

طراحی سیستم‌های دیجیتال

گزارش نهایی پروژه‌ی سوم

مهبد مجید ۹۵۱۰۹۳۷۲
سبحان محمدپور ۹۵۱۰۶۶۰۷
کیمیا حمیدیه ۹۵۱۰۹۴۳۴
روژین نوبهاری ۹۵۱۰۵۲۳۸
کوشا جعفریان ۹۵۱۰۵۴۵۴

۲۰ تیر ۱۳۹۷

توصیف اولیه

مقدمه

امروزه با توجه به کاربرد گسترده‌ی Java و بالطبع JVM، در صنعت و جهان مدرن امروزی منطقی به نظر می‌رسد که فرآیند اجرای کدهای جاوا را سریع‌تر کنیم. یکی از راه‌های خوب برای رسیدن به این مهم، می‌تواند پیاده‌سازی سخت‌افزاری JVM که در واقع هسته‌ی جاواست باشد.

اهداف

در این پروژه می‌خواهیم برای پردازنده‌ی ARM-7 (صبای ۲) یک شتاب‌دهنده^۱ ی سخت‌افزاری JVM بسازیم. نحوه‌ی کار این شتاب‌دهنده به این شکل است که پردازنده opcodeهای JVM را دریافت می‌کند و به شتاب‌دهنده می‌دهد و شتاب‌دهنده دستورات معادل پردازنده را تولید می‌کند.

مراحل انجام پروژه

به طور کلی با توجه به اهداف پروژه ما باید ۳ کار را برای انجام پروژه انجام دهیم:

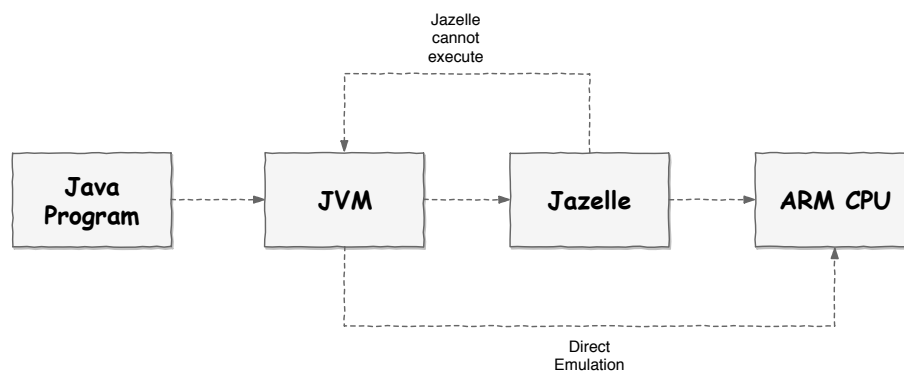
- یادگیری کار با ماشین JVM
- یادگیری کار با ماشین ARM-7
- ساخت مبدل برای تبدیل دستورات میان این دو

¹accelerator

تقسیم‌بندی پروژه

انتخاب opcodeها

ابتدا لیست opcodeهای JVM را پیدا کردیم. از آنجایی که قرار بود این پروژه برای ۵ تیم باشد، نیاز بود تا تعدادی از آپکدها را جدا کنیم که پروژه برای ۴ تیم مناسب شود. برای جدا کردن تعدادی از این opcodeها از Jazelle الگو می‌گیریم. Jazelle به این صورت عمل می‌کند که JVM دستوراتش را به Jazelle می‌فرستد و اگر Jazelle از آن‌ها پشتیبانی کرد، آن‌ها را اجرا می‌کند، و اگر هم پشتیبانی نمی‌کرد آن‌ها را به JVM باز می‌گرداند تا آن‌ها را به دستوراتی که Jazelle از آن‌ها پشتیبانی می‌کند تبدیل کند.



شکل ۱: روند اجرای کار jazelle

ما نیز به این صورت عمل می‌کنیم که عده‌ای از opcode که پیاده‌سازی نرم‌افزاریشان ساده‌تر است را جدا می‌کنیم و الباقی opcodeها را در پیاده‌سازیمان می‌آوریم.

تقسیم‌بندی opcodeها

برای افزایش بازدهی گروه‌ها opcodeهای انتخابی به شانزده دسته‌ی ۱۰ تایی تقسیم‌بندی شدند و با یک کد R که به صورت رندوم این ۱۶ دسته را به گروه‌ها تخصیص می‌داد، تقسیم‌بندی کردیم. (سید را هم با حضور اعضای سایر گروه‌ها تعیین کردیم).

کد

```
1 library(dplyr)
2 set.seed(1919)
3 s = sample(seq(from = 1, to = 16), replace = F)
4 c("jaferian", "asadi", "hoseini", "ghafarloo") %>%
5 cbind(t(apply(matrix(s, nrow = 4), 1, sort)))
```

خروجی کد

Group Name				
jaferian	4	6	7	8
asadi	3	9	10	12
hoseini	1	5	11	14
ghafarloo	2	13	15	16

لیست دستورات

لیست دستورات را می‌توانید در صفحه‌گسترده‌ی ۱ و ۲ مشاهده‌کنید.

برخی ماژول‌های پیاده‌سازی شده با verilog

فایل memory.v

در این فایل دو ماژول حافظه طراحی شده‌است. ماژول اول memory_r است که به عنوان ورودی سیگنال‌های کلاک^۲، ریست^۳، شروع^۴ و آدرس^۵ را می‌گیرد. در ضمن دو سیگنال خروجی داده‌ی مورد نظر^۶ و آماده‌بودن رم و جواب^۷ را هم داریم. حال در این ماژول، با فعال‌شدن سیگنال شروع، منتظر می‌مانیم تا سیگنال ready حافظه فعال شود. در اصل وجود start و ready به شکل پیاده‌سازی شده برای پیاده‌سازی تاخیر حافظه بوده‌است. به محض فعال‌شدن ready، از آدرس مورد نظر، محتوا را خوانده و در data_out خروجی می‌دهیم. ماژول دوم نیز memory_w است که برای نوشتن در حافظه استفاده می‌شود. توجه‌کنید که در این جا دیگر لازم نیست data_out را خروجی‌دهیم و تنها هنگام فعال‌شدن start در حالت نوشتن، صبر می‌کنیم تا سیگنال ready حافظه فعال‌شود و به محض فعال‌شدن در address مورد نظر محتوای مربوطه را می‌نویسیم. توجه‌کنید که تنها تفاوت اساسی با memory_r این است که به جای خروجی data_out یک ورودی data_in داریم که محتوایی که باید در حافظه نوشته‌شود را مشخص می‌کند.

فایل next_byte_gen.v

همان‌طور که می‌دانیم؛ در پردازنده‌های واقعی JVM، هنگام خواندن و نوشتن در حافظه، با بایت سر و کار نداریم؛ بلکه برای مثال موقع خواندن یک word ۴ بایتی از حافظه خوانده می‌شود. در بسیاری از مواقع این word، شامل چندین بایت است که برای دسترسی به مواردی مانند opcode یا offset باید این بایت‌ها را جدا جدا بخوانیم. برای این منظور ماژول next_byte_gen طراحی شده‌است که یک memory_r را instantiate کرده و در صورتی که هر دو سیگنال start و ready فعال باشند؛ PC که برابر address حافظه‌ی instantiate شده‌است را یک واحد اضافه می‌کند که معادل یک بایت جلورفتن یا رفتن به بایت بعدی است و در صورت فعال‌بودن reset نیز، مقداری پیش‌فرض را برابر PC قرار خواهد داد.

²clk

³reset

⁴start

⁵address

⁶data_out

⁷ready

فایل instruction_ram.v

این ماژول نیز کار پیچیده‌ای انجام نمی‌دهد و تنها یک word ۴ بایتی را از ورودی دریافت کرده و درون یک حافظه‌ی نوشتنی (memory_w) می‌نویسد. برای این کار کافیسیت تا هنگام instantiate کردن این حافظه درون ماژول، data_in آن را برابر word خوانده‌شده از ورودی قراردهیم. بدیهی است که سایر پارامترها نیز باید به درستی تنظیم شوند.

فایل‌های مربوط به Decoder

دیگر طراحی شده در این پروژه به صورت چند ماژول (ROM) Read Only Memory طراحی شده است. این ROMها عبارتند از:

Address ROM

این ROM یک آدرس به عنوان ورودی گرفته و آدرس بعدی که پس از این آدرس باید به آن برویم را برمیگرداند.

Convert ROM

این ROM یک آدرس را به عنوان ورودی گرفته و به عنوان خروجی ID دستور مربوطه را به ما تحویل می‌دهد.

Instruction ROM

این ROM، ID دستور را گرفته و خود دستور را به ما می‌دهد. منظور از خروجی دادن خود دستور، پیاده‌سازی آن به صورت ۰ و ۱ درون ROM است. توجه‌کنید که برای پیاده‌سازی این ROM ابتدا دستورات پردازنده را با زبان اسمبلی ARM نوشتیم و سپس به کمک یک قطعه‌کد پایتون به صورت خودکار آن‌ها را به فرمت کدشده ۰ و ۱ که باید درون این ROM نوشته‌شود؛ در می‌آوریم.

توضیحی درباره توالی آدرس‌ها

توجه‌کنید که هنگامی که یک دستور را می‌خوانیم؛ ابتدا در آدرس مربوط به Opcode آن دستور قرار داریم، اما پس از آن با موارد تعیین شده در Address ROM، به صورت زنجیره‌ای (مانند یک لیست پیوندی) جلورفته و به ترتیب مجموعه عملیات مشخصی را انجام خواهیم داد. (توجه‌کنید که ممکن است یک دستور JVM به چندین دستور ARM تبدیل شود بنابراین باید زنجیره‌ای از دستورات را به ترتیب اجرا کنیم!) توجه کنید که Convert ROM نیز ورودی آدرس را گرفته و یک ID را تحویل Instruction ROM می‌دهد و این ROM وظیفه اجرای دستور را خواهد داشت.

فایل Count ROM

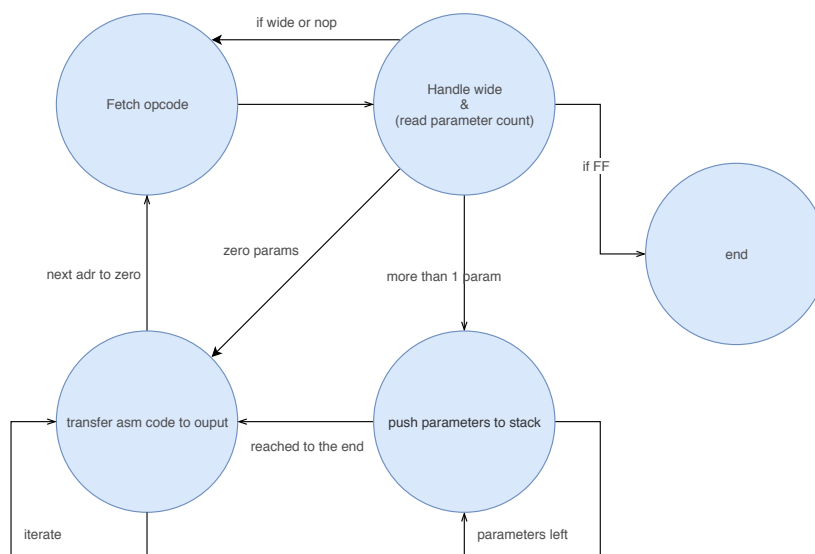
این ROM برای این پیاده‌سازی شده است که مشخص‌کند پس از خواندن Opcode یک دستور، چند بایت آینده مربوط به ادامه این دستور خواهد بود. توجه‌کنید که برخی از دستورات ممکن است تنها از یک بایت که همان Opcode است تشکیل شده باشند مثلاً Pop ولی بسیاری از دستورات هستند که مواردی مانند یک Offset ۲ بایتی یا مشابه آن دارند. بنابراین Count ROM با گرفتن Opcode مشخص می‌کند که دستور مربوطه چند بایت اضافی دارد. توجه‌کنید که در فاز اول پروژه که شامل ۴۰٪ کار

می‌شود؛ مواردی که شامل حداکثر ۲ بایت اضافه باشد را Handle کرده‌ایم و تمامی موارد در فاز نهایی پروژه پیاده‌سازی خواهند شد.

⚠ **توجه مهم** همان‌طور که ذکر شد؛ دستورات ممکن است پس از Opcode تعدادی immediate داشته باشند که پارامترهایی مانند index، varnum یا offset را مشخص کنند. برای راحتی کار، در پیاده‌سازی خود، این پارامترها را درون یکی از ثبات‌های پردازنده ARM می‌ریزیم و به درون استک Push، ARM می‌کنیم. این کار سبب می‌شود که دیگر نیازی به انجام تغییر در Instruction ROM نباشد و عملاً پیاده‌سازی ما به مراتب راحت‌تر خواهد شد.

ماشین حالت^۸

حالات ماشین حالت را می‌توانید در شکل زیر مشاهده نمایید:



شکل ۲: ماشین حالت

تست‌بنچ‌های مربوط به مازول‌های ساخته‌شده

پیاده‌سازی دستورات پردازنده به‌کمک اسمبلی ARM

در این مرحله تمامی دستورات پردازنده را با کمک زبان اسمبلی ARM پیاده‌سازی کردیم. این دستورات شامل موارد زیر می‌شوند:

⁸State Machine

دستورات ستون دوم شامل کار با استک و اعداد صحیح

برای پیاده‌سازی دستورات dup و مشابه آن‌ها تنها از دو دستور push و pop استفاده شده‌است. به این شکل که به ترتیب ذکر شده در مراجع، موارد مربوطه را push و pop می‌کنیم. دستورات pop pop و pop2 نیز با استفاده از یک خط دستور pop قابل پیاده‌سازی هستند و برای دستور swap نیز مشابه دستورات قبلی عمل می‌کنیم.

دستورات سه ستون دیگر شامل دستورات کار با float و double

برای کار با اعداد floating point در اسمبلی ARM دستورات مشخصی وجود دارد اما این دستورات توسط coprocessor اجرا می‌شوند. برای این که به coprocessor متصل شویم، از چند خط کد در ابتدای فایل s. ارسال استفاده کرده‌ایم. این خطوط شامل فعال کردن مواردی مانند fpu و اتصال به coprocessor می‌شود.

چالش‌های اجرای کدهای اسمبلی نیازمند fpu

در ابتدا می‌خواستیم شبیه‌سازی دستورات اسمبلی را به کمک Keil انجام دهیم، اما پس از اندکی تلاش مشاهده کردیم که پردازنده‌های دارای fpu، از خانواده‌ی cortex-m هستند که تنها دستورات Thumb را پشتیبانی می‌کنند اما ما می‌خواستیم که از دستورات ۳۲ بیتی ARM در این پروژه بهره‌بریم. بنابراین تصمیم گرفتیم که در این بخش از نرم‌افزار DS-5 استفاده کنیم. پس از نصب نرم‌افزار DS-5 ابتدا سعی کردیم تا به کمک Fast Model شبیه‌سازی را انجام دهیم و با جست‌وجو میان Fast Model ها متوجه شدیم که باید از پردازنده‌های خانواده‌ی Cortex-A استفاده کنیم و در بین این پردازنده‌ها، پردازنده‌ی Cortex-A7 را انتخاب کردیم زیرا این پردازنده هم دارای fpu است و هم از دستورات ARM پشتیبانی می‌کند.

در کامپایلر مربوطه، تنظیمات را به گونه‌ای انجام دادیم تا به جای استفاده از عملیات اعشاری soft-fp، از hard-fp استفاده کند که در این جا، به این مشکل برخوردیم که کد ما وارد Trap های CPU می‌شد.

بنابراین پس از کمی جست‌وجو در منابع مختلف، متوجه شدیم که ابتدا باید fpu را فعال کنیم و بعد در ادامه به سراغ کدهای مربوطه برویم زیرا در غیر این صورت دچار مشکل خواهیم شد. لذا در ابتدای کدهای اسمبلی، کدی نوشتیم که fpu را فعال کند و به کمک آن کد، می‌توانستیم که دستورات مربوط به fp را اجرا کنیم. کد اسمبلی مذکور به شکل زیر است:

```
area start, code
export StartHere
StartHere
MRC p15, 0, r0, c1, c1, 2
ORR r0, r0, #2_11<<10 ; enable fpu
MCR p15, 0, r0, c1, c1, 2
LDR r0, =(0xF << 20)
MCR p15, 0, r0, c1, c0, 2
MOV r3, #0x40000000
VMSR FPEXC, r3
import __main
b __main
```

حال در هر مرحله پس از اجرای هر قطعه کد مربوطه، برای بررسی درستی آن، ثبات‌ها را pop می‌کردیم و مشاهده می‌کردیم که آیا نتیجه دلخواه در درون آن‌ها ذخیره شده است یا خیر.

پیاده‌سازی دستورات

حال به نحوه‌ی پیاده‌سازی دستورات این بخش می‌پردازیم:

• دستورات fconst و dconst

برای پیاده‌سازی این دستورات تنها کافیسیت عدد مربوطه را به درون یک ثبات mov کرده و آن را به درون استک push کنیم. توجه‌کنید که برای دستورات floating point پیش از هر دستور باید کاراکتر v را قرار دهیم و برای اعداد float از f32 و برای اعداد double از f64 استفاده کنیم. نکته دیگر پیاده‌سازی این دستورات این است که مقدار صفر را نمی‌توانیم به درون یک ثبات مشخص mov کنیم و برای این کار از عملیات sub و کم کردن مقدار یک ثبات از خودش برای تولید عدد صفر استفاده کرده‌ایم.

• دستورات ضرب و جمع و تفریق و تقسیم

برای چنین عملیاتی در دستوراتی مانند dsub یا fdiv، ابتدا دو مقدار را از استک pop کرده و سپس عملیات مربوطه را انجام می‌دهیم و حاصل را به درون استک push می‌کنیم. این دستورات نکته خاصی ندارند و تمامی عملیات ضرب، جمع، تفریق یا تقسیم توسط coprocessor انجام می‌شوند.

• دستورات مربوط به compare

برای ۴ دستور مربوط به compare ابتدا دو عدد را با vpop از استک pop کرده و با vcmp مقایسه می‌کنیم. توجه کنید که باید به مقایسه‌کننده مخصوص دستورات floating point متصل شویم و برای این کار از یک خط دستور زیر استفاده می‌شود.

VMRS APSR_nzcv, FPSCR

پس از آن از سه بلوک مختلف استفاده می‌کنیم: بلوک eq، بلوک gt و بلوک lt که هر یک شامل دو خط کد است و عملکرد برنامه را در صورت تساوی، بزرگ‌تر یا کوچک‌تر بودن مقایسه تعیین خواهد کرد.

• دستورات load و store

در دستورات daload و faload ابتدا دو عدد از استک می‌خوانیم که تعیین‌کننده محل خواندن از حافظه است. یکی از آن‌ها را به عنوان مبدا گرفته و دیگری را در ۴ ضرب کرده و به آن می‌افزاییم تا محل خواندن عدد مربوطه به دست آید. سپس از محل به دست آمده در حافظه یکی از ثبات‌ها را load کرده و حاصل را به درون استک push می‌کنیم. در دستورات store نیز کار مشابه است با این تفاوت که عددی که باید ذخیره شود را در ابتدا از استک خوانده و پس از آن دو عدد دیگر می‌خوانیم که به شکل ذکر شده در بالا، محل ذخیره‌سازی در حافظه را مشخص می‌کنند. در نهایت عددی که در ابتدای کار خوانده شد را در حافظه ذخیره می‌کنیم.

• دستورات frem و fneg

دستور fneg بسیار ساده است. یک عدد را از درون استک pop کرده و با دستور fneg.f32 منفی کرده و در نهایت به درون استک push می‌کنیم. دستور frem نیز طبق فرمول ذکر شده

در مراجع پیاده‌سازی شده‌است اما توجه کنید که هنگام انجام تقسیم اول که مربوط به اعداد floating point است؛ باید حاصل را به یک integer تبدیل کنیم. برای این امر از دستور vcvf استفاده می‌کنیم که بعد از آن باید فرمت مبدا و فرمت مقصد را بنویسیم. برای مثال برای تبدیل حاصل floating point تقسیم به عدد صحیح از دستور زیر بهره می‌گیریم که s32 نشان‌دهنده فرمت مقصد و f32 نشان‌دهنده فرمت مبدا خواهد بود.

```
vcvt.s32.f32 s2,s2
```

● دستورات convert ساده

دستوراتی مانند f2d و f2i و d2i و d2f دستورات convert ساده هستند. رای این دستورات تنها کافی‌ست از استک عدد مورد نظر را بخوانیم، به‌کمک دستور vcvf توضیح داده‌شده در بالا آن را به فرمت مورد نظر تبدیل کرده و در نهایت حاصل را به درون استک push کنیم.

● دو دستور پیچیده تر convert

برای پیاده‌سازی دو دستور f2l و d2l به این شکل عمل می‌کنیم که از دو خط کد آماده یافت‌شده در اینترنت برای انجام این تبدیل استفاده می‌کنیم که این دو خط کد به شکل زیر خواهد بود:

```
import __aeabi_d2l
bl __aeabi_d2l
```

بدیهی است که در دستورات مربوط به float به جای d از f استفاده می‌شود. سایر خطوط کد نیز نکته جدیدی ندارد.

● دستورات fload

برای پیاده‌سازی دستور fload، ابتدا یک عدد را از استک می‌خوانیم و به‌کمک شیفت چپ آن را در ۴ ضرب می‌کنیم. سپس حاصل را با frame pointer یا همان fp جمع‌کرده تا محل خواندن از حافظه به‌دست آید. سپس از محل مربوطه در حافظه خوانده و در یک ثبات ذخیره می‌کنیم و در نهایت حاصل را به درون استک، push می‌کنیم.

برای دستورات fload_n نیز فرمت کلی زیر را داریم:

```
vldr.f32 s0,[fp, #n*4]
vpush.f32 {s0}
```

که به این معناست که از fp به اندازه ۴ برابر n جلو می‌رویم و محتوا را از محل حافظه می‌خوانیم و در نهایت محتوای خوانده‌شده را به درون استک push می‌کنیم.

اضافه‌کردن کدهای اسمبلی به Instruction ROM

حال دستورات پیاده‌سازی‌شده را هر یک به فرمت زیر می‌نویسیم:

```
;<instr_name> <ARM Code>
```

و هدف این است که دستورات نوشته‌شده با این فرمت را به کد پایتونی که در بالا ذکر شد بدهیم تا Instruction ROM را به صورت خودکار برای ما تولید کند.

کد پایتون و Assembler

در کد پایتون ذکر شده، هر بار Assembler را صدا می‌کنیم و رشته‌های باینری مربوطه را به کمک اجرای Assembler از آن استخراج می‌کنیم تا برای ROM استفاده شود. توجه کنید که در فاز نهایی پروژه کد پایتون مذکور را بهینه کرده‌ایم، سس بنابراین این کد علاوه بر این که محتوای ROM را همان‌طور که ذکر شد، تولید می‌کند؛ اگر هر کدی به آن به عنوان ورودی بدهیم، خیلی سریع کامپایل خواهد کرد و تست‌کیس مربوطه را برای ما تولید خواهد کرد. این بهینه‌سازی و فرآیند کامپایل سریع، سبب گرفتن خروجی در کمترین زمان ممکن خواهد شد و به‌وضوح کار بسیار مفیدی خواهد بود.

سنتز کردن کدها

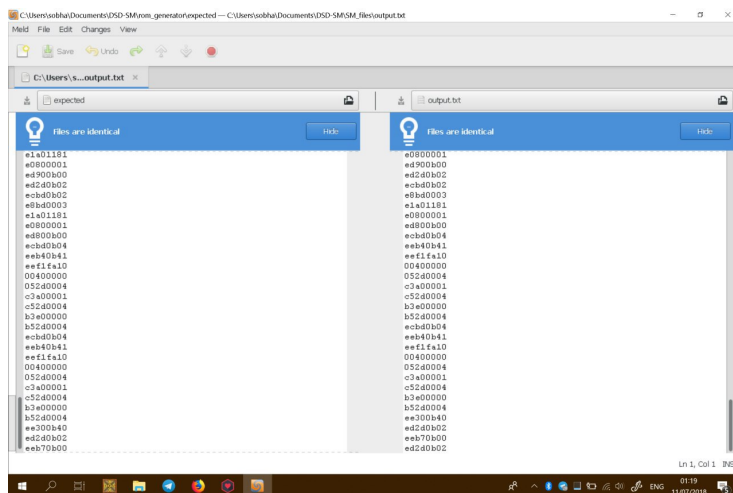
پس از این که به کمک دستورات نوشته‌شده با اسمبلی ARM و کد پایتون ذکر شده، ROM ای که در قسمت‌های قبل توضیح داده‌شد را پر کردیم؛ مجموعه کدهای وریلاگمان کامل خواهد شد و حال باید این کدها را سنتز کنیم.

برای سنتز کدهای وریلاگ از نرم افزار Quartus محصول شرکت Altera استفاده کردیم و برای این کار در کوارتوس یک پروژه ساخته و تمامی فایل‌هایی که می‌خواهیم سنتز کنیم (تقریباً تمامی فایل‌ها به جز تست‌بنچ‌ها) را به آن پروژه اضافه نمودیم.

سپس با چندین بار تلاش برای سنتز کدها، اشکالات موجود و بخش‌های غیر سنتز پذیر کد را از آن حذف کردیم و با قطعه کدهای سنتز پذیر جایگزین کردیم تا در نهایت سنتز مازول اصلی یعنی مازول top که در اصل مربوط به Integration تمامی مواردی بود که پیاده‌سازی کرده‌ایم، انجام شد.

برای راحت‌تر شدن اجرا و تست و import کردن فایل‌های سنتز شده به نرم‌افزار مدل‌سیم، از یک اسکریپت استفاده کردیم که با گرفتن ورودی، خود به خود نرم‌افزار مدل‌سیم را باز کرده و شبیه‌سازی را انجام داده و نتیجه را به ما ارائه می‌دهد. این اسکریپت سبب شد که سرعت تست کردن کدها و نتایج بسیار بالا رود و بتوانیم سریع‌تر مشکلات کدها را یافته و آن‌ها را برطرف کنیم.

در نهایت پس از رفع اشکالات کد مذکور، بالاخره خروجی تولید شده توسط کد با خروجی مورد انتظار ما مشابه شد که شکل آن را در شکل ۳ می‌کنید.



شکل ۳: نتیجه‌ی سنتز

مشارکت اعضا در پروژه

کدهای اسمبلی: کوشا جعفریان و روزین نوبهاری
 کدهای وریلاگ: مهبد مجید و کیمیا حمیدیه
 اشکال زدایی کدهای وریلاگ و سنتز آن: کوشا جعفریان
 کامنت گذاری کدهای اسمبلی: روزین نوبهاری
 کامنت گذاری کدهای وریلاگ: کیمیا حمیدیه
 برنامه‌ریزی پروژه و نظارت و کمک در تمامی بخش‌ها + تست نهایی پروژه: سبحان محمدپور
 محتوای داک فاز نهایی پروژه: کوشا جعفریان
 تنظیم و طراحی داک پروژه: مهبد مجید و کیمیا حمیدیه

مراجع

- داک JVM در سایت ORACLE موجود در

[JSR-000924 Java® Virtual Machine Specification](https://www.oracle.com/technetwork/java/javase/tech/jsr-000924-java-virtual-machine-specification-428761.pdf)