

دانشکده مهندسی کامپیوتر
طراحی سیستم‌های دیجیتال
مستند پروژه

بررسی الگوریتم درهم‌سازی skein

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

۱۴ تیر ۱۳۹۸



فهرست مطالب

۲	۱ مقدمه
۳	۱.۱ توضیح الگوریتم
۳	۱.۱.۱ مثال‌هایی از درهم‌سازی
۳	۲.۱ مختصری درباره الگوریتم‌های درهم‌سازی امنیتی
۴	۳.۱ هدف الگوریتم درهم‌سازی skein
۴	۴.۱ نحوه کلی عملکرد الگوریتم
۵	۱.۴.۱ The Threefish block cipher
۵	۲.۴.۱ Unique Block Iteration
۷	۳.۴.۱ تابع درهم‌سازی Skein
۷	۴.۴.۱ Optional Arguments
۸	۵.۱ کاربردهای الگوریتم درهم‌سازی Skein
۱۱	۲ توصیف معماری سیستم
۱۲	۱.۲ اینترفیس‌های سیستم
۱۲	۱.۱.۲ ورودی‌ها
۱۲	۲.۱.۲ خروجی
۱۲	۲.۲ کلاک‌ها و نحوه راه‌اندازی سیستم
۱۲	۳.۲ دیاگرام بلوکی سخت‌افزار
۱۳	۴.۲ توصیف ماژول‌های سخت‌افزار
۱۳	۱.۴.۲ Skein-512
۱۶	۲.۴.۲ skein_round
۱۸	۳.۴.۲ skein_round_1,2,3,4
۲۱	۳ شبیه‌سازی
۲۲	۱.۳ توضیح روند شبیه‌سازی سخت‌افزار و گام‌های اجرایی
۲۲	۲.۳ مشاهده ورودی‌ها و خروجی‌های اصلی و میانی
۲۲	۱.۲.۳ توضیح نحوه عملکرد Testbench
۲۴	۲.۲.۳ شکل موج حاصل از Testbench
۲۴	۳.۲.۳ جدول ورودی‌ها و خروجی‌های Testbench

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 ادامه این مستند شرح و توضیح آن آمده است الگوریتم درهم سازی skein یا cryptographic 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 پردازنده دوهسته‌ای 64 بیتی با فرکانس پردازشی 3.1 GHz می‌تواند با سرعت 500 مگابایت بر ثانیه داده‌ها را هش کند. این مقدار سرعت تقریباً دو برابر سرعت هش کردن داده 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 پیاده‌سازی آسان و ساده‌ای دارد و فقط از سه عملگر اصلی برای محاسبه هش استفاده می‌کند و نحوه عملکرد الگوریتم به راحتی قابل به خاطر سپاری و یادگیری است.

الگوریتم درهم‌سازی skein برای حالت‌های ورودی ۲۵۶، ۵۱۲ و ۱۰۲۴ بیتی و هر مقداری خروجی پیاده‌سازی شده است که این خاصیت در انعطاف الگوریتم در حالت‌های مختلف بسیار حیاتی است. 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 مقدار به حدود ۱۰۰ بایت کاهش پیاده می‌کند که این الگوریتم را به یک الگوریتم مناسب برای پیاده‌سازی‌های روی قطعات کوچک سخت‌افزاری تبدیل می‌کند، مثلاً 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 درباره الگوریتم‌های درهم‌سازی امنیتی

در دنیای امروز الگوریتم‌های درهم‌سازی امنیتی تقریباً 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 ذخیره رمزهای عبور، اتصالات امنیتی به سرورها، مدیریت رمزنگاری‌ها و اسکن ویروس‌ها و بدافزارها به کار می‌رود، تقریباً 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، مثلاً 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 تغییر 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 نحوه کلی عملکرد الگوریتم

ایده 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

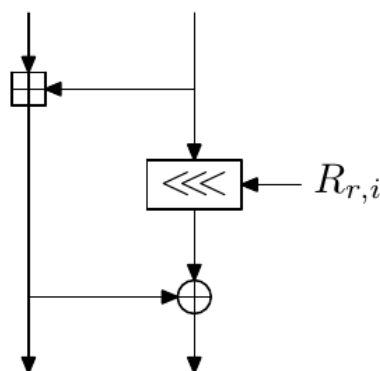
این قسمت یک بلوک رمزگذاری قابل تنظیم است که در هسته اصلی الگوریتم پیاده‌سازی شده است، این بلوک‌ها در سایزهای ۲۵۶، ۵۱۲، ۱۰۲۴ بیتی تعریف شده اند.

• 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]



شکل ۱.۱: تابع MIX

همراهی سه بخش یادشده باهم ویژگی‌های جالب و کاربردی بسیاری را به الگوریتم درهم‌سازی Skein افزوده است، در ادامه به صورت خلاصه به نحوه 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 نحوه عملکرد Threefish-512 را نشان می‌دهد، هر یک از مراحل هفتاد و دو گانه 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 هشت 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

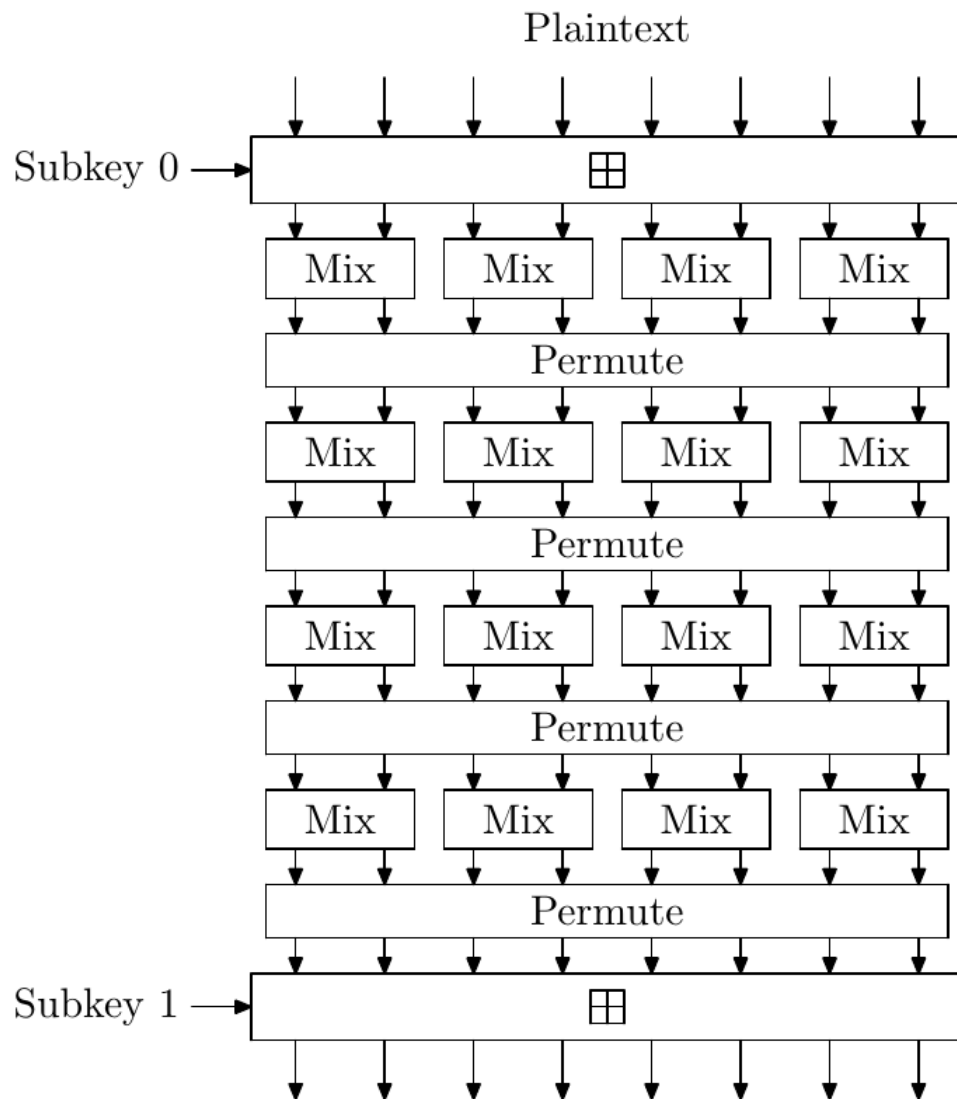
Unique Block Iteration یا به اختصار UBI زنجیره‌ای از ورودی‌ها را با یک رشته با طول دلخواه تلفیق می‌کند تا یک خروجی با اندازه مورد نظر و ثابت به دست آورد، در حقیقت UBI مقدار The Threefish block cipher را که مقداری با اندازه نامشخص و تعیین نشده‌ست را به خروجی با مقداری با اندازه ثابت تبدیل می‌کند، شکل ۳.۱ نحوه محاسبه UBI برای الگوریتم Skein-512 را نشان می‌دهد، اندازه 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 این که آیا به بلوک پایانی (پایان زنجیره) رسیده است یا خیر. UBI یکی از انواع Matyas-Meyer-Oseas

^۱ برای مطالعه بیشتر می‌توانید به بخش سوم [۲] مراجعه کنید.

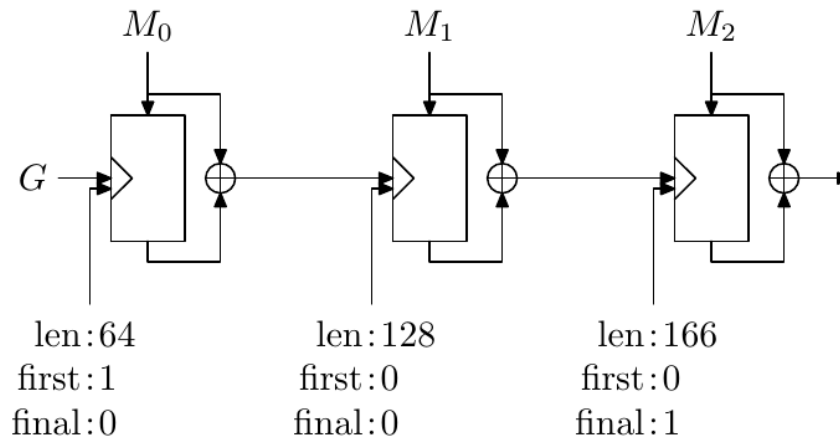
^۲ Rotation Constant

^۳ برای مطالعه جزئی‌تر می‌توانید به [۲] مراجعه کنید.

^۴ final block



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



شکل ۳.۱: درهم‌سازی پیام سه بلوکه با UBI

ها است. [۳]

۳.۴.۱ تابع درهم‌سازی Skein

تابع اصلی درهم‌سازی در حالت نرمال که مد نظر این نوشتار است برای ایجاد هش از چندین درخواست از UBI و بالتبع از Threefish block cipher هش یک داده ورودی را حساب 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 برایش درهم‌سازی استفاده شود این مقدار قابل پیش‌پردازش است.

- **Message** مقدار داده ورودی است.

- **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 شده‌اند، در ادامه مختصراً به توضیح ایشان می‌پردازیم.

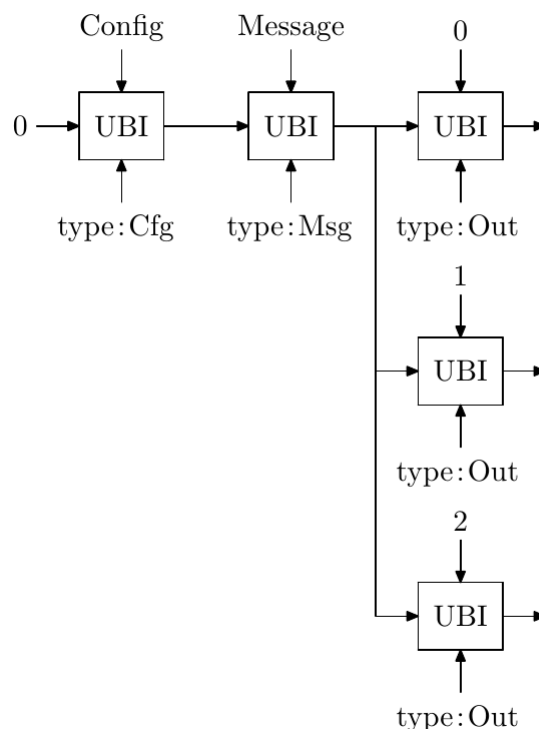
- **Key** (اختیاری) کلیدی برای تبدیل skein به تابع MAC یا KDF.

- **Configuration** (اجباری) همان مقدار Config که پیش‌تر توضیح داده شد.

- **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.



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

- **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 از پیش تعیین شده خروجی می‌دهد.
- **Skein به عنوان MAC** از تابع درهم‌سازی Skein می‌توان برای تولید MAC^۵ استفاده کرد، از MAC برای واریسی این که یک پیام از یک فرستنده معتبر بدون تغییر ارسال شده یا که در طی مسیر دست‌کاری شده است استفاده می‌شود.

• HMAC

• Randomized Hashing

• Digital Signatures

• Key Derivation Function (KDF)

^۵Message authentication code

• Password-Based Key Derivation Function (PBKDF)

• PRNG

• Stream Cipher

کتاب نامه

<http://www.skein-hash.info/about>

[۱]

The Skein Hash Function Family

[۲]

Version 1.3 — 1 Oct 2010

<http://www.skein-hash.info/sites/default/files/skein1.3.pdf>

S.M. Matyas, C.H. Meyer, and J. Oseas, “Generating strong one-way functions with [۳]
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 نحوه 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 نحوه پیاده‌سازی سخت‌افزاری و نتایج حاصل از سنتر تعیین می‌شود.

• 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 اندازه این ورودی ۳۲ بیت به اندازه طول عدد در Integer گرفته شده است.

• data

ورودی اصلی است 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 نحوه راه‌اندازی سیستم

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

۱. وصل کردن کلاک با فرکانس مناسب به سیستم

۲. اعمال ریست کلی بر سیستم^۲

۳. تعیین ورودی‌های اولیه

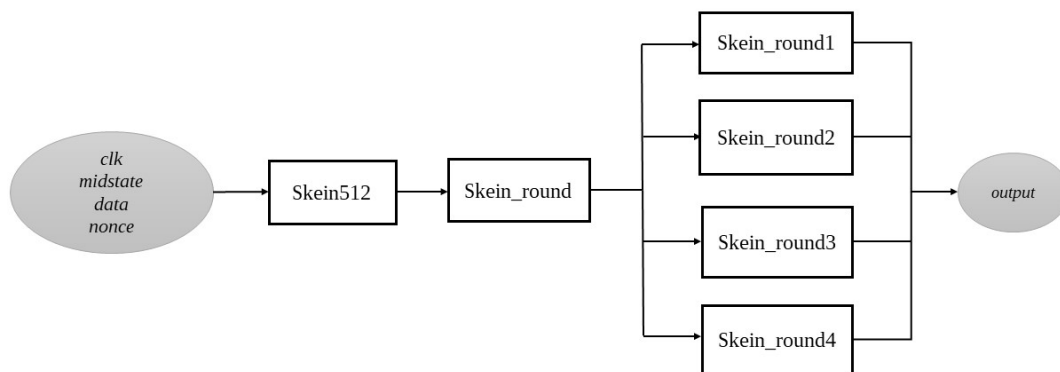
۴. راه‌اندازی سیستم

۳.۲ دیاگرام بلوکی سخت‌افزار

دیاگرام بلوکی کلی سخت‌افزار در شکل ۱.۲ آمده است.

^۱ Sequential

^۲ Global Reset



شکل ۱.۲: دیاگرام بلوکی سخت‌افزار

۴.۲ توصیف ماژول‌های سخت‌افزار

۱.۴.۲ Skein-512

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

ابتدا تعدادی reg و wire گرفته شده است. دو reg به نام های $phase_d$ و $phase_q$ تعریف شده اند که یک بیتی اند و مقدار صفر به آنها داده شده است. دو عبارت assign در کد وجود دارد.

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 پر ارزش $nonce_le$ 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 پر ارزش $nonce2_le$ ذخیره شده اند. (خط ۵۶)

یک عبارت assign طویل مربوط به hash دیده می‌شود:

- در این عبارت بیت‌های reg ی به نام h_q که ۵۱۲ بیت دارد و در خطوط بالاتر تعریف شده است، به بیت های خروجی hash اساین می‌شود.
- ۶۴ مجموعه ۸ بیتی 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 بیت 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 ۸ تایی از 464 تا 471 هستند که در دومین ۸ تایی با ارزش hash قرار می‌گیرند.
- این روند تا هشتمین ۸ بیت ارزشمند hash ادامه پیدا میکند جایی که در این جایگاه مجموعه [504 : 511] 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 ۱۶ امین ۸ بیت ارزشمند hash که با مجموعه [440 : 447] پر شده اند.
- ۱۷ امین ۸ بیت ارزشمند با مجموعه [320 : 327] پر میشود.
- ۲ این روند مانند قبل به صورت صعودی ادامه پیدا خواهد کرد تا به ۲۵ امین مجموعه ۸ بیتی برسیم.

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

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

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

- باز ۸ مجموعه که به صورت صعودی پیش برویم به ۴۰ امین ۸ بیت میرسیم که طبق نظم با بیت های [248 : 255] پر شده است و ۴۱ امین ۸ بیتی با بازه [128 : 135] پر شده است.
- باز ۸ مجموعه که به صورت صعودی پیش برویم به ۴۸ امین ۸ بیت میرسیم که طبق نظم با بیت های [184 : 191] پر شده است و ۴۹ امین ۸ بیتی با بازه [64 : 71] پر شده است.
- باز ۸ مجموعه که به صورت صعودی پیش برویم به ۵۶ امین ۸ بیت میرسیم که طبق نظم با بیت های [120 : 127] پر شده است و ۵۷ امین ۸ بیتی با بازه [0 : 7] پر شده است.
- از ۵۷ امین مجموعه ۸ تایی با ارزش hash تا آخرین مجموعه با ارزش hash (۶۴ امین) 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 نام گذاری کردیم (نامگذاری در مبنای بالاتر از ۱۰ شده است)

ورودی skein_round ها

- کلاک که همه به کلاک سیستم متصل اند.
- **Round** رجیستر ۳۲ بیتی که به ترتیب ورودی ۰ تا ۱۷ به هر اینستنس داده شده است.
- p رجیستر ۵۱۲ بیتی - که 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 ۵۷۶ بیتی - که اینستنس شماره 01 تا 0H به ترتیب $h01$ تا $h0H$ وصل شده است. به اینستنس شماره 00 هم $h00_q$ وصل شده است.
- $T0$ رجیستر ۶۴ بیتی - که از اینستنس شماره 00 تا 0H به ترتیب این دنباله ۳ تایی وصل شده است: $t0_q, t1_q, t2_q$ این دنباله ۳ جمله ای به ترتیب تکرار میشود.
- $T1$ رجیستر ۶۴ بیتی - دقیقاً مثل $T0$ با این تفاوت که دنباله ۳ تایی $t1_q, t2_q, t0_q$ به ای شکل است.
- $P0$ رجیستر ۵۱۲ بیتی - که اینستنس شماره 00 تا 0H به ترتیب $o00$ تا $o0H$ وصل شده است.
- $H0$ رجیستر ۵۷۶ بیتی - 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 انتها d دارند مقداردهی میشوند. ابتدا $phase_d$ مقدار not متغیر $phase_q$ را به خود اختصاص میدهد.

• اگر $phase_q$ یک باشد

- مقداردهی به $p00_d$ (۵۱۲ بیتی): ۶۴ بیت کم ارزش ([0 : 63]) از $data$ در ۶۴ بیت پرارزش $p00_d$ قرار میگیرد. سپس در ۳۲ بیت بعدی $p00_d$ (از چپ) عیناً $nonce_le$ قرار داده میشود. سپس ۳۲ بیت باقیمانده از $data[95 : 64]$ طبق روند قرار داده میشود. باقی بیت های این رجیستر هم با صفر پر میشوند ($384d0$) - (خط ۱۴۸)
- مقداردهی به $h00_d$ (۵۷۶ بیتی): در ۶۴ بیت کم ارزش این reg ، مقدار صفر قرار داده میشود و باقی بیت ها دقیقاً به $midstate$ (ورودی ۵۱۲ بیتی) متصل میشوند.
- مقداردهی به $t0_d$ (۶۴ بیتی) : $h0000000000000050$
- مقداردهی به $t1_d$ (۶۴ بیتی) : $hb0000000000000000$
- مقداردهی به $t2_d$ (۶۴ بیتی) : $hb0000000000000050$
- h_d هم مقدار h_q را به خود میگیرد.

• اگر $phase_q$ صفر باشد

- مقداردهی به $p00_d$ (۵۱۲ بیتی): این reg با صفر پر میشود.
 - مقداردهی به $h00_d$ (۵۷۶ بیتی):
- * بیت های [512 : 575] : $[oH[511 : 448] + hH[575 : 512]] \wedge data[63 : 0]$
- * بیت های [511 : 448] : $nonce_le \wedge data[95 : 64]$
- * بیت های [447 : 384] : $oH[383 : 320] + hH[447 : 384]$
- * بیت های [383 : 320] : $oH[319 : 256] + hH[383 : 320]$
- * بیت های [319 : 256] : $oH[255 : 192] + hH[319 : 256]$
- * بیت های [255 : 192] : $oH[191 : 128] + hH[255 : 192] + 64'h0000000000000050$
- * بیت های [191 : 128] : $oH[127 : 64] + hH[191 : 128] + 64'hb0000000000000000$

* بیت های $oH[63 : 0] + hH[127 : 64] + 18 : [127 : 64]$

– مقداردهی به $t0_d$ (۶۴ بیتی) : $h0000000000000000$

– مقداردهی به $t1_d$ (۶۴ بیتی) : $hFF00000000000000$

– مقداردهی به $t2_d$ (۶۴ بیتی) : $hFF00000000000000$

– مقداردهی به h_d (۵۱۲ بیتی):

* بیت های $o0H[511 : 448] + ho0H[575 : 512] : [511 : 448]$

* بیت های $o0H[447 : 384] + ho0H[511 : 448] : [447 : 384]$

* بیت های $o0H[383 : 320] + ho0H[447 : 384] : [383 : 320]$

* بیت های $o0H[319 : 256] + ho0H[383 : 320] : [319 : 256]$

* بیت های $o0H[255 : 192] + ho0H[319 : 256] : [255 : 192]$

* بیت های $o0H[191 : 128] + ho0H[255 : 192] + 64'h0000000000000000$: $[191 : 128]$

* بیت های $o0H[127 : 64] + ho0H[191 : 128] + 64'hFF00000000000000$: $[127 : 64]$

* بیت های $o0H[63 : 0] + ho0H[127 : 64] + 18 : [63 : 0]$

نظم مناسبی دیده میشود به این شکل که به ترتیب ۶۴ بیت پردازش h_d با مجموع ۶۴ بیت پردازش $o0H$ و ۶۴ بیت پردازش $ho0H$ پر میشود. به جز ۳ مورد آخر که با اعدادی ثابت جمع میشوند. **Always** بلاک دوم فقط به لبه مثبت کلاک حساس است. (خط ۲۱۱) (عموما متغیرهای q_d 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 مقداردهی ها را مربوط به reg های $p0x$ (منظور از ۱ تا H و $h0x$) منظور از ۱ تا H داریم. (خط ۲۲۶ تا ۲۶۱)

• $h0x$ 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 $d5432$ را میگیرد.

۲.۴.۲ skein_round

در خط ۱۲۴ از فایل وریرلاگ، 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 تعداد زیادی assignment وجود دارد.
 - دو مجموعه reg تعریف شده:
 - ۶۴ بیتی: $p0, p1, p2, p3, p4, p5, p6, p7$
 - ۵۷۶ بیتی: $hx0, hx1, hx2, hx3, hx4$
 - یک مجموعه wire تعریف شده:
 - ۵۱۲ بیتی: $po0, po1, po2, po3, po4$
 - ۳ عدد assignment داریم:
 - ho (یکی از خروجی‌ها) از $hx4$ مقدار میگیرد.
 - po (دیگر خروجی) از $po4$ مقدار میگیرد.
 - $Po0$ به ترتیب از ۸ بیت-۸ بیت (از با ارزش به کم ارزش) با reg های $p0p1...p7$ 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 $x+1$ شماره $round$ 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 راند ۱ ورودی راند ۲ است و به همین ترتیب تا راند ۴.**
- یک always-block حساس به لبه مثبت کلاک داریم. (خط ۳۱۵)
 - ورودی‌های h و p را به صورت ۶۴ بیت – ۶۴ بیت جمع میزنند و در $p0$ تا $p7$ نگه داری میکند.
 - به این شکل که جمع پرارزش ترین ۶۴ بیت h و p در $p0$ ریخته میشود. (و به همین ترتیب پیش میرود)

- از $p0$ تا $p4$ کاملاً طبق نظم گفته شده انجام میشود.
- در مورد $p5$ علاوه بر دو مجموعه ۶۴ بیتی با $t0$ (یکی از ورودی‌ها) هم جمع میشود.
- در مورد $p6$ علاوه بر دو مجموعه ۶۴ بیتی با $t1$ (یکی از ورودی‌ها) هم جمع میشود.
- در مورد $p7$ علاوه بر دو مجموعه ۶۴ بیتی با $round$ (یکی از ورودی‌ها) هم جمع میشود.

• برای reg های hx (۵۷۶ بیتی) هم یک جابه جایی اتفاق میافتد:

- 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 نسبتاً پیچیده ای میافتد:

* ۶۴ بیت کم ارزشش با ۶۴ بیت پرارزش h (ورودی) پر میشود.

* ۴۴۸ بیت پرارزشش با بیت های $[511 : 64]$ از h پر میشود.

* ۶۴ بیت باقی مانده وسط $hx0$ ($[64 : 127]$) با نتیجه زیر پر میشود: (خط ۳۴۱)

```
1 ((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 مجموعه های ۶۴ بیت های ورودی h به جز کم ارزشترین مجموعه ($h[64 : 0]$) است که در نهایت با یک عدد ثابت ۶۴ بیتی xor شده است.

۳.۴.۲ skein_round_1,2,3,4

چهار ماژول باقی مانده با نام های $skein_round_1$, $skein_round_2$, $skein_round_3$, $skein_round_4$ 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 ماژول های $skein_round_1,2,3,4$

- 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 بیت های پرارزش تا کم ارزش in متصل اند. ($p7$ به کم ارزشترین)

• 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 $p_k + p_{k+1}$ را به خود میگیرند. مثلاً $p2x = p2 + p3$
 $P1x$ 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

```
1 //module 2
2 assign p0x = p0 + p3
3 assign p1x = (even) ? { p1[30:0], p1[63:31] } : { p1[50:0], p1[63:51] }
4 assign p2x = p2 + p1
5 assign p3x = (even) ? { p3[21:0], p3[63:22] } : { p3[46:0], p3[63:47] }
6 assign p4x = p4 + p7
7 assign p5x = (even) ? { p5[49:0], p5[63:50] } : { p5[53:0], p5[63:54] }
8 assign p6x = p6 + p5
9 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

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

– ماژول ۴

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

ماژول‌های ۳ و ۴ هم در این مورد مشابهت دارند با توضیحات داده شده در مورد ماژول ۱، pkx های 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 بیت‌های pk شکاف میندازد و سمت چپ شکاف را در قسمت کم ارزش خود و سمت راست شکاف را در قسمت پر ارزش پر میکند. (در واقع جای بیت‌های چپ و راست شکاف را عوض میکند).

- تنها always-block در ماژول (حساس به لبه مثبت کلاک) :
در این بلاک خروجی out ، به صورت مجموعه‌های ۶۴ بیتی مقداردهی میشود. Out ۵۱۲ بیتی است پس ۸ بار مقدار دهی بازم است. برای هر ۴ ماژول مقدارهای نسبت داده شده به ۶۴ بیتی های out را (به ترتیب از پر ارزش ترین ۶۴ بیت تا کم ارزشترین آن) داریم :

– ماژول ۱

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

– ماژول ۲

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

– ماژول ۳

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

– ماژول ۴

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

فصل ۳

شبیه‌سازی

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

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

Testbench 1

```
1 //Master Testbench example
2
3 module skein_tb;
4
5 // Inputs
6 reg clk;
7 reg [511:0] midstate;
8 reg [95:0] data;
9 reg [31:0] nonce;
10
11 // Outputs
12 wire [511:0] hash;
13
14 // Instantiate the Unit Under Test (UUT)
15 skein512 uut (
16   .clk(clk),
17   .midstate(midstate),
18   .data(data),
19   .nonce(nonce),
20   .hash(hash)
21 );
22
23 initial begin
24   // Initialize Inputs
25   clk = 0;
26   midstate = 0;
27   data = 0;
28   nonce = 0;
29
30   // Wait 100 ns for global reset to finish
31   #1000
32   data = 512'd12345609823;
33   midstate = 96'd456;
34   nonce = 32'd453;
35   #1000;
36   data = 512'd76594320945555431222976000000000654;
37   midstate = 96'd456;
38   nonce = 32'd453;
39
40 end
41 always
42   #1 clk = clk;endmodule
```


۲.۲.۳ شکل موج حاصل از Testbench

Waveform 1



شکل ۱.۳: شبیه‌سازی با Testbench

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'd7659432094555543122297600000000654	32'd453	96'd456

جدول ۱.۳: مقادیر ورودی‌ها و زمان

	Hash
433 - 1217	ab5283d68df053ac62d053789d4b45b81a02c959d7cab97fc43451166351f117f949fe918475f762ba80567046338211461648316d4432e6c505edc3b5ee6ff5dd477bfb0f07e299560b050c7aadb947bad77571f9a7d886a06f197a55f7946b8a9cecb948a5478380168f8bfaf8e6d7d828459564973272b18cdf99d0234f20c0dea4dfd9994c6eb97f500589565239347be8a5b2e4ce4832c6cc9095baa51bf2bddde45ef619f4086e71e7d86f637314357e6d20632c31612f5424644cc2236d383e0cceb223c20c45b816a165072ad200b8091682e8e5c31295ee62ca3719afbd493a4b85859d1cbe08d98bf01e66be18f3d3536987eeef06cc7965851bf86b722c1b1fb150c850e02ee44e03a447401ca4ac3cde4de6eb95b2e853d0d34b53583685f4b21f9b98229734756d7b835e46c2f589e461ab7c3177fb7e572b64

جدول ۲.۳: مقادیر درهم‌سازی و زمان

