دانشکده مهندسی کامپیوتر

طراحی سیستم‌های دیجیتال

مستند پروژه

بررسی الگوریتم درهم‌سازی skein

نگارندگان:
حسن سندانی
محمد صالح سعیدی
مریم حکاک
محمد مهدی عرفانیان
علی جندقی

۱۷ تیر ۱۳۹۸

چکیده

در مستندی که پیش روی خوانندهٔ عزیز قرار دارد تلاش شده تا مختصرا الگوریتم درهم‌سازی Skein در راستای انجام پروژه درس طراحی سیستم‌های دیجیتال تشریح شود، این درس در بهار ۹۸ در دانشکده مهندسی کامپیوتر دانشگاه صنعتی شریف توسط استاد فرشاد بهاروند ارائه شده است.
برای سهولت کار استاد محترم درس برای تحصیل اطمینان از درستی مستندسازی و همچنین استفاده دانش‌جویان علاقه‌مند، سیر پیشرفت مستند به همراه کدهای LaTeX در *Github* قرار گرفته است، لازم به ذکر است که این مستند به صورت متن‌باز ارائه شده و استفاده از آن بدون ذکر منبع برای همگان آزاد است.
همچنین سیر پیشرفت کل پروژه، صورتِ جلسات برگزارشده، نحوهٔ تقسیم کارها و همچنین پیش‌نویس‌هایی که منجر به ایجاد این مستند شده در *این پوشه* قرار گرفته اند. در انتها از استاد محترم درس، دستیار آموزشی ایشان، خوانندگان محترم و تمامی افرادی که در تکمیل این پروژه نقش داشتند تشکر می‌کنیم.

با آرزوی خوش‌وقتی برای تمامی خوانندگان این مستند
تیم پروژه

فهرست مطالب

فصل ۱

مقدمه

توضیحی اولیه مشتمل بر تعریف الگوریتم، نحوه کلی عملکرد الگوریتم، پایه‌های ریاضی، کاربردها و استانداردها

۱.۱ توضیح الگوریتم

الگوریتمی که در ادامهٔ این مستند شرح و توضیح آن آمده است الگوریتم درهم سازی Skein یا Skein hash function است. این الگوریتم از سری الگوریتم‌های درهم‌سازی امنیتی یا cryptographic hash function و یکی از نامزدهای نهایی مسابقه انتخاب بهترین تابع درهم‌سازی NIST می‌باشد. این مسابقه برای انتخاب بهترین الگوریتم درهم‌سازی برای استاندارد جدید SHA-3 برگزار شد. طبق ادعای طراحان الگوریتم این الگوریتم می‌تواند در 6.1 کلاک در بایت داده‌ها را هش کند، که به این معنیست که در پردازندهٔ دوهسته‌ای 64 بیتی با فرکانس پردازشی 3.1 GHz می‌تواند با سرعت 500 مگابایت بر ثانیه داده‌ها را در هم بریزد. این مقدار سرعت تقریبا دوبرابر سرعت درهم‌سازی دادهٔ الگوریتم SHA-512 است. همچنین با گزینه درخت درهم‌سازی که می‌تواند به صورت اختیاری در الگوریتم پیاده‌سازی شود می‌توان در پیاده‌سازی موازی الگوریتم سرعت را به بیش از این هم رساند. نکته دیگری که در مورد الگوریتم skein لازم به ذکر است این است که این الگوریتم پیاده‌سازیِ آسان و ساده‌ای دارد و فقط از سه عمل‌گر اصلی برای محاسبهٔ هش استفاده می‌کند و نحوهٔ عملکرد الگوریتم به راحتی قابل به خاطرسپاری و یادگیری‌ست.

الگوریتم درهم‌سازی Skein برای حالت‌های ورودی ۲۵۶، ۵۱۲ و ۱۰۲۴ بایتی و مقدار دلخواه خروجی پیاده‌سازی شده است که این خاصیت در انعطاف الگوریتم در حالت‌های مختلف بسیار حیاتی‌ست.

در پیاده‌سازی سخت‌افزاری نیز این الگوریتم قوی عمل می‌کند،برای پیاده‌سازی Skein-512 بر سخت‌افزار به حدود ۲۰۰ بایت فضای مموری نیاز داریم، برای Skein-256 این مفدار به حدود ۱۰۰ بایت کاهش پیاده می‌کند که این الگوریتم را به یک الگوریتم مناسب برای پیاده‌سازی‌های روی قطعات کوچک سخت‌افزاری تبدیل می‌کند، مثلا می‌توان از Skein-256 در پیاده‌سازی smart card استفاده کرد. [۱]

۱.۱.۱ مثال‌هایی از درهم‌سازی

- Skein-256-256("")

$$c8877087da56e072870daa843f176e9453115929094c3a40c463a196c29bf7ba$$

- Skein-512-256("")

$$39ccc4554a8b31853b9de7a1fe638a24cce6b35a55f2431009e18780335d2621$$

- Skein-512-512("")

$$bc5b4c50925519c290cc634277ae3d6257212395cba733bbad37a4af0fa06af4$$
$$1fca7903d06564fea7a2d3730dbdb80c1f85562dfcc070334ea4d1d9e72cba7a$$

۲.۱ مختصری دربارهٔ الگوریتم‌های درهم‌سازی امنیتی

در دنیای امروز الگوریتم‌های درهم‌سازیِ امنیتی تقریبا در تمامی نقاط مختلفی که با اینترنت سر و کار دارند پیدا می‌شوند، بزرگ‌ترین کاربرد این الگوریتم‌ها ایجاد امضای دیجیتالی یا digital signature است که در ذخیرهٔ رمزهای عبور، اتصالات امنیتی به سرورها، مدیریت رمزنگاری‌ها و اسکن ویروس‌ها و بدافزارها به کار می‌رود، تقریبا تمامی پروتکل‌های امنیتی در دنیای اینترنت امروز بدون الگوریتم‌های درهم‌سازی امنیتی به سختی قابل پیاده‌سازی خواهند بود.

بزرگترین الگوریتم‌های درهم‌سازی امنیتی فعلی الگوریتم‌های خانواده SHA می‌باشند، الگوریتم‌های خانواده SHA به اختصار و فقط ذکر نام موارد زیر اند.

- SHA-0
- SHA-1

- SHA-256
- SHA-512

تمامی موارد بالا از روی الگوریتم‌های MD4 و MD5 اقتباس شده اند. در سال‌های اخیر کاستی‌ها و مشکلات امنیتی زیادی در الگوریتم‌های MD4, MD5, SHA-0, SHA-1 یافت شده‌اند اما هنوز باگ امنیتی بزرگی برای الگوریتم‌های SHA-256, SHA-512 یافت نشده است اما به دلیل وابستگی زیاد صنعت و امنیت فعلی اطلاعات به الگوریتم‌های درهم‌سازی در سال ۲۰۱۲ تصمیم بر این شد تا جایگزین مناسب و جدیدی برای الگوریتم‌های SHA-256, SHA-512 نیز انتخاب شود تا در صورتی که این الگوریتم‌ها شکسته شدند به سرعت الگوریتم‌های جدید در قالب نام SHA-3 جایگزین شوند.

۳.۱ هدف الگوریتم درهم‌سازی Skein

هدف الگوریتم درهم‌سازی Skein مانند دیگر الگوریتم‌های درهم‌سازی امنیتی ایجاد یک تابع برای درهم‌سازی داده‌های مختلف است به شکلی که ویژگی‌ها زیر برای آنان برقرار باشند.

- **قطعی بودن:** به شکلی که به ازای ورودی یکسان مقدار درهم‌سازی با تکرار الگوریتم برابر باشد، مثلا با دادن ورودی "salam" به صورت متوالی به تابع مقدار هش تغییر نکند.
- **یک طرفه بودن:** نتوان از مقدار خروجی مقدار ورودی را یافت.
- **یک به یک بودن:** نتوان دو ورودی پیدا کرد به شکلی که به ازای این دو ورودی مقدار خروجی مساوی شود.
- **حساس بودن:** با تغییر اندک در ورودی خروجی به شکل قابل ملاحظه‌ای تفییر کند تا مقدار هش قابل حدس زدن نباشد.
- **سریع بودن:** الگوریتم باید بتواند هش را در مدت زمانی کوتاهی حساب کند تا به کاربردی بودن برسد.

۴.۱ نحوهٔ کلی عملکرد الگوریتم

ایدهٔ اصلی الگوریتم بر ایجاد بلوک‌های رمزگذاری قابل تنظیم یا به زبان نویسندگان الگوریتم tweakable block cipher بنا نهاده شده است؛ به صورت دقیق‌تر می‌توان گفت که Skein از سه قسمت اصلی زیر تشکیل شده است و برای درهم‌سازی از ایشان استفاده می‌کند.

- **Threefish**
  این قسمت یک بلوک رمزگذاری قابل تنظیم است که در هسته اصلی الگوریتم پیاده‌سازی شده است، این بلوک‌ها در سایزهای ۲۵۶، ۵۱۲، ۱۰۲۴ بیتی تعریف شده اند.
- **Unique Block Iteration (UBI)**
  UBI یک حالت زنجیری‌ست که با استفاده از بلوک قبلی به عنوان ورودی خود سعی در ایجاد یک الگوریتم فشرده‌سازی مخصوص ورودی می‌کند که بلوک ورودی با سایز دلخواه را به یک خروجی با سایز مشخص تبدیل کند.
- **Optional Argument System**
  این ویژگی به الگوریتم اجازه می‌دهد تا از تعدادی ویژگی اختیاری بدون تحمیل هزینه بیش از حد اجرایی استفاده کند. [۲]

هم‌راهی سه بخش یادشده باهم ویژگی‌های جالب و کاربردی بسیاری را به الگوریتم درهم‌سازی Skein افزوده است، در ادامه به صورت خلاصه به نحوهٔ عملکرد هر بخش می‌پردازیم. [۱]

۱.۴.۱ The Threefish block cipher

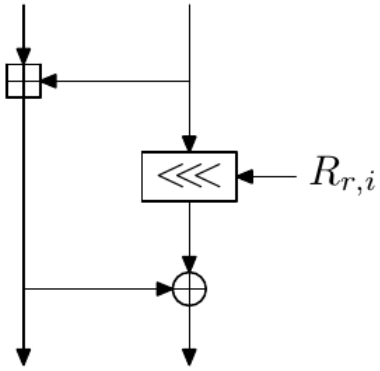
Threefish یک بلوک رمزگذاری قابل تنظیم است که برای سه سایز بلوک مختلف تعریف شده است، ۲۵۶، ۵۱۲ و ۱۰۲۴ بیت. اصل اساسی در طراحی Threefish توجه به این مورد است که تعداد زیادی از مراحل ساده امن‌تر از تعداد کمی مراحل پیچیده است. Threefish فقط از سه عمل‌گر اصلی XOR ، جمع کردن و دوران به اندازه یک عدد ثابت [۲] استفاده می‌کند. شکل ۱.۱ نحوه عملکرد تابع غیرخطی استفاده شده در Threefish را نشان می‌دهد، این تابع در زبان طراحان الگوریتم MIX نامیده می‌شود و بر روی دو کلمه ۶۴ بیتی اجرا می‌شود. هر تابع MIX شامل یک جمع، یک دوران و یک XOR است.

۱.۱ نحوهٔ عملکرد Threefish-512 را نشان می‌دهد، هر یک از مراحل هفتاد و دوگانهٔ الگوریتم Skein-512 از چهار تابع MIX به همراه ضرب در یک کلمه ۶۴ بیتی انجام می‌شوند. ثابت‌های چرخش به شکلی انتخاب می‌شوند تا پخش‌شدگی را در هش به حداکثر خود برسانند. برای به دست آوردن مقدار Threefish-512 ۷۲ بار الگوریتم شکل ۲.۱ تکرار می‌شود. [۳]

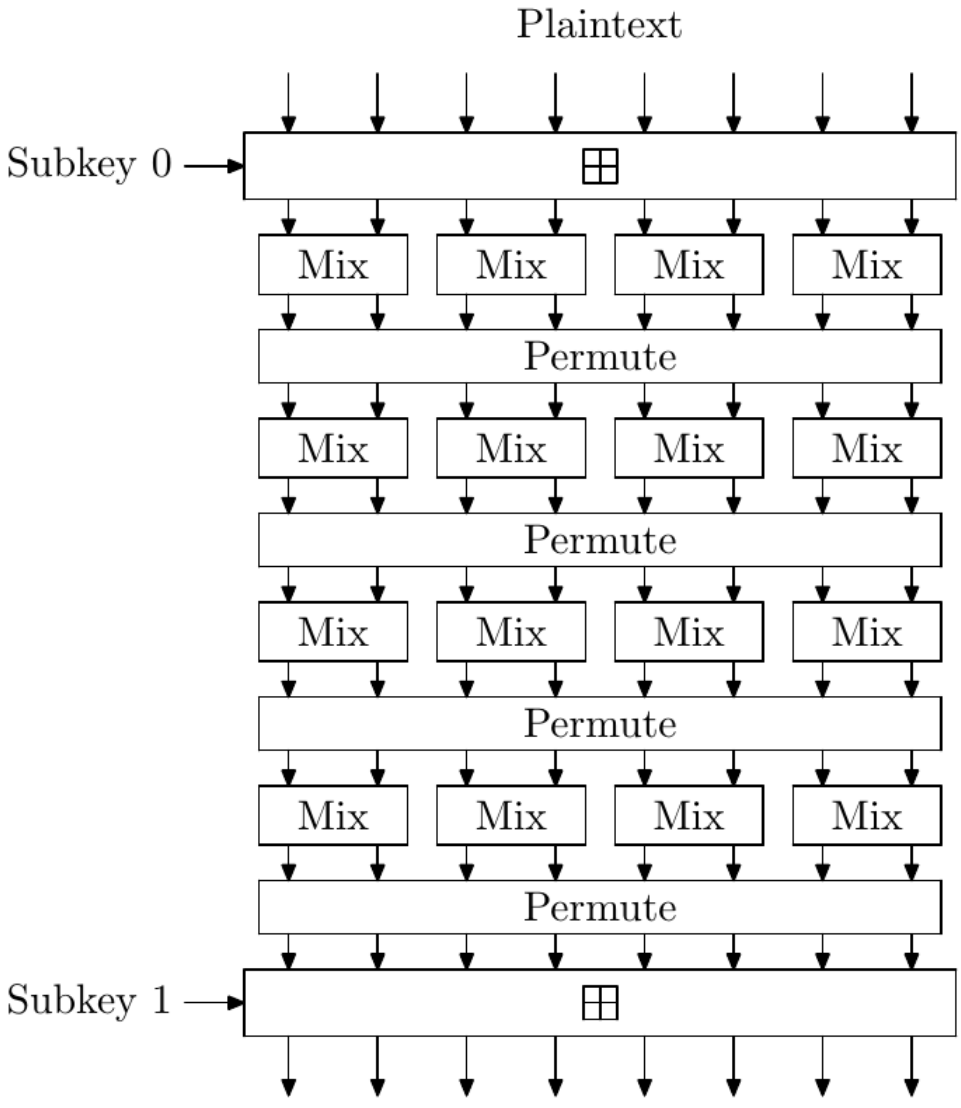
۲.۴.۱ Unique Block Iteration

Unique Block Iteration یا به اختصار UBI زنجیره‌ای از ورودی‌ها را با یک رشته با طول دلخواه تلفیق می‌کند تا یک خروجی با اندازهٔ مورد نظر و ثابت به دست آورد، در حقیقت UBI مقدار The Threefish block cipher را که مقداری با اندازهٔ نامشخص و تعیین‌نشده‌ست را به خروجی با مقداری با اندازهٔ ثابت تبدیل می‌کند، شکل ۳.۱ نحوهٔ محاسبه UBI برای الگوریتم Skein-512 را نشان می‌دهد، اندازهٔ ورودی ۱۶۶ بایت است که در سه بلوک ریخته شده است، بلوک‌های M_0 و M_1 هر کدام ۶۴ بایت دارند و M_2 که برچسب آخرین بلوک [۴] را دارد باقی‌مانده اندازه یعنی ۳۸ بایت دارد. با استفاده از tweak بلوک که قلب اصلی UBI را تشکیل می‌دهد UBI متوجه می‌شود که آیا تمامی بلوک‌ها برای ایجاد خروجی پردازش شده اند یا خیر و

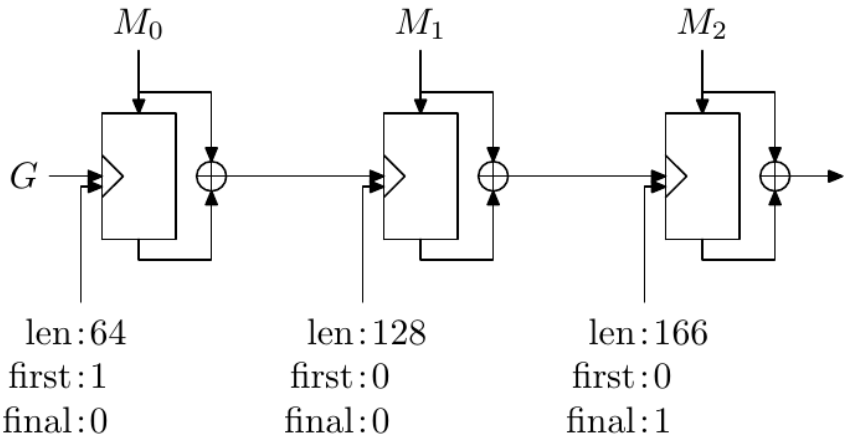
[۱] برای مطالعه بیشتر می‌توانید به بخش سوم [۲] مراجعه کنید.
[۲] Constant Rotation
[۳] برای مطالعه جزیی‌تر می‌توانید به [۲] مراجعه کنید.
[۴] final block



شکل ۱.۱: تابع MIX



شکل ۲.۱: چهار مرحله از ۷۲ مرحلهٔ Threefish-512 block cipher



شکل ۳.۱: درهم‌سازی پیام سه بلوکه با UBI

این که آیا به بلوک پایانی (پایان زنجیره) رسیده است یا خیر. UBI یکی از انواع Matyas-Meyer-Oseas ها است. [۳]

۳.۴.۱ تابع درهم‌سازی Skein

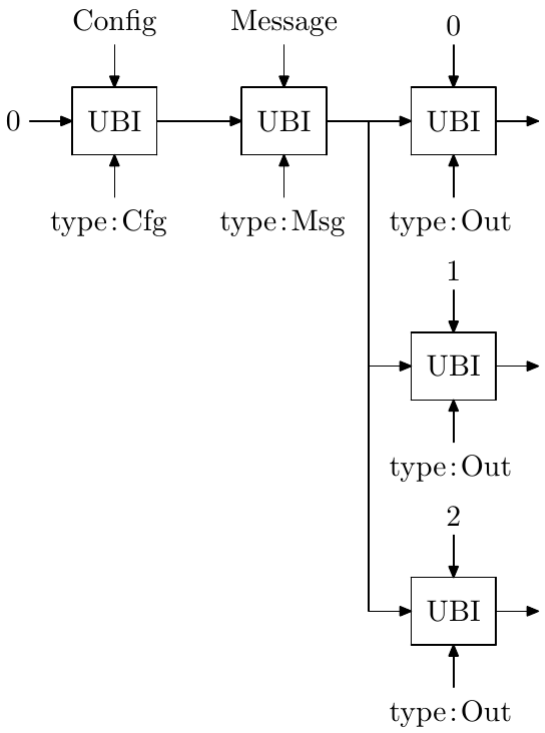
تابع اصلی درهم‌سازی در حالت نرمال که مد نظر این نوشتار است برای ایجاد مقدار درهم‌سازی از چندین درخواست از UBI و بالتبع از Threefish block cipher استفاده می‌کند، برای محاسبه هش سه بار UBI با ورودی‌های مختلف زیر صدا زده می‌شود، شکل ۴.۱ توضیحات زیر را به صورت شماتیک نشان می‌دهد.

- **Config**
  این ورودی مقدار اندازه خروجی و تعدادی از پارامترها برای Tree-hashing را فراهم می‌کند، در صورتی که از حالت استاندارد و نرمال Skein برای درهم‌سازی استفاده شود این مقدار قابل پیش‌پردازش است.
- **Message**
  مقدار داده ورودی‌ست.
- **Counter**
  شمارنده‌ای برای نشان دادن تعداد بار تکرار الگوریتم ایجاد خروجی برای رسیدن به خروجی با اندازه مورد نظر است، در صورتی که خروجی بیش از اندازه‌ای مورد انتظار باشد، دوباره تابع ایجاد خروجی فراخوانی می‌شود.

۴.۴.۱ Optional Arguments

در راستای افزایش انعطاف‌پذیری الگوریتم درهم‌سازی Skein برای کاربردهای مختلف تعدادی ورودی به صورت اختیاری به الگوریتم افزوده شده اند، در ادامه مختصرا به توضیح ایشان می‌پردازیم.

- **Key** (اختیاری)
  کلیدی برای تبدیل skein به تابع MAC یا KDF .
- **Configuration** (اجباری)
  همان مقدار Config که پیش‌تر توضیح داده شد.



شکل ۴.۱: تابع ایجاد هش با خروجی بزرگ‌تر از اندازه مورد انتظار

- **Personalization** (اختیاری)
  رشته‌ای که برنامه میتواند با استفاده از آن تابع‌های مختلفی برای کاربردهای مختلفی بسازد.
- **Nonce** (اختیاری)
  مقدار Nonce برای استفاده در حالت stream cipher و حالت درهم‌سازی تصادفی.
- **Message** (اختیاری)
  ورودی نرمال تابع درهم‌سازی.
- **Output** (اجباری)
  مقدار خروجی الگوریتم.

در محاسبه هش تابع درهم‌سازی Skein به ترتیب ذکر شده در بالا UBI ورودی‌ها محاسبه می‌شود.

۵.۱ کاربردهای الگوریتم درهم‌سازی Skein

- **Skein به عنوان تابع درهم‌سازی**
ساده‌ترین راه استفاده از الگوریتم Skein استفاده به عنوان تابعی برای به دست آوردن هش ورودی‌ست، در این حالت Skein مانند تمام الگوریتم‌های دیگر درهم‌سازی عمل می‌کند و رشته‌ای را به عنوان هش با اندازه ازپیش‌تعیین‌شده خروجی می‌دهد.

- **Skein به عنوان MAC**
از تابع درهم‌سازی Skein می‌توان برای تولید MAC [۵] استفاده کرد، از MAC برای وارسی این که یک پیام از یک فرستنده معتبر بدون تغییر ارسال شده یا که در طی مسیر دست‌کاری شده است استفاده می‌شود.

- **HMAC**
نوعی خاصی از MAC است که از یک تابع درهم‌سازی برای سنجش اعتبار پیام‌ها استفاده می‌کند.

- **Randomized Hashing**
نوع خاصی از درهم‌سازی که تابع درهم‌سازی را به صورت تصادفی انتخاب می‌کند، در این حالت احتمال شکستن امنیت تابع به علت تصادف بودن تابع بسیار کاهش می‌یابد.

- **Digital Signatures**
امضای دیجیتال نوعی رمزنگاری نامتقارن است که برای تایید اعتبار فرستنده استفاده می‌شود.

- **Key Derivation Function (KDF)**
در رمزنگاری، یک تابع استخراج کلید (KDF) یک یا چند کلید مخفی را از یک مقدار مخفی مانند کلید اصلی، یک رمز عبور یا یک عبارت عبور با استفاده از یک تابع شبه تصادفی استخراج می‌کند.

- **Password-Based Key Derivation Function (PBKDF)**
نوعی خاصی از KDF هاست که برای مقابله با Brute force attacks طراحی شده است.

- **PRNG**
تابعی که برای تولید اعداد تصادفی استفاده می‌شود.

- **Stream Cipher**
یک رمز متقارن است که در آن هر رقم دنباله کلید اجرایی که توسط مولد رمز دنبال‌های تولید شده است، با رقم متناظر در متن اصلی، XOR می‌شود و رقم متناظر متن رمزی را تولید می‌کند.

[۵] Message authentication code

کتاب‌نامه

[۱] http://www.skein-hash.info/about

[۲] The Skein Hash Function Family
Version 1.3 — 1 Oct 2010
http://www.skein-hash.info/sites/default/files/skein1.3.pdf

[۳] S.M. Matyas, C.H. Meyer, and J. Oseas, “Generating strong one-way functions with crypto- graphic algorithms
” IBM Technical Disclosure Bulletin, Vol. 27, No. 10A, 1985, pp. 5658–5659.

فصل ۲

توصیف معماری سیستم

تشریح اینترفیس‌های سیستم، کلاک‌ها و نحوهٔ راه‌اندازی سیستم، دیاگرام بلوکی سخت‌افزار، ساختار درختی سیستم و توصیف ماژول‌های سخت‌افزار

۱.۲ اینترفیس‌های سیستم

در ابتدا به صورت خلاصه اینترفیس‌های سیستم سخت‌افزاری الگوریتم Skein بیان می‌شود، اینترفیس یک سیستم شامل ورودی‌ها و خروجی‌ها و مشخصات ایشان است.

۱.۱.۲ ورودی‌ها

ورودی‌ها کد verilog الگوریتم Skein به شرح زیر اند.

- **clk**
ورودی کلاک سیستم است که با آن سیستم کار خود را به صورت ترتیبی [۱] انجام می‌دهد، فرکانس کلاک با توجه به نحوهٔ پیاده‌سازی سخت‌افزاری و نتایج حاصل از سنتز تعیین می‌شود. در Testbench داده شده کلاک هر ۱۰ نانوثانیه تغییر می‌کند.

- **midstate**
ورودی ۵۱۲ بیتی برای الگوریتم Skein-512 است که حالت میانی در هش را معلوم می‌کند.

- **nonce**
nonce مقداری دلخواه است که برای به حداکثر رساندن تصادفی و غیرقابل شکستن بودن هش در محاسبه هش استفاده می‌شود، این مقدار می‌تواند عددی دلخواه باشد. در الگوریتم Skein-512 اندازهٔ این ورودی ۳۲ بیت به اندازه طول عدد در Integer گرفته شده است.

- **data**
ورودی اصلی‌ست که باید هش آن محاسبه شود، در کد verilog داده شده اندازه این ورودی ۹۶ بیت در نظر گرفته شده است.

۲.۱.۲ خروجی

تنها خروجی سیستم مقدار هش در output است که ۵۱۲ بیت طول دارد. (الگوریتم مورد بحث Skein-512 است)

۲.۲ کلاک‌ها و نحوهٔ راه‌اندازی سیستم

این سیستم فقط از یک کلاک استفاده می‌کند و برای راه‌اندازی سیستم انجام کارهای زیر ضروری‌ست.

۱. وصل کردن کلاک با فرکانس مناسب به سیستم

۲. اعمال ریست کلی بر سیستم [۲]

۳. تعیین ورودی‌های اولیه

- *ورودی‌های سیستم در ادامه به طور کامل تشریح شده‌اند، هیچ یک از ورودی‌ها نسبت به دیگری تقدم زمانی هنگام assignment ندارد.*

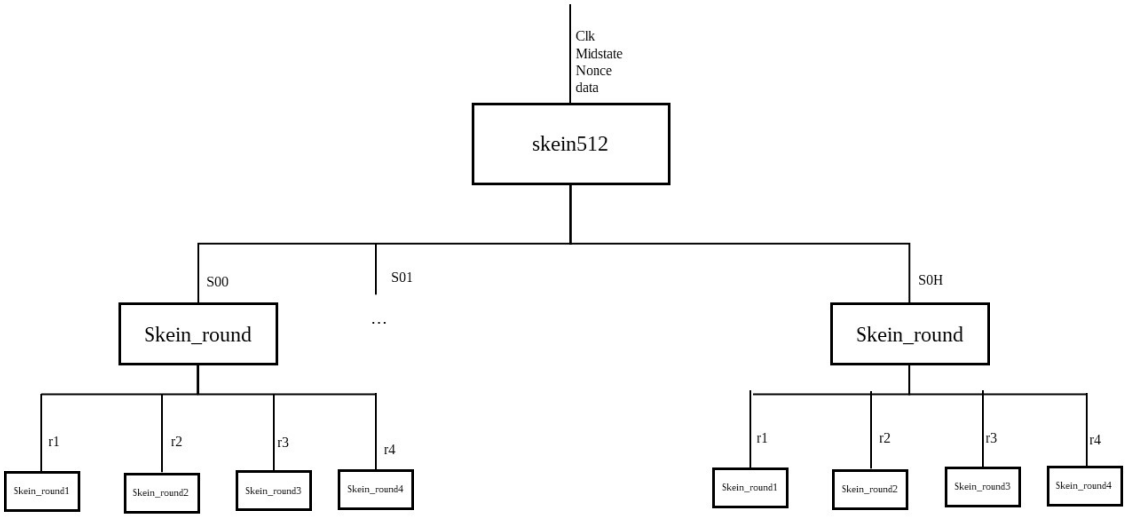
۴. راه‌اندازی سیستم

---

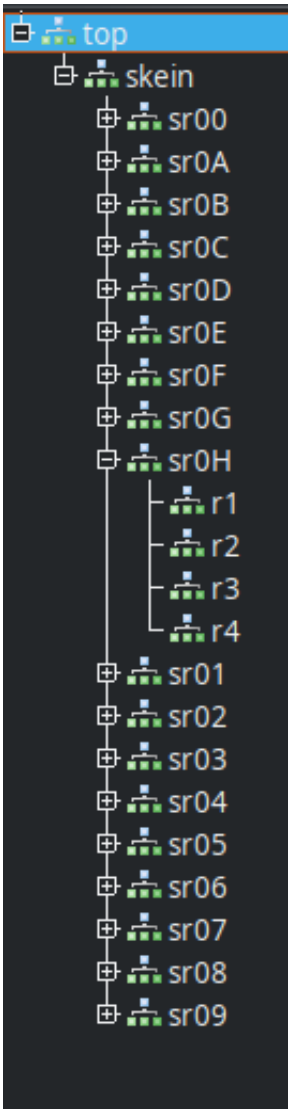
[۱] Sequential
[۲] Global Reset

۳.۲ دیاگرام بلوکی سخت‌افزار

دیاگرام بلوکی کلی سخت‌افزار در شکل ۱.۲ آمده است.



شکل ۱.۲: دیاگرام بلوکی سخت‌افزار



(آ) ساختار ماژول‌ها هنگام شبیه‌سازی

Type	Signals
wire	clk
wire	h[575:0]
wire	ho[575:0]
reg	hx0[575:0]
reg	hx1[575:0]
reg	hx2[575:0]
reg	hx3[575:0]
reg	hx4[575:0]
reg	p0[63:0]
reg	p1[63:0]
reg	p2[63:0]
reg	p3[63:0]
reg	p4[63:0]
reg	p5[63:0]
reg	p6[63:0]
reg	p7[63:0]
wire	p[511:0]
wire	po0[511:0]
wire	po1[511:0]
wire	po2[511:0]
wire	po3[511:0]
wire	po4[511:0]
wire	po[511:0]
wire	round[31:0]
wire	t0[63:0]
wire	t1[63:0]

(ب) ساختار سیگنال‌ها هنگام شبیه‌سازی

شکل ۲.۲: ساختار درختی سیستم

۴.۲ توصیف ماژول‌های سخت‌افزار

Skein-512 ۱.۴.۲

اطلاعات کلی

skein512	
inputs	$clk, [511:0]midstate, [95:0]data, [31:0]nonce$
outputs	$[511:0]hash$

جدول ۱.۲: اطلاعات کلی ماژول skein512

درخطوط اولیه تعداد reg و wire تعریف شده است. دو reg به نام های $phase\_d$ و $phase\_q$ تعریف شده اند که یک‌بیتی اند و مقدار صفر به آنها داده شده است.
دو assignment یک‌خطی دیده می‌شود.

۱. در reg ۳۲ بیتی با نام $nonce\_le$ که در خطوط بالاتر تعریف شده است مقادیر $nonce$ (که ورودی ۳۲ بیتی ماژول هستند) به صورت ۸ بیت – ۸ بیت و به صورت برعکس ذخیره می‌شوند. یعنی به طور مثال ۸ بیت کم ارزش $nonce$در ۸ بیت پرارزش $nonce\_le$ ذخیره شده اند.

۲. در reg ۳۲ بیتی با نام $nonce2\_le$ که در خطوط بالاتر تعریف شده است مقادیر $nonce2$ (که برعکس $nonce$، ورودی ماژول نیست و خود در خطوط بالاتر به صورت یک reg ۳۲ بیتی تعریف شده است و در واقع در حال حاضر مقداری را به خود اختصاص نداده است) به صورت ۸ بیت – ۸ بیت و به صورت برعکس ذخیره می‌شوند. یعنی به طور مثال ۸ بیت کم ارزش $nonce2$ در ۸ بیت پرارزش $nonce2\_le$ ذخیره شده اند. (خط ۵۶)

یک عبارت assign طویل مربوط به hash دیده می‌شود:

- در این عبارت بیت‌های رجیستری به نام h_q که ۵۱۲ بیت دارد و در خطوط بالاتر تعریف شده است، به بیت های خروجی hash اساین می‌شود.
- ۶۴ مجموعه ۸بیتی از h_q به بیت های hash اساین می‌شود که نظم این مقداردهی در زیر توضیح داده می‌شود. در این توضیحات hash را به ترتیب از پرارزش‌ترین ۸بیت شروع به پر کردن می‌کنیم.
- پرارزش‌ترین بیت‌های hash با بیت های 463 تا 456 پر شده است. (یعنی پرارزش‌ترین بیت hash با بیت 463 ام h_q پر شده است و به همین ترتیب)
- مجموعه بعدی ۸تایی از 464 تا 471 هستند که در دومین ۸تایی با ارزش hash قرار می‌گیرند.
- این روند تا هشتمین ۸بیت ارزشمند hash ادامه پیدا می‌کند جایی که در این جایگاه مجموعه $[511:504]$ از h_q جای می‌گیرد. (تا اینجا نظم داشتیم)
- نهمین ۸ بیت ارزشمند hash توسط بیت های $[384:391]$ از h_q پر می‌شوند.
- این روند ادامه پیدا می‌کند (یعنی دهمین ۸ بیت ارزشمند با $[392:399]$ پر می‌شوند)، تا ۱۶امین ۸ بیت ارزشمند hash که با مجموعه $[440:447]$ پر شده‌اند.
- ۱۷امین ۸ بیت ارزشمند با مجموعه $[320:327]$ پر می‌شود.

- این روند مانند قبل به صورت صعودی ادامه پیدا خواهد کرد تا به ۲۵امین مجموعهٔ ۸بیتی برسیم.

درواقع هر ۸ بار که مجموعه بیت‌های ۸بیتی را assign می‌کنیم، یک بی‌نظمی داریم.

- ۲۵امین ۸بیتی hash با بیت‌های [256 : 263] پر می‌شود.
- دوباره روند سابق و صعودی را داریم تا به ۳۳امین assignment برسیم.
- ۳۳امین ۸بیتی hash با بیت‌های [192 : 199]

هر بار بی‌نظمی داریم بازه جدید بعد از بی نظمی ۱۲۰ واحد کمتر از بازه قبلی خواهد بود مثلا ۳۲امین ۸بیت پرارزش hash با بیت های [312 : 319] ***پر شده‌اند که ۱۲۰ واحد از بازه ای که برای ۳۳امین ۸ بیت ارزشمند hash اختصاص داده می‌شود بیشتر است. (در بالا ۳۳امین نوشته شده است)***

- ۸ مجموعه که به صورت صعودی پیش برویم به ۴۰امین ۸بیت می‌رسیم که طبق نظم با بیت های [248 : 255] پر شده است و ۴۱امین ۸ بیتی با بازه [128 : 135] پر شده است.
- ۸ مجموعه که به صورت صعودی پیش برویم به ۴۸امین ۸بیت می‌رسیم که طبق نظم با بیت های [184 : 191] پر شده است و ۴۹امین ۸ بیتی با بازه [64 : 71] پر شده است.
- ۸ مجموعه که به صورت صعودی پیش برویم به ۵۶امین ۸بیت می‌رسیم که طبق نظم با بیت های [120 : 127] پر شده است و ۵۷امین ۸ بیتی با بازه [0 : 7] پر شده است.
- از ۵۷امین مجموعه ۸ تایی با ارزش hash تا آخرین مجموعه باارزش hash (۶۴امین) نیز به صورت صعودی و طبق نظم پیش می‌رود. (خط ۱۲۱)

بعد از خطوط assignment، ۱۸ instance از ماژول skein_round گرفته شده است. این in-stance ها را از 00 تا $0H$ نام‌گذاری کردیم (نام‌گذاری در مبنای بالاتر از ۱۰ شده است)

ورودی skein_round ها

- **کلاک** که همه به کلاک سیستم متصل اند.
- **Round** رجیستر ۳۲بیتی که به ترتیب ورودی ۰ تا ۱۷ به هر اینستنس داده شده است.
- **p** رجیستر ۵۱۲بیتی – که به اینستنس شماره 01 تا $0H$ به ترتیب $p01$ تا $p0H$ وصل شده است. به اینستنس شماره 00 هم $p00\_q$ وصل شده است.
- **H** رجیستر ۵۷۶بیتی – که به اینستنس شماره 01 تا $0H$به ترتیب $h01$ تا $h0H$ وصل شده است. به اینستنس شماره 00 هم $h00\_q$ وصل شده است.
- **T۰** رجیستر ۶۴بیتی – که به اینستنس شماره 00 تا $0H$ به ترتیب این دنباله سه‌تایی وصل شده است، $t0\_q, t1\_q, t2\_q$ این دنباله سه‌جمله‌ای به ترتیب تکرار می‌شود.
- **T۱** رجیستر ۶۴بیتی – دقیقا مثل $T0$ با این تفاوت که دنباله سه‌تایی $t1\_q, t2\_q, t0\_q$ به این شکل است.
- **P۰** رجیستر ۵۱۲بیتی ـ که اینستنس شماره 00 تا $0H$به ترتیب $o00$ تا $o0H$ وصل شده است.
- **H۰** رجیستر ۵۷۶بیتی ـ که اینستنس شماره 00 تا $0H$به ترتیب $ho00$تا $ho0H$ وصل شده است. خط(۱۴۱)

در ادامه یک always بلاک داریم که حساس به تغییرات همه چیز است. (خط ۱۴۳) در این بلاک متغیرهایی که در انتهایشان d_ دارند مقداردهی می‌شوند.

ابتدا $phase\_d$ مقدار not متغیر $phase\_q$ را به خود اختصاص می‌دهد.

- **اگر phase_q یک باشد**
  - مقداردهی به $p00\_d$ (۵۱۲بیتی): ۶۴ بیت کم‌ارزش ($[63:0]$) از $data$ در ۶۴ بیت پرارزش $p00\_d$ قرار می‌گیرد. سپس در ۳۲ بیت بعدی $p00\_d$ (از چپ) عینا $nonce\_le$ قرار داده می‌شود. سپس ۳۲ بیت باقی‌مانده از $data([95:64])$ طبق روند قرار داده می‌شود. باقی بیت‌های این رجیستر هم با صفر پر می‌شوند $(384'd)$ – (خط ۱۴۸)
  - مقداردهی به $h00\_d$ (۵۷۶بیتی): در ۶۴ بیت کم‌ارزش این reg مقدار صفر قرار داده می‌شود و باقی بیت‌ها دقیقا به $midstate$ (ورودی ۵۱۲ بیتی) متصل می‌شوند.
  - مقداردهی به$t0_d$ (۶۴ بیتی): $h0000000000000050$
  - مقداردهی به$t1_d$ (۶۴ بیتی): $hb000000000000000$
  - مقداردهی به $t2\_d$ (۶۴ بیتی): $hb000000000000050$
  - h_d هم مقدار h_q را به خود می‌گیرد.
- **اگر phase_q صفر باشد**
  - مقداردهی به $p00\_d$ (۵۱۲بیتی): این reg با صفر پر می‌شود.
  - مقداردهی به $h00\_d$ (۵۷۶ بیتی):
    - بیت‌های $[575:512]$: $data[63:0]\hat{}(oH[511:448]+hH[575:512])$
    - بیت‌های $[511:448]$: $\{data[95:64]، nonce2\_le\}\ \hat{}\ (oH[447:384]+hH[511:448])$
    - بیت‌های $[447:384]$: $oH[383:320]+hH[447:384]$
    - بیت‌های $[383:320]$: $oH[319:256]+hH[383:320]$
    - بیت‌های $[319:256]$: $oH[255:192]+hH[319:256]$
    - بیت‌های $[255:192]$: $oH[191:128]+hH[255:192]+64'h0000000000000050$
    - بیت‌های $[191:128]$: $oH[127:64]+hH[191:128]+64'hb000000000000000$
    - بیت‌های $[127:64]$: $oH[63:0]+hH[127:64]+18$
  - مقداردهی به$t0_d$ (۶۴ بیتی): $h0000000000000008$
  - مقداردهی به $t1\_d$ (۶۴ بیتی): $hFF00000000000000$
  - مقداردهی به $t2\_d$ (۶۴ بیتی): $hFF00000000000008$
  - مقداردهی به h_d (۵۱۲ بیتی):
    - بیت‌های $[511:448]$: $o0H[511:448]+ho0H[575:512]$
    - بیت‌های $[447:384]$: $o0H[447:384]+ho0H[511:448]$
    - بیت‌های $[383:320]$: $o0H[383:320]+ho0H[447:384]$
    - بیت‌های $[319:256]$: $o0H[319:256]+ho0H[383:320]$
    - بیت‌های $[255:192]$: $o0H[255:192]+ho0H[319:256]$
    - بیت‌های $[191:128]$: $o0H[191:128]+ho0H[255:192]+64'h0000000000000008$
    - بیت‌های $[127:64]$: $o0H[127:64]+ho0H[191:128]+64'hFF00000000000000$
    - بیت‌های $[63:0]$: $o0H[63:0]+ho0H[127:64]+18$

نظم مناسبی دیده می‌شود به این شکل که به ترتیب ۶۴ بیت پرارزش h_d با مجموع ۶۴ بیت پرارزش $o0H$ و ۶۴ بیت پرارزش $ho0H$ پر می‌شود. به جز ۳ مورد آخر که با اعدادی ثابت هم جمع می‌شوند.

Always بلاک دوم فقط به لبه مثبت کلاک حساس است. (خط ۲۱۱) (عموما متغیر های q_ مقادیر متناظر d_ را به خود می‌گیرند)

- hH مقدار $ho0H$ را به خود می‌گیرد.
- oH مقدار $o0H$ را به خود می‌گیرد.
- $phase\_q$ مقدار $phase\_d$ را به خود می‌گیرد.
- h_q مقدار h_d را به خود می‌گیرد.
- $t0\_q$ مقدار $t0\_d$ را به خود می‌گیرد.
- $t1\_q$ مقدار $t1\_d$ را به خود می‌گیرد.
- $t2\_q$ مقدار $t2\_d$ را به خود می‌گیرد.
- در ادامه مجموعه ای از مقداردهی‌ها را مربوط به reg های $p0x$ و $h0x$ داریم. (خط ۲۲۶ تا ۲۶۱) (x منظور از ۱ تا H)
- $h0x$ ها: مقدار $ho0y$ را می‌گیرند با این تفاوت که y از x یک واحد کمتر است. (به طور مثال $h01$ مقدار $ho00$ را به خود می‌گیرد)
- $p0x$ ها: مقدار $o0y$ را می‌گیرند با این تفاوت که y از x یک واحد کمتر است. (به طور مثال $h01$ مقدار $o00$ را به خود می‌گیرد)
- $p00\_q$ مقدار $p00\_d$ را می‌گیرد.
- $h00\_q$ مقدار $h00\_d$ را می‌گیرد.
- $nonce2$ هم که در ابتدای فایل مقداری مجهول داشت اینجا مقدار $nonce$ (ورودی) منهای $32d54$ را می‌گیرد.

skein_round ۲.۴.۲

در خط ۱۲۴ از فایل وریلاگ، ۱۸ اینستنس از ماژول skein_round گرفته شده است.

اطلاعات کلی

skein_round	
inputs	$clk, [31:0]round, [511:0]p, [575:0]h, [63:0]t0, [63:0]t1$
outputs	$[511:0]p0, [575:0]h0$

جدول ۲.۲: اطلاعات کلی ماژول skein_round

- در این ماژول چهار ماژول دیگر زیر ایجاد شده اند.
  - skein_round_1
  - skein_round_2
  - skein_round_3
  - skein_round_4
- در این ماژول یک always block و تعدادی assignment وجود دارد.
- دو مجموعه reg تعریف شده:
  - ۶۴بیتی: $p0, p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7$
  - ۵۷۶بیتی: $hx0, hx1, hx2, hx3, hx4$
- یک مجموعه wire تعریف شده:
  - ۵۱۲بیتی: $po0, po1, po2, po3, po4$
- ۳ عدد assignment داریم:
  - ho (یکی از خروجی‌ها) از $hx4$ مقدار می‌گیرد.
  - po (دیگر خروجی) از $po4$ مقدار می‌گیرد.
  - $Po0$ به ترتیب ۸بیت-۸بیت (ازپرارزش به کم‌ارزش) از reg های $p0, p1, ..., p7$ مقدار می‌گیرد.
- از هر ۴ ماژول باقی مانده (skein_round_1,2,3,4) در کد یک اینستنس گرفته شده است. (خط ۳۱۰)
  - ورودی کلاک به کلاک سیستم متصل شده است. ورودی $even$ ماژول‌ها همگی به $round[0]$! متصل اند. (یکی از بیت‌های ورودی)
  - به عنوان in و out هم به هر ماژول $po(x)$ و $po(x+1)$ داده می‌شود که $x+1$ شمارهٔ $round$ ماژول است. به طور مثال به ماژول $skein\_round\_1$ برای ورودی $po0$ و برای خروجی $po1$ داده می‌شود.

نکته مهم این است که خروجی ماژول ۱ ورودی ماژول ۲ است و به همین ترتیب تا ماژول ۴.

- یک $always - block$ حساس به لبه مثبت کلاک داریم. (خط ۳۱۵)
  - ورودی های h و p را به صورت ۶۴بیت - ۶۴بیت جمع می‌زند و در $p0$ تا $p7$ نگه‌داری می‌کند.
  - به این شکل که جمع پرارزش‌ترین۶۴بیت h و p در $p0$ ریخته می‌شود. (و به همین ترتیب پیش می‌رود)
  - از $p0$ تا $p4$ کاملا طبق نظم گفته‌شده انجام می‌شود.
  - در مورد $p5$ علاوه بر دو مجموعهٔ ۶۴بیتی با $t0$ (یکی از ورودی‌ها) هم جمع می‌شود.
  - در مورد $p6$ علاوه بر دو مجموعهٔ ۶۴بیتی با$t1$ (یکی از ورودی‌ها) هم جمع می‌شود.
  - در مورد $p7$ علاوه بر دو مجموعهٔ ۶۴بیتی با $round$ (یکی از ورودی‌ها) هم جمع می‌شود.
- برای reg های hx (۵۷۶بیتی) هم یک جابه‌جایی اتفاق میفتد.
  - به این شکل که $hx4$، مقدار $hx3$ را می‌گیرد.
  - به این شکل که $hx3$، مقدار$hx2$ را می‌گیرد.
  - به این شکل که $hx2$، مقدار $hx1$ را می‌گیرد.

- به این شکل که $hx1$، مقدار $hx0$ را می‌گیرد.
- برای $Hx0$ اتفاق نسبتا پیچیده‌ای میفتد.
  - ۶۴ بیت کم‌ارزشش با ۶۴ بیت پرارزش h (ورودی) پر می‌شود.
  - ۴۴۸ بیت پرارزشش با بیت‌های $[64:511]$ از h پر می‌شود.
  - ۶۴ بیت باقی‌مانده وسط $hx0$ ($[64:127]$) با نتیجهٔ زیر پر می‌شود. (خط ۳۴۱)

```
((h[575:512] ^ h[511:448]) ^ (h[447:384] ^ h[383:320])) ^ ((h[319:256] ^ h
    [255:192]) ^  (h[191:128] ^ h[127: 64])) ^ 64'h1BD11BDAA9FC1A22
```

در واقع در توضیح خط بالا می‌توان گفت xor تمام مجموعه‌های ۶۴ بیتی ورودی h به جز کم‌ارزش‌ترین مجموعه $(h[64:0])$ است که در نهایت با یک عدد ثابت ۶۴بیتی xor شده است.

۳.۴.۲ skein_round_1,2,3,4

چهار ماژول باقی‌مانده با نام‌های $skein\_round\_1$, $skein\_round\_2$, $skein\_round\_3$, $skein\_round\_4$ را به دلیل شباهت ساختاری با هم بررسی می‌کنیم.

اطلاعات کلی

skein_round_1,2,3,4	
inputs	$clk, even, [511:0]in$
outputs	$[511:0]out$

جدول ۳.۲: اطلاعات کلی ماژول‌های skein_round_1,2,3,4

- در هر ۴ ماژول دو مجموعه wire گرفته شده است:
  - ۶۴ بیتی: $p0, p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7$
  - ۶۴ بیتی: $p0x, p1x, p2x, p3x, p4x, p5x, p6x, p7x$
- مجموعه ای از assignment ها داریم:
  - $P0$ تا $p7$ به ترتیب به ۶۴ بیت‌های پرارزش تا کم‌ارزش in متصل اند. (به کم‌ارزش‌ترین $p7$)
- Assignment های مربوط به $p0x$ تا $p7x$ برای ۴ ماژول متفاوت است در نتیجه جداگانه بررسی می‌کنیم:
  - ماژول ۱

    Pkx ها با k های زوج مقدار $pk + p(k+1)$ را به خود می‌گیرند. مثلا $p2x = p2 + p3$

    $P1x$ با توجه به $even$ مقدار می‌گیرد:
    - اگر $even$ یک باشد، $p1[17:0], p1[63:18]$ (خط شکاف بین بیت ۱۷ و ۱۸)
    - اگر $even$ صفر باشد، $p1[24:0], p1[63:25]$ (خط شکاف بین بیت ۲۴ و ۲۵)

    $P3x$ با توجه به $even$ مقدار می‌گیرد:
    - اگر $even$ یک باشد، $p3[27:0], p3[63:28]$ (خط شکاف بین بیت ۲۷ و ۲۸)

* اگر $even$ صفر باشد، $p3[33:0], p3[63:34]$ (خط شکاف بین بیت ۳۳ و ۳۴)

$P5x$ با توجه به $even$ مقدار می‌گیرد:

* اگر $even$ یک باشد، $p5[44:0], p5[63:45]$ (خط شکاف بین بیت ۴۴ و ۴۵)
* اگر $even$ صفر باشد، $p5[29:0], p5[63:30]$ (خط شکاف بین بیت ۲۹ و ۳۰)

$P7x$ با توجه به $even$ مقدار می‌گیرد:

* اگر $even$ یک باشد، $p7[26:0], p7[63:27]$ (خط شکاف بین بیت ۲۶ و ۲۷)
* اگر $even$ صفر باشد، $p7[39:0], p7[63:40]$ (خط شکاف بین بیت ۳۹ و ۴۰)

- ماژول ۲

```
//module 2
assign p0x = p0 + p3
assign p1x = (even) ? { p1[30:0], p1[63:31] } : { p1[50:0], p1[63:51] }
assign p2x = p2 + p1
assign p3x = (even) ? { p3[21:0], p3[63:22] } : { p3[46:0], p3[63:47] }
assign p4x = p4 + p7
assign p5x = (even) ? { p5[49:0], p5[63:50] } : { p5[53:0], p5[63:54] }
assign p6x = p6 + p5
assign p7x = (even) ? { p7[36:0], p7[63:37] } : { p7[13:0], p7[63:14] }
```

با توجه به توضیحات در مورد ماژول ۱، در ماژول ۲ با حفظ کلیات جزئیات تغییر می‌کند.

- ماژول ۳

```
//module 3
assign p0x = p0 + p5
assign p1x = (even) ? { p1[46:0], p1[63:47] } : { p1[38:0], p1[63:39] }
assign p2x = p2 + p7
assign p3x = (even) ? { p3[14:0], p3[63:15] } : { p3[34:0], p3[63:35] }
assign p4x = p4 + p1
assign p5x = (even) ? { p5[27:0], p5[63:28] } : { p5[24:0], p5[63:25] }
assign p6x = p6 + p3
assign p7x = (even) ? { p7[24:0], p7[63:25] } : { p7[20:0], p7[63:21] }
```

- ماژول ۴

```
//module 4
assign p0x = p0 + p7
assign p1x = (even) ? { p1[19:0], p1[63:20] } : { p1[55:0], p1[63:56] }
assign p2x = p2 + p5
assign p3x = (even) ? { p3[ 7:0], p3[63: 8] } : { p3[41:0], p3[63:42] }
assign p4x = p4 + p3
assign p5x = (even) ? { p5[ 9:0], p5[63:10] } : { p5[ 7:0], p5[63: 8] }
assign p6x = p6 + p1
assign p7x = (even) ? { p7[54:0], p7[63:55] } : { p7[28:0], p7[63:29] }
```

ماژول های ۳ و ۴ هم در این مورد مشابهت دارند با توضیحات داده شده در مورد ماژول ۱، pkx های با k زوج مجموع دو p هستند. اگر k فرد باشد، pkx برابر همان pk خواهد بود با این تفاوت که با توجه به صفر یا یک بودن $even$ بین یکی از بیت های pk شکاف می‌اندازد و سمت چپ شکاف را در قسمت کم‌ارزش خود و سمت راست شکاف را در قسمت پرارزش پر می‌کند. (در واقع همان rotation که در توصیف الگوریتم بیان شد این‌جا دیده می‌شود).

- تنها $always - block$ در ماژول (حساس به لبه مثبت کلاک) :

در این بلاک خروجی out، به صورت مجموعه های ۶۴بیتی مقداردهی می‌شود. Out ۵۱۲ بیتی است پس ۸ بار مقداردهی لازم است. برای هر ۴ ماژول مقدارهای نسبت‌داده‌شده به ۶۴بیتی های out را (به ترتیب از پرارزش‌ترین ۶۴بیت تا کم‌ارزش‌ترین آن) داریم :

- ماژول ۱

Index	7	6	5	4	3	2	1	0
Value	$p0x$	$p2x$	$p1x\hat{}p0x$	$p3x\hat{}p2x$	$p4x$	$p5x\hat{}p4x$	$p6x$	$p7x\hat{}p6x$

- ماژول ۲

Index	7	6	5	4	3	2	1	0
Value	$p0x$	$p1x\hat{}p2x$	$p2x$	$p3x\hat{}p0x$	$p4x$	$p5x\hat{}p6x$	$p6x$	$p7x\hat{}p4x$

- ماژول ۳

Index	7	6	5	4	3	2	1	0
Value	$p0x$	$p1x\hat{}p4x$	$p2x$	$p3x\hat{}p6x$	$p4x$	$p5x\hat{}p0x$	$p6x$	$p7x\hat{}p2x$

- ماژول ۴

Index	7	6	5	4	3	2	1	0
Value	$p0x$	$p1x\hat{}p6x$	$p2x$	$p3x\hat{}p4x$	$p4x$	$p5x\hat{}p2x$	$p6x$	$p7x\hat{}p0x$

فصل ۳

شبیه‌سازی

توصیف روند شبیه‌سازی سخت‌افزار و گام‌های اجرایی، مشاهدهٔ ورودی‌ها و خروجی‌های اصلی و میانی، مقایسه با مقادیر حاصل از اجرای کد نرم‌افزاری (مدل طلایی)، توصیف مراحل اجزای الگوریتم به همراه شکل موج‌ها، نحوهٔ عملکرد Testbench

۱.۳ توضیح روند شبیه‌سازی سخت‌افزار و گام‌های اجرایی

برای شبیه‌سازی سخت‌افزاری کد verilog الگوریتم Skein را در محیط شبیه‌سازی Modelsim اجرا کردیم. گام‌های اجرایی به صورت کلی برای شبیه‌سازی کد سخت‌افزاری موارد زیر بود.

- مطالعه کد الگوریتم و تعیین ورودی‌ها
- نوشتن Testbench
- اجرای کد در محیط Modelsim با Testbench های مختلف
- گرفتن Waveform و مقادیر خروجی (اصلی و میانی)

۲.۳ مشاهدهٔ ورودی‌ها و خروجی‌های اصلی و میانی

در ادامه ابتدا کد های Testbench اجرا شده بر الگوریتم و سپس Waveform های حاصله و در انتها خروجی‌ها به صورت متنی آورده می‌شود.

۱.۲.۳ توضیح نحوهٔ عملکرد Testbench

در ادامه ابتدا کد verilog نوشته‌شده برای Testbench آورده و سپس توضیحاتی دربارهٔ آن ایراد شده است.

Testbench 1

```
//Master Testbench example

module skein_tb;

// Inputs
reg clk;
reg [511:0] midstate;
reg [95:0] data;
reg [31:0] nonce;

// Outputs
wire [511:0] hash;

// Instantiate the Unit Under Test (UUT)
skein512 uut (
.clk(clk),
.midstate(midstate),
.data(data),
.nonce(nonce),
.hash(hash)
);

initial begin
// Initialize Inputs
clk = 0;
midstate = 0;
data = 0;
nonce = 0;

// Wait 100 ns for global reset to finish
#1000
data = 512'd12345609823;
midstate = 96'd456;
nonce = 32'd453;
#1000;
data = 512'd765943209455554312229760000000654;
midstate = 96'd456;
nonce = 32'd453;

end
always
#1 clk = clk;endmodule
```

Testbench 2

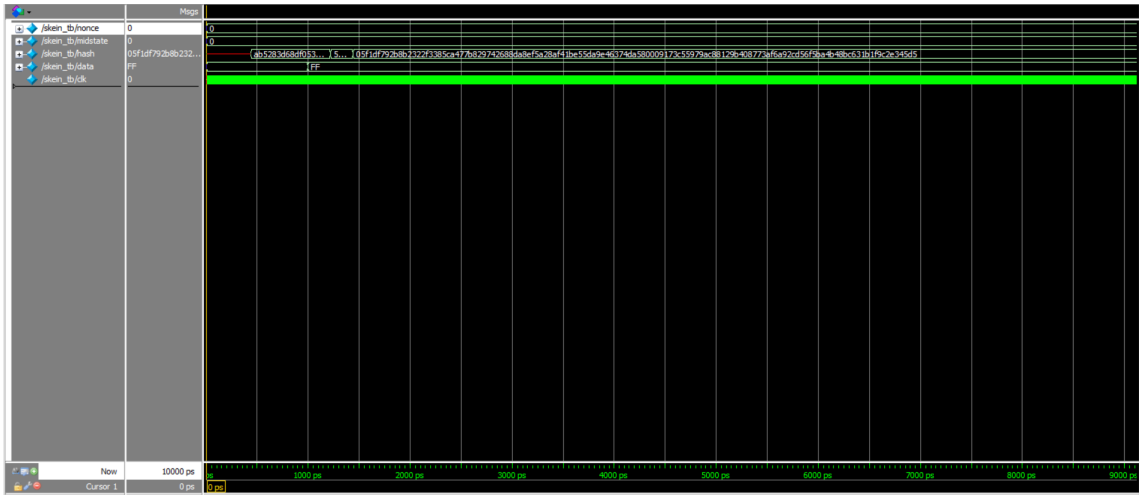
```
module skein_tb;

  // Inputs
  reg clk;
  reg [511:0] midstate;
  reg [95:0] data;
  reg [31:0] nonce;

  // Outputs
  wire [511:0] hash;

  // Instantiate the Unit Under Test (UUT)
  skein512 uut (
    .clk(clk),
    .midstate(midstate),
    .data(data),
    .nonce(nonce),
    .hash(hash)
  );

  initial begin
    // Initialize Inputs
    clk = 0;
    midstate = 0;
    data = 0;
    nonce = 0;

    // Wait 100 ns for global reset to finish
    #1000
          data = "FF";
    #5000;
  end
   always
    #1 clk = clk;endmodule
```

۲.۲.۳ شکل موج حاصل از Testbench

Waveform 1

شکل ۱.۳: شبیه‌سازی با Testbench 1

Waveform 2



شکل ۲.۳: شبیه‌سازی با Testbench 2

۳.۲.۳ جدول ورودی‌ها و خروجی‌های Testbench

(clk) Time	Data	Nonce	Midstate
0 - 1000	0	0	0
1000 - 2000	512’d12345609823	32’d453	96’d456
2000 - End	512’d765943209455554312229760000000000654	32’d453	96’d456

جدول ۱.۳: مقادیر ورودی‌ها و زمان برای Testbench 1

(clk) Time	Data	Nonce	Midstate
0 - 1000	0	0	0
1000 - End	FF	0	0

جدول ۲.۳: مقادیر ورودی‌ها و زمان برای Testbench 2

Time	Hash
433 - 1217	ab5283d68df053ac62d053789d4b45b81a02c959d7cab97fc43451166351f117 f949fe918475f762ba8056704633821146164831 6d4432e6c505edc3b5ee6ff5
1217 - 1436	dd477bfb0f07e299560b050c7aedb947bad77571f9a7d886a06f197a55f7946b 8a9cecbb948a5478380168f8bfaf8e6d7d828459564973272b18cdf99d0234f2
1436 - 2217	0c0dea4dfd9994c6eb97f500589565239347be8a5b2e4ce4832c6cc9095baa51 bf2bdde45ef619f4086e71e7d86f637314357e6d20632c31612f5424644cc223
2217 - 2437	6d383e0cceb223c20c45b816a165072ad200b8091682e8e5c31295ee62ca3719 afbd493a4b85859d1cbe08d98bf01e66be18f3d3536987eeef06cc7965851bf8
2437 - End	6b722c1b1fb150c850e02ee44e03a447401ca4ac3cde4de6eb95b2e853d0d34b 53583685f4b21f9b98229734756d7b835e46c2f589e461ab7c3177fb7e572b64

جدول ۳.۳: مقادیر درهم‌سازی و زمان برای Testbench 1

Time	Hash
433 - 1217	ab5283d68df053ac62d053789d4b45b81a02c959d7cab97fc43451166351f117 f949fe918475f762ba8056704633821146164831 6d4432e6c505edc3b5ee6ff5
1217 - 1436	5e63442c883739354bfbf8008368ac0c09c61fa86b430b2864bdfe41bf48dd9b 8f653c22f3b712ad81f285ce4e81ca5083a9edcc07f7ddfdb0748e5b8fca57a7
1436 - End	05f1df792b8b2322f3385ca477b829742688da8ef5a28af41be55da9e46374da 580009173c55979ac88129b408773af6a92cd56f5ba4b48bc631b1f9c2e345d5

جدول ۴.۳: مقادیر درهم‌سازی و زمان برای Testbench 2

۳.۳ اجرا و تحلیل کد نرم‌افزاری (مدل طلایی)

به همراه پروژه کد C الگوریتم Skein نیز به عنوان مدل طلایی ارائه شد، در ادامه مختصرا کد C مدل طلایی را تحلیل می‌کنیم.

۱.۳.۳ تحلیل کد C

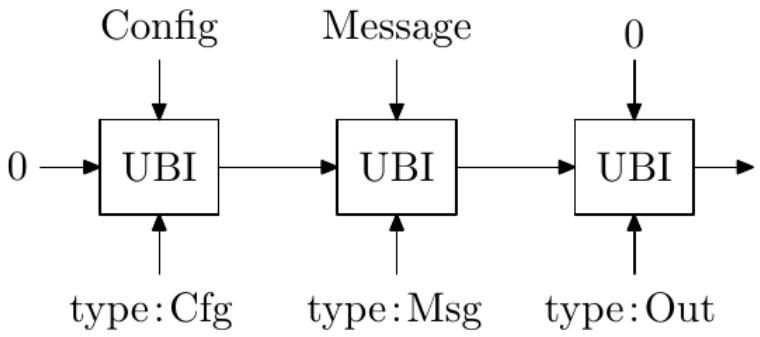
تابع $skeinhash$ با گرفتن ورودی $data$ که به صورت آرایه ای از $unsignedchar$ و $output$ که به صورت آرایه‌ای از $uint8\_t$ میباشد شروع می کند.با فراخواندن $sph\_skein512\_init$ که ورودی از جنس $sph\_skein\_big - contex$ می گیرد و سپس $sph\_skein512$ که ورودی $sph\_skein\_big - contex$ و داده و طول داده را می گیرد و در آخر $sph\_skein512\_close$ که خروجی و $sph\_skein\_big - context$ را به عنوان ورودی دارد کار خود را پایان می دهد و نتیجه را در آرایه خروجی به طول ۳۲ کپی می‌کند.
در ابتدا $sph\_skein\_big - context$ بررسی می شود: زمینه ای برای محاسبه ی اسکین شامل مقادیر واسطه و بخشی از داده از آخرین بلوک وارد شده است.

```
#ifndef DOXYGEN_IGNORE
    unsigned char buf[64];    /* first field, for alignment */
    size_t ptr;
    sph_u64 h0, h1, h2, h3, h4, h5, h6, h7;
    sph_u64 bcount;
#endif
} sph_skein_big_context;
```

- buf
آرایه ای به طول ۶۴ که بخش به بخش داداه را در خود ذخیره می‌کند و روی آن پردازش انجام می‌شود.
- ptr
سایز بخش اشغال شده بافر
- $h0..h7$
$h0, ..., h7$: برای محاسبه در UBI.استفاده می‌شود$(uint64_t)$
- تعداد بلاک های داده
$bcount$

تابع $skein\_big\_init$ مقادیر $sph\_skein\_big - context$ که از این به بعد از آن به اختصار ctx یاد میشود را مقدار دهی اولیه کرده و تمامی مقادیر آن را به جز بافر صفر می‌گذارد.
تابع $sph\_skein512$ بخش اصلی محاسبات را به عهده دارد.اگر سایز بافر ctx خالی مانده بیشتر از طول داده باشد داده در آن کپی می‌شود.
سپس مقادیر ctx توسط تابع $READ\_STATE\_BIG$ به روز رسانی می‌شوند و با مشخص کردن مقدار $first$ که بعدتر از آن استفاده میکند و برابر با متغیر$first$ در UBI می‌باشد با استفاده از $bcount$ زمینه که در ابتدا برابر با 0 است ،وارد لوپ محاسبه می‌شود.
اگر بافر پر شده باشد، $bcount$ به علاوه یک شده و $first$ و ptr صفر می‌شوند. تابع UBI_BIG با ورودی $first + 96$ و 0 فراخوانی می‌شود که همان The Unique Block Iteration (UBI) chaining mode است که یک مقدار زنجیره ای ورودی را با یک رشته ورودی با طول اختیاری ترکیب می کند و خروجی با طول ثابت را تولید می کند.
.بلوک های پیام $M0$ و $M1$ و ...و $M7$ هرکدام گنجایش ۶۴ بیت داده را دارند که به ترتیب توسط بافرctx پر می‌شوند.
مقدار $p0p7$ مربوط به threefish که متن ساده، یک رشته از بایت های با طولی برابر با کلید، است برابر

$m0..m7$ قرار می‌گیرد.
دو متغیر $t0$ و $t1(threefishtweak)$ با استفاده از $bcount$ که متعلق به ctx است و ورودی های تابع UBI_BIG محاسبه میشوند و تابع $TFBIG_KINIT$با ورودی های $h0h7$مربوط به ctx و $t0$ و $t1$ که قبلتر محاسبه شد فراخوانی میشود که با استفاده از آن و $TFBIG\_ADDKEY$ که با هم نقش threefish اسکین را به عهده دارند $h0..h7$ مقدار دهی میشوند.به طوری که $hn = mn\hat{}pn$.
و این مرحله تا وقتی داده ای که در بافر نرفته باقی مانده ادامه دارد و سپس تمامی مقادیر ctx در آن نوشته میشوند.(به جز بافر)
خروجی را در بافر ارائه شده میریزد و به پردازش خاتمه میدهد. زمینه یا ctx به طور خودکار دوباره مقدار دهی اولیه می‌شود.ورودی این تابع به جز زمینه و آرایه‌ی خروجی،تعداد بیت های اضافه n و خود بیت های اضافه ubمیباشد که خود تابع دو ورودی آخر را مشخص می‌کند.اگر nصفر نباشد مقدار x ای با استفاده از این دو تولید میشود که$sph_skein512$ آن فراخوانی میشود.در این مرحله، اگر $ptr == 0$ یعنی پیام خالی است؛ در غیر این صورت، بین ۱ تا ۶۴ بایت وجود دارد که هنوز پردازش نشده اند. در هر صورت بافر باید به یک بلوک کامل پر شده با صفر تبدیل شود(مشخصه Skein می گوید که پیام خالی پوشیده شده است تا حداقل یک بلوک برای پردازش وجود داشته باشد). هنگامی که این بلوک پردازش شده است، این فرآیند دوباره با بلوک پر از صفر، برای خروجی (آن بلوک encoding "۰"، بیش از ۸ بایت و سپس با صفر پر شده) انجام می شود.
همانطور که در شکل ۳.۳ میبینیم اسکین بر اساس چندین فراخوانی UBI ساخته شده است. نتیجه محاسبات بلوک پیکربندی UBI برای تمام پیام‌ها ثابت است و می تواند به صورت IV از پیش محاسبه شود.



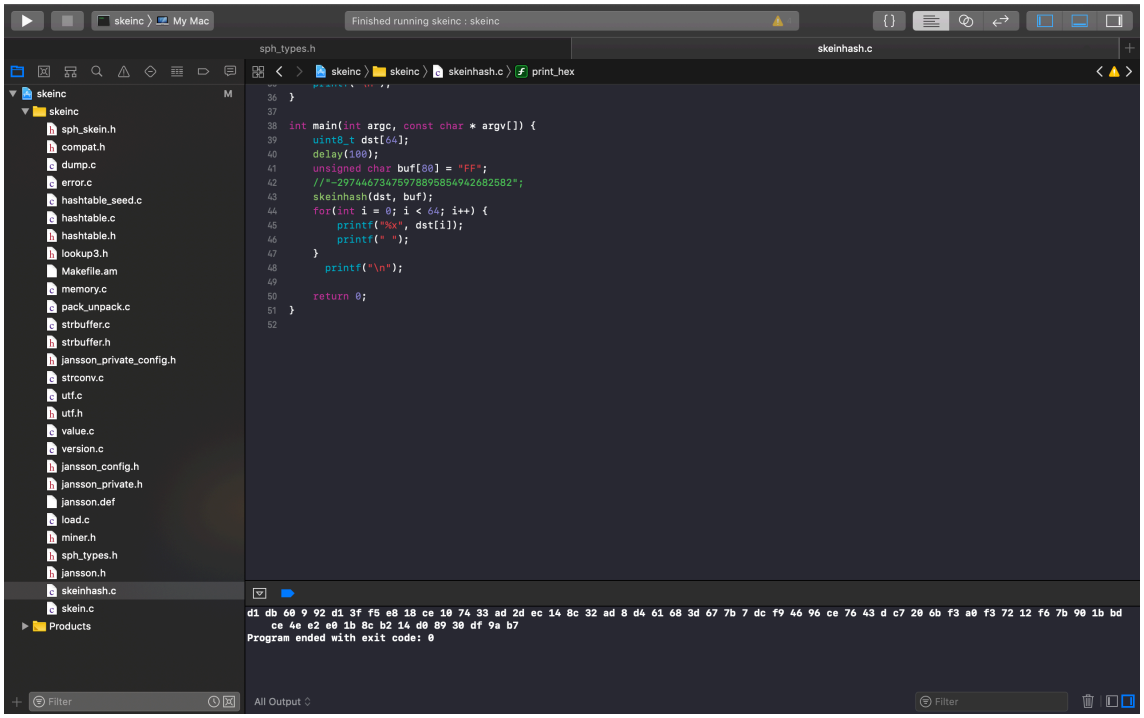
شکل ۳.۳: نحوه کار Skein

```
static const sph_u64 IV512[] = {
    SPH_C64(0x4903ADFF749C51CE), SPH_C64(0x0D95DE399746DF03),
    SPH_C64(0x8FD1934127C79BCE), SPH_C64(0x9A255629FF352CB1),
    SPH_C64(0x5DB62599DF6CA7B0), SPH_C64(0xEABE394CA9D5C3F4),
    SPH_C64(0x991112C71A75B523), SPH_C64(0xAE18A40B660FCC33)
};
```

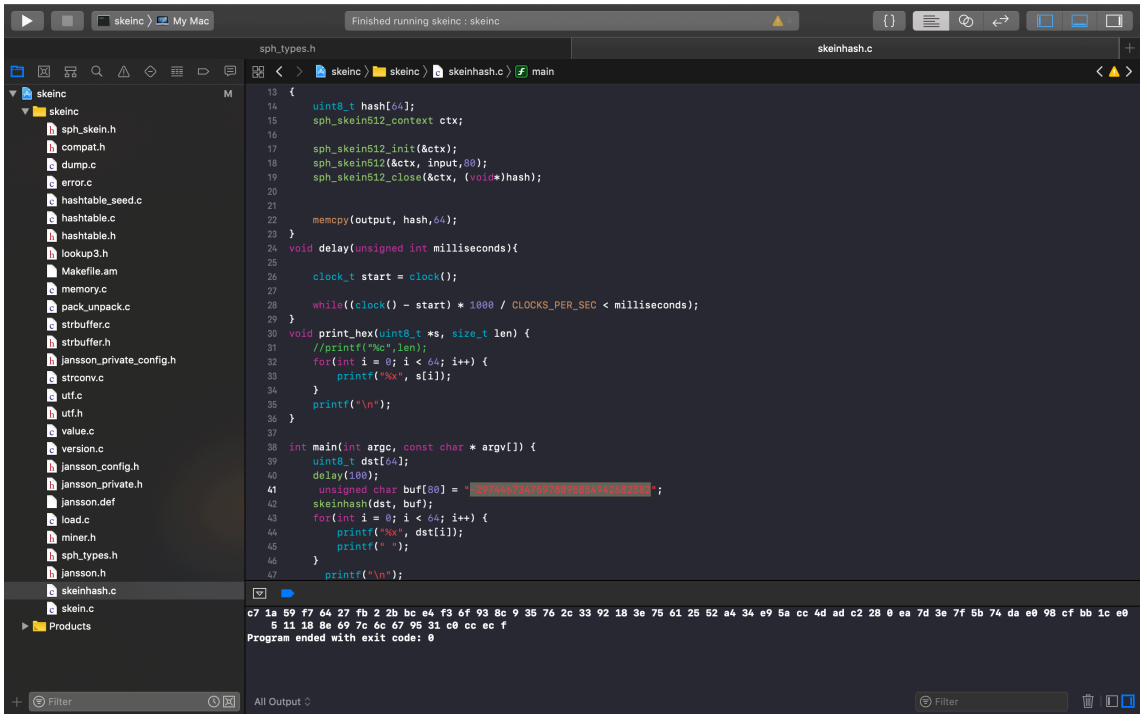
۲.۳.۳ مشاهدهٔ خروجی‌های کد C

کد C که به همراه پروژه قرار داشت را اجرا کردیم، در ادامه تصویری از کد اجراشده و جدول خروجی‌های آن آمده است.

```c
#include "miner.h"

#include <stdio.h>
#include <stdlib.h>
#include <stdint.h>
#include <string.h>
#include<time.h>
#include "sph_skein.h"



 void skeinhash(void *output, const void *input)
{
    uint8_t hash[64];
    sph_skein512_context ctx;

    sph_skein512_init(&ctx);
    sph_skein512(&ctx, input,80);
    sph_skein512_close(&ctx, (void*)hash);


    memcpy(output, hash,64);
}
void delay(unsigned int milliseconds){

    clock_t start = clock();

    while((clock() - start) * 1000 / CLOCKS_PER_SEC < milliseconds);
}
void print_hex(uint8_t *s, size_t len) {
    //printf("%c",len);
    for(int i = 0; i < 64; i++) {
        printf("%x", s[i]);
    }
    printf("\n");
}

int main(int argc, const char * argv[]) {
    uint8_t dst[64];
    delay(100);
    unsigned char buf[80] = "FF";
       skeinhash(dst, buf);
    for(int i = 0; i < 64; i++) {
        printf("%x", dst[i]);
        printf(" ");
    }
      printf("\n");

    return 0;
}
```



شکل ۴.۳: اجرای کد C



شکل ۵.۳: اجرای کد C

Output 1

input	output
-297446734759788958549426825 82	c71a59f76427fb022bbce4f36f938c0935762c3392183e75612552a434e95acc 4dadc22800ea7d3e7f5b74dae098cfbb1ce00511188e697c6c679531c0ccec0f
FF	d1db600992d13ff5e818ce107433ad2dec148c32ad08d461683d677b07dcf946 96ce76430dc7206bf3a0f37212f67b901bbdce4ee2e01b8cb214d08930df9ab7

جدول ۵.۳: جدول ورودی و خروجی‌های مدل طلایی

۳.۳.۳ مقایسه کد verilog با مدل طلایی و مرجع اصلی الگوریتم

همان‌طور که در خروجی‌های کد C و verilog مشهود است یکی از دو کد مدل طلایی یا کد سخت‌افزاری داری اشکالاتی‌ست که منجر به تفاوت خروجی می‌شود، طبق بررسی‌های انجام‌شده کد C با کد اصلی الگوریتم تطابق دارد و نتیجتا اشکال از کد verilog است. در ادامه مشکلات یافت‌شده در کد verilog ذکر خواهد شد.

۴.۳.۳ مقایسه خروجی کد اصلی با داکیومنت مرجع

یکی از ورودی‌ها همانند ورودی مثال در داکیومنت مرجع داده شد اما خروجی‌ها یکی نبود، خروجی داکیومنت مرجع در ادامه آمده است، تیم پروژه موفق به یافت علت تفاوت در پاسخ‌ها نشد.

input	output
FF	71B7BCE6FE6452227B9CED6014249E5BF9A9754C3AD618CCC4E0AAE16B316CC 8CA698D864307ED3E80B6EF1570812AC5272DC409B5A012DF2A579102F340617A

جدول ۶.۳: جدول ورودی و خروجی‌های مستند مرجع

۵.۳.۳ اصلاحالات موردنیاز کد verilog

در ابتدا لازم به ذکر است که تلاش شده تا الگوریتم با الگوریتم داکیومنت اصلی که توسط طراحان الگوریتم طراحی شده مطابقت داده شود، تمامی ارجاعات داخل متن به

The Skein Hash Function Family
Version 1.3 — 1 Oct 2010
http://www.skein-hash.info/sites/default/files/skein1.3.pdf

خواهد بود.

در ماژول های چهارگانه $skein\_round\_x$ در اساینمنت pkx ها (k متغیر) عمل MIX در حال انجام است. به این شکل که برای k های زوج جمع ساده دو کلمه از ورودی و برای k های فرد با توجه به مقدار $even$، عمل $left - rotation$ انجام میشود و سپس با یکی از k های زوج xor میشود تا به خروجی متصل شود. $Left - rotaion$ به اندازه x یعنی همه ی بیت های یک کلمه (۶۴ بیتی) به اندازه x بیت به سمت چپ منتقل شوند و بیت هایی که از مرز سمت چپ کلمه (بیت ۶۴ ام) بیرون میزنند، از سمت راست با همان ترتیب وارد میشوند.

در ماژول های $skein\_round\_2$ در خط ۴۱۶ و $skein\_round\_4$ در خط ۵۰۲ assignment های مربوط به $p3x$ و $p7x$ با توجه به جدول شماره ۴ از صفحه ۱۱ منبع ذکر شده، جابه‌جا نوشته شده اند و نیاز است

تصحیح شود.
عبارت صحیح برای $skein\_round\_2$:

```
    //Modification of skein_round_2
    assign p0x = p0 + p3;
    assign p1x = (even) ? { p1[30:0], p1[63:31] } : { p1[50:0], p1[63:51] };
    assign p2x = p2 + p1;
    assign p3x = (even) ? { p3[36:0], p3[63:37] } : { p3[13:0], p3[63:14] };
    assign p4x = p4 + p7;
    assign p5x = (even) ? { p5[49:0], p5[63:50] } : { p5[53:0], p5[63:54] }
    assign p6x = p6 + p5;
    assign p7x = (even) ? { p7[21:0], p7[63:22] } : { p7[46:0], p7[63:47] };
```

عبارت صحیح برای $skein\_round\_4$:

```
    //Modification of skein_round_4
    assign p0x = p0 + p7;
    assign p1x = (even) ? { p1[19:0], p1[63:20] } : { p1[55:0], p1[63:56] };
    assign p2x = p2 + p5;
    assign p3x = (even) ? { p3[54:0], p3[63:55] } : { p3[28:0], p3[63:29] };
    assign p4x = p4 + p3;
    assign p5x = (even) ? { p5[ 9:0], p5[63:10] } : { p5[ 7:0], p5[63: 8] };
    assign p6x = p6 + p1;
    assign p7x = (even) ? { p7[ 7:0], p7[63: 8] } : { p7[41:0], p7[63:42] };
```

در ماژول های $skein\_round\_x$ (هر چهار ماژول) حین اتصال کردن pkx ها به out از روند خاصی که درجدول شماره ۳ صفحه ۱۱ منبع ذکر شده باید پیروی کرد.
با توجه به اعداد مربوط به ماژول های ۸ کلمه ای، خروجی ها را باید به pkx های مناسب متصل کرد که در ماژول ها رعایت نشده است.
محتویات $always - block$ داخل هر چهار ماژول $skein\_round\_x$ باید شکل زیر تغییر کند:

```
    //Modificaiotion of skein_round_x ( x = 1,2,3,4)
    out [511:448] <= p2x;
    out[447:384] <= p0x ^ p1x;
    out[383:320] <= p4x;
    out[319:256] <= p6x ^ p7x;
    out[255:192] <= p6x;
    out[191:128] <= p4x ^ p3x;
    out[127: 64] <= p0x;
    out[ 63:  0] <= p2x ^ p3x;
```

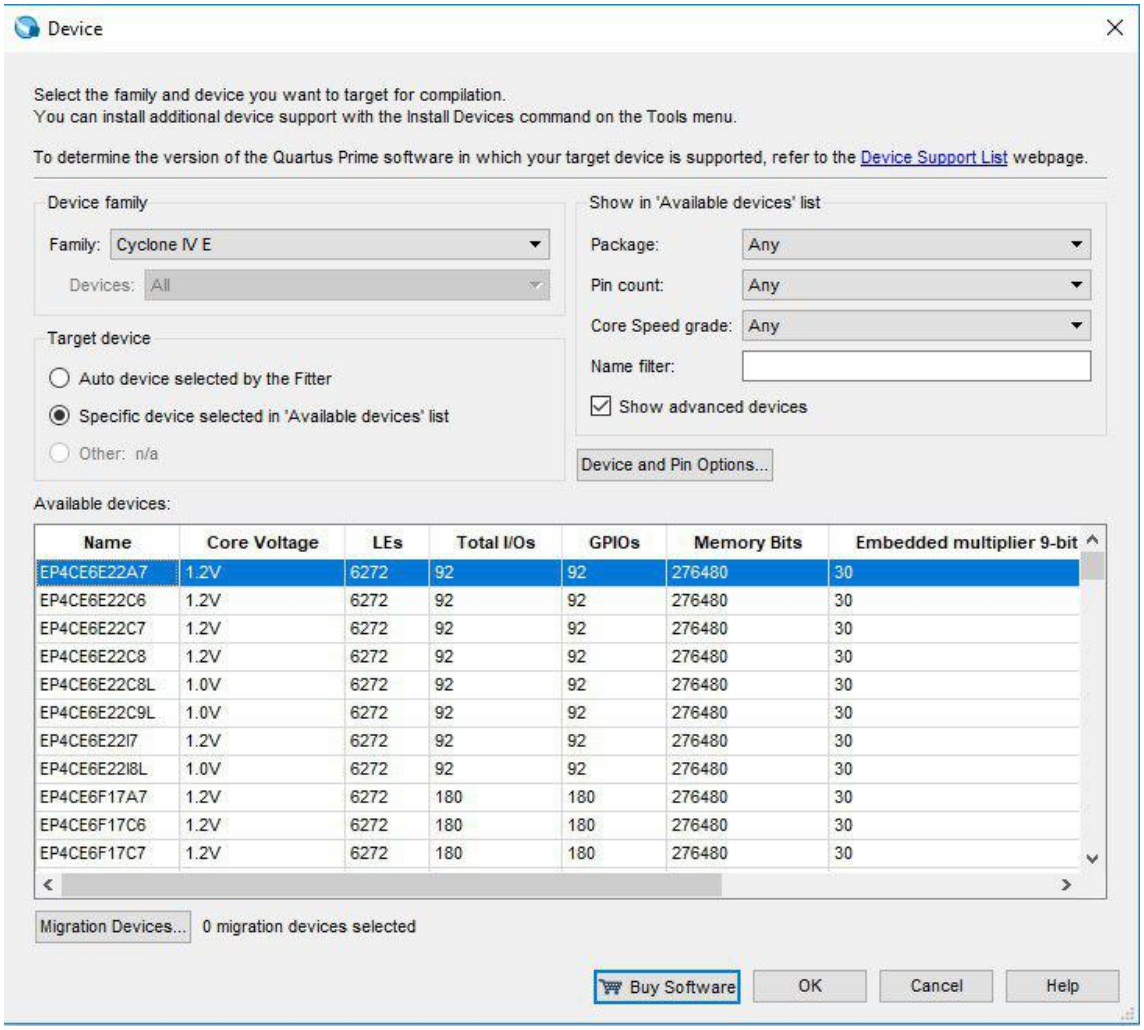
فصل ۴

پیاده‌سازی سخت‌افزاری

سنتز سیستم روی FPGA ، بررسی ایرادات سنتز و ارائه راهکار، گزارش پیاده‌سازی

۱.۴ مقدمه‌ای بر پیاده‌سازی سخت‌افزاری

کد verilog داده‌شده در پروژه با استفاده از ابزار Quartus برای سنتز بر روی FPGA شبیه‌سازی شد، در ادامه مختصرا به شرح ایرادات سنتز و سپس به گزارش آمارهای حاصل از سنتز می‌پردازیم.

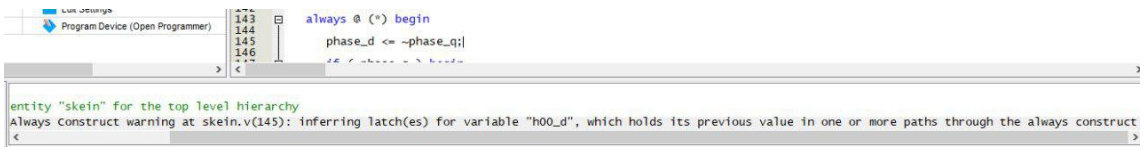


شکل ۱.۴: انتخاب وسیله برای سنتز در محیط Quartus

۲.۴ ایرادات سنتز و ارائهٔ راهکار

برای شبیه‌سازی سخت‌افزاری دو ایراد وجود داشت.

- نخست این که نام ماژول و فایل یکسان نبود و ابزار Quartus در سنتز به مشکل می‌خورد.
- پس از رفع ایراد پیشین ابزار هنگام سنتز اخطار زیر را می‌داد.



شکل ۲.۴: اخطار اولیه شبیه‌ساز

؟؟

برای حل این مشکل خط ۱۴۳ کد وریلاگ از

```
always @ (*) begin
```

به

```
always @ (posedge clk) begin
```

تغییر کرد.

۳.۴ گزارش پیاده‌سازی

پس از سنتز موفق سخت‌افزاری گزارش پیاده‌سازی توسط شبیه‌ساز ارائه شد، تصاویر ۳.۴ و ۴.۴ مقادیر گزارش شبیه‌ساز پس از سنتز اند.

```
Slice Logic Distribution:
 Number of LUT Flip Flop pairs used:  83451
   Number with an unused Flip Flop:    6231  out of  83451     7%
   Number with an unused LUT:         19932  out of  83451    23%
   Number of fully used LUT-FF pairs: 57288  out of  83451    68%
   Number of unique control sets:        39
```

شکل ۳.۴: گزارش تعداد flip flop ها و LUT ها

```
Minimum period: 2.806ns (Maximum Frequency: 356.398MHz)
Minimum input arrival time before clock: 1.290ns
Maximum output required time after clock: 0.580ns
Maximum combinational path delay: No path found
```

شکل ۴.۴: گزارش فرکانس و دیگر زمان‌ها در سخت‌افزار