- به ازای p و m ، خانواده همه توابع درهم سازی به صورت زیر است.

$$H_{pm} = \{h_{ab} : a \in \mathbb{Z}_p^*, b \in \mathbb{Z}_p\}$$

- یک ویژگی این خانواده از توابع درهم سازی این است که اندازه m می تواند هر مقدار دلخواهی باشد و نیازی نیست اول باشد.

- از آنجایی که می توانیم تعداد $p - 1$ مقدار برای a و p مقدار برای b انتخاب کنیم، خانواده H_{pm} شامل $p(p - 1)$ تابع درهم سازی است.

- می توان اثبات کرد H_{pm} یک خانواده سراسری است.

- روش دوم : از این روش در عمل بیشتر استفاده می شود زیرا کارایی بالایی دارد.
- فرض کنید H یک خانواده از توابع درهم سازی ضرب-انتقال صورت زیر باشد.
 $H = \{h_a : h_a \text{ یک تابع درهم سازی ضرب انتقال است و } 1 \leq a < m \text{ و } a \text{ فرد است}\}$
- تابع درهم سازی ضرب-انتقال را قبلا به صورت زیر تعریف کردیم.
$$h_a(k) = (ka \bmod 2^w) \gg (w - l)$$
- می توان اثبات کرد توابع خانواده H یک خانواده سراسری هستند.

- درهم سازی ورودی های بزرگ مانند وکتورها یا رشته ها:
- برخی مواقع ورودی تابع درهم سازی آنقدر بزرگ است که به سادگی نمی توان یک عدد اول p پیدا کرد که در ۶۴ بیت جای بگیرد. برای مثال ممکن است بخواهیم یک رشته را به عنوان کلید در نظر بگیریم.
- یک روش درهم سازی برای چنین ورودی هایی تعمیم روش های شرح داده شده است. برای این کار می توانیم از توابع رمزنگاری استفاده کنیم.

درهم سازی تصادفی

- یک تابع رمزنگاری یک ورودی با اندازه دلخواه را دریافت می کند و یک خروجی با طول ثابت تولید می کند.
- برای مثال تابع استاندارد SHA-256 ورودی را به قطعاتی تقسیم کرده، با استفاده از عملگرهای بیتی و منطقی ورودی را خلاصه می کند و یک خروجی ۲۵۶ بیتی (۳۲ بایتی) تولید می کند.
- توابع رمزنگاری به قدری مورد استفاده اند که برخی از پردازنده ها توابع رمزنگاری را به صورت سخت افزاری پیاده سازی می کنند و بنابراین سرعت اجرای بالایی دارند.
- می توانیم تابع درهم سازی برای یک کلید با طول دلخواه را به صورت زیر تعریف کنیم.

$$h(k) = \text{SHA-256}(k) \bmod m$$

- برای تعریف یک خانواده از توابع درهم سازی می توانیم یک رشته a به ابتدای ورودی الحاق کنیم.

$$h_a(k) = \text{SHA-256}(a\|k) \bmod m$$

- آدرس دهی باز¹ روشی برای رفع تصادم است که برخلاف زنجیرسازی از فضایی خارج از جدول درهم سازی استفاده نمی کند و همه عناصر را در خود جدول درهم سازی ذخیره می کند.
- در نتیجه ضریب بار α هیچ گاه نمی تواند بیشتر از ۱ شود.

¹ open addressing

- در این روش تصادم به صورت زیر مدیریت می شود : وقتی می خواهیم یک عنصر در جدول وارد کنیم، این عنصر جدید در صورت امکان در مکانی که به عنوان انتخاب اول آن محاسبه می شود قرار می گیرد. اگر اولین انتخاب اشغال شده بود، مکانی به عنوان دومین انتخاب ذخیره سازی کلید محاسبه می شود و در صورتی که آن مکان نیز اشغال شده بود، این روند ادامه پیدا می کند تا جایی که یک مکان خالی پیدا شود.
- برای جستجوی یک عنصر مکان های جدول به ترتیب انتخاب ها بررسی می شوند تا جایی که یا عنصر یافته شود و یا به یک خانه خالی برخورد کنیم که در این صورت پیام جستجوی ناموفق صادر می کنیم.
- آدرس دهی باز از هیچ اشاره گر و فضای اضافی استفاده نمی کند، در نتیجه می توان از جدول بزرگتری برای داده های آن استفاده کرد.

- برای درج در جدول توسط آدرس دهی باز، به ترتیب همه انتخاب ها برای مکان کلید مورد نظر را واری¹ می کنیم تا وقتی که یک فضای خالی در جدول پیدا شود.
- تابع درهم سازی به ازای یک کلید باید شماره انتخاب یا شماره واری² را به عنوان ورودی دوم دریافت کند. بنابراین دامنه و برد تابع درهم سازی به صورت زیر خواهد بود.

$$h : U \times \{0, 1, \dots, m-1\} \rightarrow \{0, 1, \dots, m-1\}$$

- در آدرس دهی باز نیاز داریم به ازای هر کلید k ، یک دنباله انتخاب ها یا دنباله واری³ به صورت $\langle h(k, 0), h(k, 1), \dots, h(k, m-1) \rangle$ تولید کنیم تا همه مکان های جدول مورد بررسی قرار بگیرند.

¹ probe

² probe number

³ probe sequence

- تابع Hash-Insert جدول T و کلید k را دریافت می‌کند و مکان ذخیره آن را باز می‌گرداند و در صورتی که جدول پر باشد پیام خطا صادر می‌کند.

Algorithm Hash Insert

```
function HASH-INSERT(T,k)
1: i = 0
2: repeat
3:   q = h(k,i)
4:   if T[q] == NIL then
5:     T[q] = k
6:     return q
7:   else i = i + 1
8: until i == m
9: error "hash table overflow"
```

– الگوریتم جستجوی کلید k نیز دنباله ای از مکان های جدول را بررسی می کند تا وقتی که کلید k یافته شود. وقتی به یک مکان خالی می رسیم جستجو با پیامی مبنی بر عدم موفقیت و بازگرداندن NIL به پایان می رسد.

- تابع Hash-Search جدول T و کلید k را دریافت می‌کند و در صورتی که مکان q شامل کلید k پیدا شد مکان q را باز می‌گرداند و در صورتی که k در جدول وجود نداشت مقدار NIL را باز می‌گرداند.

Algorithm Hash Search

```
function HASH-SEARCH(T,k)
1: i = 0
2: repeat
3:   q = h(k,i)
4:   if T[q] == k then
5:     return q
6:   i = i + 1
7: until T[q] == NIL or i == m
8: return NIL
```

- حذف کردن از جدول درهم سازی با آدرس دهی باز کمی پیچیده تر است. وقتی یک کلید را از مکان q حذف می کنیم ممکن است به اشتباه آن مکان به عنوان مکان خالی در نظر گرفته شود. اگر مکان حذف شده را با NIL علامتگذاری کنیم، ممکن است نتوانیم کلید k را که مکان q برای آن واریسی شده بوده، در حالی که مکان اصلی آن اشغال بوده است، پیدا کنیم.
- برای حل این مشکل، وقتی یک کلید را در جدول حذف می کنیم به جای علامتگذاری آن با مقدار NIL ، مقدار Deleted را در مکان حذف شده قرار می دهیم.

- در هنگام درج در جدول، تابع Hash-Insert مکانی که با Deleted علامتگذاری شده است را به عنوان مکان خالی در نظر می گیرد.
- در هنگام جستجو، وقتی تابع Hash-Search به مکان Deleted برخورد می کند جستجو را ادامه می دهد، زیرا مکانی که با Deleted علامتگذاری شده در هنگام درج کلید مورد جستجو اشغال بوده است.
- زمان جستجو در روش آدرس دهی باز به علت استفاده از این علامتگذاری پرهزینه است و ممکن است نیاز باشد همه جدول را بررسی کنیم. به همین دلیل در کاربردی که می خواهیم تعداد زیادی از کلیدها را حذف کنیم از روش زنجیرسازی استفاده می کنیم که زمان جستجوی بهتری دارد.

- دو روش برای طراحی توابع درهم سازی توسط آدرس دهی باز وجود دارد که در اینجا در مورد آنها صحبت خواهیم کرد : درهم سازی دوگانه¹ و واریسی خطی².

¹ double hashing

² linear probing

- درهم سازی دوگانه ¹ : درهم سازی دوگانه یکی از بهترین روش های موجود برای آدرس دهی باز است.
- درهم سازی دوگانه از تابع درهم سازی به صورت زیر استفاده می کند.

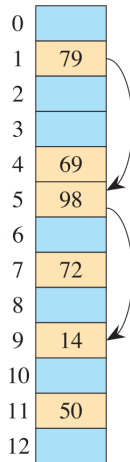
$$h(k, i) = (h_1(k) + i \cdot h_2(k)) \mod m$$

- به طوری که h_1 و h_2 دو تابع درهم سازی هستند.
- اولین مکان انتخابی $T[h_1(k)]$ است و مکان های انتخابی بعدی گام هایی به اندازه ضربی از $h_2(k)$ بعد از مکان انتخابی اول هستند.

¹ double hashing

آدرس دهی باز

- در شکل زیر یک مثال از درهم سازی دوگانه نشان داده شده است.



- اندازه جدول 13 است و $h_1(k) = k \bmod 13$ و $h_2(k) = 1 + (k \bmod 11)$.
- کلید 14 بعد از واریسی مکان های 1 و 5 که اشغال شده اند وارد مکان 9 می شود.

0	
1	79
2	
3	
4	69
5	98
6	
7	72
8	
9	14
10	
11	50
12	

- برای این که همه جدول مورد جستجو قرار بگیرد مقدار $h_2(k)$ باید نسبت به اندازه جدول یعنی m اول باشد. یک روش مناسب برای اطمینان حاصل کردن از برقراری این شرط است که m را توانی از ۲ انتخاب کنیم و h_2 را به گونه ای طراحی کنیم که همیشه عدد فرد تولید کند. یک روش دیگر این است که m را اول انتخاب کنیم و h_2 را به گونه ای طراحی کنیم که عددی مثبت کوچکتر از m تولید کند.
- برای مثال می توانیم m را یک عدد اول انتخاب کنیم و توابع را به صورت زیر طراحی کنیم.

$$h_1(k) = k \mod m$$

$$h_2(k) = 1 + (k \mod (m - 1))$$

- به عنوان مثال، اگر $k = 123456$ و $m = 701$ باشد، آنگاه $h_1(k) = 80$ و $h_2(k) = 257$ خواهد بود، بنابراین اولین واریسی مکان 80 را انتخاب می‌کند و در واریسی‌های بعدی ضرایبی از 257 مکان بعدی (با محاسبه باقیمانده بر m) انتخاب می‌شوند تا وقتی که یک مکان خالی پیدا شود.
- اگرچه مقادیر m که اول یا توانی از ۲ نیستند می‌توانند در درهم‌سازی دوگانه استفاده شوند، اما در عمل انتخاب $h_2(k)$ وقتی از توابع دیگر استفاده می‌کنیم، سخت‌تر می‌شود، زیرا باید اطمینان حاصل شود که نسبت به m اول است.
- وقتی m نسبت به مقدار خروجی تابع درهم‌سازی $h_2(k)$ اول باشد، درهم‌سازی دوگانه تعداد $\Theta(m^2)$ دنباله واریسی تولید می‌کند زیرا هر جفت $(h_1(k), h_2(k))$ یک دنباله واریسی متفاوت است.

- واریسی خطی¹ : واریسی خطی یک حالت خاص از درهم سازی دوگانه است و یکی از روش های بسیار ساده در آدرس دهی باز برای رفع تصادم است.
- همانند درهم سازی چندگانه ابتدا مکان $T[h_1(k)]$ بررسی می شود. اگر این مکان اشغال بود، مکان بعدی یعنی $T[h_1(k) + 1]$ بررسی می شود. بررسی تا $T[m - 1]$ ادامه پیدا می کند و مجدداً به $T[0]$ باز می گردد تا به $T[h_1(k) - 1]$ برسد.
- بنابراین گام واریسی که در درهم سازی دوگانه برابر با $h_2(k)$ بود در واریسی خطی برابر با ۱ است پس $h_2(k) = 1$ به ازای همه مقادیر k .

¹ linear probing

- پس تابع درهم سازی در واریسی خطی به ازای $i = 0, 1, \dots, m - 1$ برابر است با :

$$h(k, i) = (h_1(k) + i) \mod m$$

- مقدار $h_1(k)$ می تواند هریک از مقادیر $\{0, 1, \dots, m - 1\}$ باشد.

- آدرس‌دهی باز را بر اساس ضریب بار جدول درهم‌سازی یعنی $\alpha = n/m$ تحلیل می‌کنیم.
- در آدرس‌دهی باز، حداکثر یک عنصر در یک مکان ذخیره می‌شود و بنابراین $n \leq m$ است و در نتیجه $\alpha \leq 1$ است.
- همانند قبل فرض می‌کنیم درهم‌سازی جایگشت‌ها را یکنواخت و مستقل تولید می‌کند. بنابراین دنباله واریسی $\langle h(k, 0), h(k, 1), \dots, h(k, m-1) \rangle$ که برای درج یا جستجو برای کلید k استفاده می‌شود با احتمال برابر می‌تواند هریک از جایگشت‌های $\langle 0, 1, \dots, m-1 \rangle$ باشد. البته هر کلید یک دنباله واریسی یکتا خواهد داشت.

- قضیه : به ازای یک جدول درهم سازی با آدرس دهی باز و ضریب بار $\alpha = n/m < 1$ ، تعداد واریسی ها در یک جستجوی ناموفق حداکثر $1/(1 - \alpha)$ است.
- اثبات: اولین واریسی همیشه رخ خواهد داد، اگر مکان اول انتخاب شده با احتمال α اشغال باشد، انتخاب دوم بررسی می شود. احتمال این که هر دو انتخاب اول و دوم اشغال باشند برابر است با α^2 و به همین ترتیب الی آخر.
- کران به دست آمده برابر است با $1 + \alpha + \alpha^2 + \alpha^3 + \dots$.
- با محاسبه این دنباله هندسی به دست می آوریم: $1 + \alpha + \alpha^2 + \alpha^3 + \dots < 1/(1 - \alpha)$.

- برای مثال، اگر جدول درهم سازی نیمه پر باشد، تعداد متوسط واریسی ها در یک جستجوی ناموفق حداکثر $1/(1 - 0.5) = 2$ است. اگر ۹۰ درصد اشغال باشد، تعداد متوسط واریسی ها حداکثر $1/(1 - 0.9) = 10$ است.
- بنابراین جستجو و همچنین درج و حذف در زمان $O(\frac{1}{1-\alpha})$ انجام می شود، که در صورتی که $\alpha < 1$ یک عدد ثابت باشد، طبق این قضیه، جستجوی ناموفق در زمان $O(1)$ اجرا می شود. اگر $\alpha = 1$ باشد، همه عناصر جدول باید بررسی شوند که در این صورت پیچیدگی زمانی $O(m)$ خواهد بود.