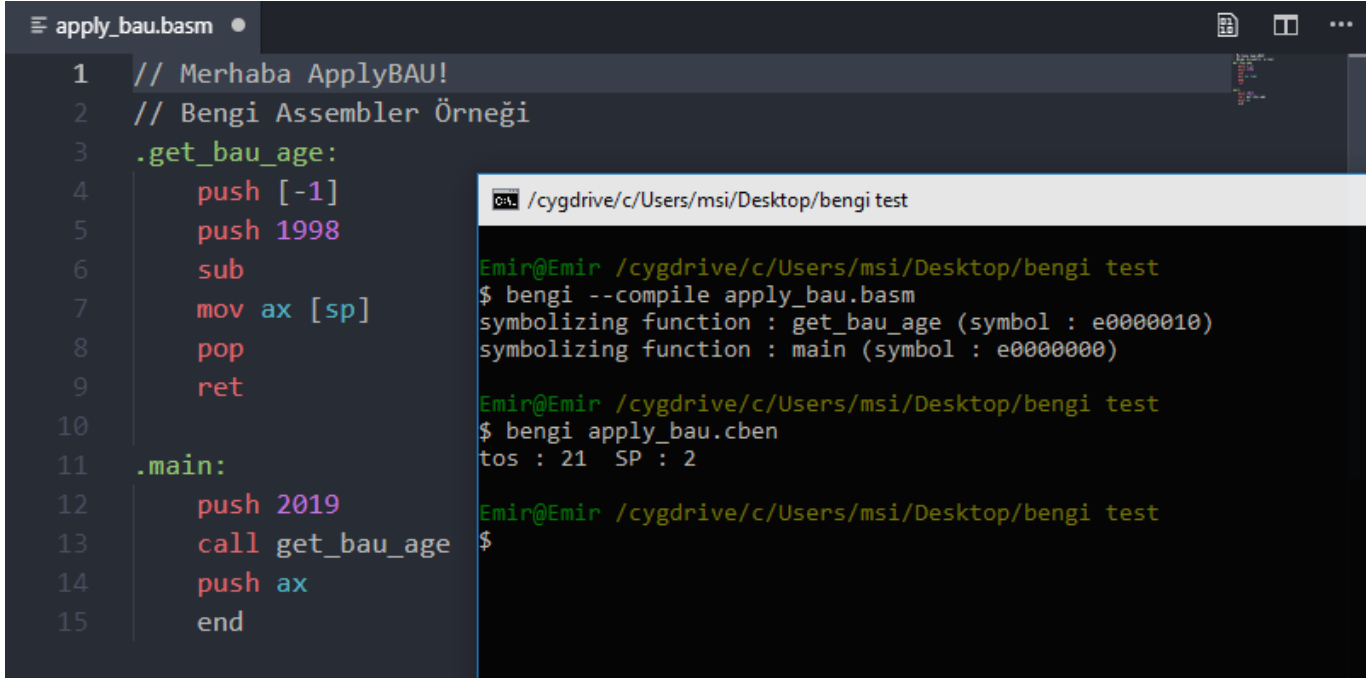


# BengiVM - BengiASM Project

Emir Erbasan 2019

blog post : <https://humanova.github.io/humanova/post/bengi>



```
1 // Merhaba ApplyBAU!
2 // Bengi Assembler Örneği
3 .get_bau_age:
4     push [-1]
5     push 1998
6     sub
7     mov ax [sp]
8     pop
9     ret
10
11 .main:
12     push 2019
13     call get_bau_age
14     push ax
15     end
```

```
Emir@Emir /cygdrive/c/Users/msi/Desktop/bengi test
$ bengi --compile apply_bau.basm
symbolizing function : get_bau_age (symbol : e0000010)
symbolizing function : main (symbol : e0000000)

Emir@Emir /cygdrive/c/Users/msi/Desktop/bengi test
$ bengi apply_bau.cben
tos : 21 SP : 2

Emir@Emir /cygdrive/c/Users/msi/Desktop/bengi test
$
```

İçerik:

- [Nasıl Başladım?](#)
- [Ne yaptım?](#)
- [Ne yapacağım?](#)
- [BASM Instruction Seti](#)
- [BASM Instruction Formatı](#)
- [Registerlar](#)
- [Bengi Fonksiyon-Symbol Sistemi](#)
- [Bengi Calling Convention - Fonksiyon Çağırma Düzeni](#)
- [Örnek Program](#)
- [BASM Fibonacci Örneği](#)
- [Performans Hakkında](#)

[Bengi GitHub Repo](https://github.com/humanova/Bengi) | <https://github.com/humanova/Bengi>

## Nasıl başladım?

Son birkaç yıldır **low level programming** ve **reverse engineering** gibi konularla ilgilenmemin ardından, programlama dillerine ve **derleyici teorisine** olan merakım da artmaya başladı. Uzun zamandır kafama takılan bu konuyu, **Kasım-Aralık 2018** gibi araştırmaya başladım. Dil dediğimiz şey nedir, nasıl çalışır, yazdığımız kodu işlemci nasıl yorumlar gibi soruların cevaplarını öğrenebilmek adına derleyici teorisini öğrenmeye başladım. Ardından *-az bilmemin getirdiği özgüven ile-* kendi dilimi yazmaya karar verdim.

Kendi dilimi yazmaya karar verdiğim sırada aslında bu konu üzerindeki bilgim epey azdı. Bu zamanlar kafamdaki şey; **makine koduna derlenen fonksiyonel bir dil** yazmak, bu dili **Python** gibi yorumlanan ve görece yavaş çalışan bir dilde performans gerektiren işlerde kullanmaktı. Ancak bunu yapabilmem için gerekli olan bilgim ve deneyimim hiç yoktu. (Kafamdaki bu dilin çok uğraştırıcı ve zaman alıcı bir şey olduğunu şuan da belirtmek istiyorum. **Intel**'in kendi **x64** ve **x86** mimarisini anlattığı kılavuzun 5000 sayfaya yakın olduğunu göz önünde bulundurursak, aklımdaki dilin **syntax**'ini oluşturup düzgün bir şekilde parse edebilsem bile işlemci instructionlarına dönüştürmem epey zamanımı alırdı)

Bu nedenle daha kolay konseptler üzerinde kendimi geliştirip sonrasında bu hayalimi gerçekleştirmeye karar verdim. Aklıma gelen basit konseptler arasından (**interpreted** ya da **bytecode**'a derlenen bir VM dili) bir **sanal makine**(VM) dili oluşturmayı seçtim.

VM konseptini seçmemin önemli bir nedeni de, bir nevi **kendi işlemcimi**, kendi kodumla **simüle edebilme** imkanına sahip olmam. Sadece bir mimari öğrenip ona kod derlemek yerine **mimariyi kendim üretip** onun üzerinde çalışacak instructionları da benim derleyebilmem bana hem öğrenme hem de uygulama anlamında daha çok imkan sundu. Yaratıcı çözümler üretebilme anlamında da bu durumun çok büyük etkisi oldu.

VM dil konseptlerini öğrenmeye başladım. Çeşitli videolar ve benzer projelerden öğrenip uygulamayı çalıştım. (Yine bir VM dili olan Java dilinin de derlenme/çalışma prensiplerini de kabaca öğrendim.)

Ve ortaya **BASM** ve **BengiVM** çıktı.

## Ne yaptım?

---

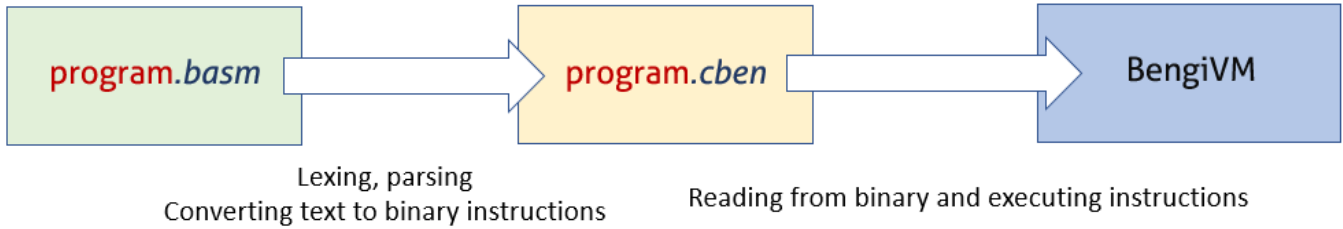
**C++** ile, bir *Stack VM* ve bu VM üzerinde çalışacak instructionları derleyen bir **Assembler** yazdım. Yani kendi **mimarimi** ve bunun üzerinde çalışan kendi **düşük seviye dilimi** yazdım denilebilir. Bu dilin 7 farklı tipte 27 tane komutu(instruction), 5 tane **sanal makine registri**, **sembol sistemi** ve kendi **fonksiyon çağırma düzeni**(Bengi Calling Convention) var.

**Bengi Assembler**: **.basm** uzantılı ve içerisinde kendi Assembly'sinin olduğu metin dosyalarını okuyor ve her biri 32 bit olan instructionlara dönüştürüyor. Ardından **.cben** uzantılı bir binary dosyasına, bu 32 bit instructionları sırayla yazıyor. Bytecode'umuzu üreten program diyebiliriz.

**Bengi Assembly(BASM)**: Assembler'ın okuduğu metin dosyasındaki sanal makine Assembly'miz. **X86 Assembly** instructionlarına benzer instruction setine sahip. Ve temel(primitive) instruction'ların bir kısmını içeriyor.

**Bengi Virtual Machine(BengiVM)**: Assembler tarafından derlenmiş **.cben** uzantılı dosyadan instructionları okur ve çalıştırır. VM instructionları sırayla okur ancak sırayla çalıştırmaz. Önce **main** sembolünün adresini bulur ve instructionları çalıştırmaya bu adresten başlar.

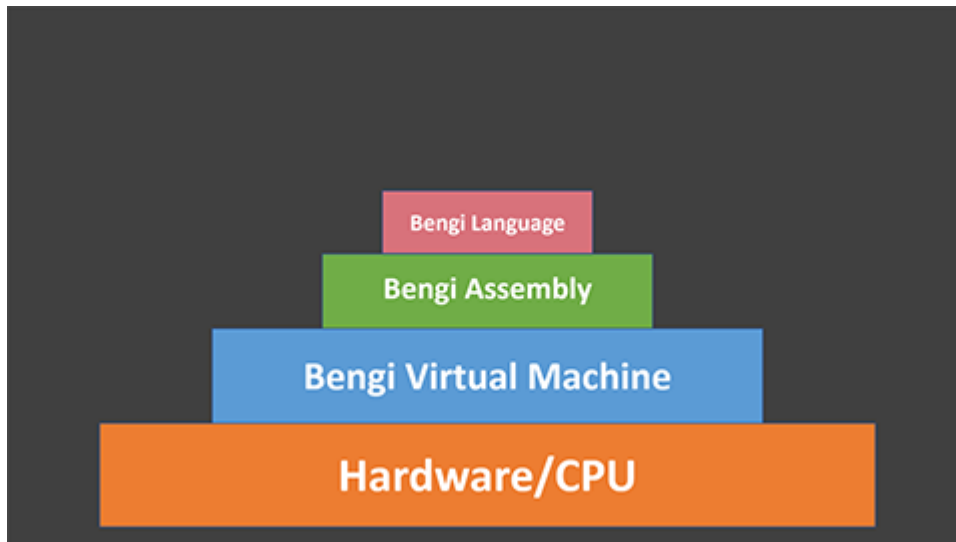
**BengiDLL**: Bengi Virtual Machine fonksiyonlarını çağırabilen basit bir **dynamic library**. Bu library'yi kullanarak **.cben** dosyalarını sanal makinede çalıştırıp sonuçlarını döndürmek mümkün. **Python ctypes** modülü ile **bengi.dll**'i import edip, Bengi Unit Testlerin hepsini tek bir python scripti ile çalıştırabiliyorum.



Yani toparlayacak olursak: Bengi Assembly yazılan kodları Assembler ile bytecode'a dönüştürüyoruz. Bu bytecode dosyasını(.cben) sanal makine okuyor ve çalıştırıyor.

## Ne yapacağım?

Bengi Virtual Machine ve Bengi Assembly'yi geliştirmeye devam edip, aynı zamanda bu iki yapıtaşı üzerine kurulu bir **high level programlama dili** geliştirmek istiyorum. Bunun için biraz daha yolum var. Oluşturmak istediğim Bengi dilini kendimin de aktif bir şekilde kullandığı bir dil olmasını istiyorum. Bu nedenle sağlam temeller üzerinde bu dili oluşturmanın çok daha sağlıklı olacağını düşünüyorum. Şu anlık amacım BengiASM'i **üzerine konulabilir** şekilde, daha da geliştirmek.



## BASM Instruction Seti

BASM Instruction Seti; 11 ilkel, 16 aritmetik instructiondan oluşuyor. Ayrıca 5 adet temel VM Registerı var.

### BASM Instruction Seti

Primitive (İlkel) Instructions	
Push	Load
Pop	Nov
Jmp	Jz
Jnz	Cmp
Func*	Call
Ret	

Arithmetic Instructions	
Add	Eq
Sub	Ne
Mul	Lt
Div	Le
Mod	Gt
Or	Ge
Xor	Shl
And	Shr

Registers*
AX
BX
SP
BP
PC

## BASM Instruction Formatı

Her instruction 32 bitten oluşur ve ilk 3 bit **instruction tipini**, sonraki 29 bit ise bu **instruction data'yı** oluşturur.

İlk zamanlar 2 bit header - 30 bit data formatını kullanmaya karar vermiştim. Sonrasında yeni tipler eklemem gerekti ve 3 - 29 formatına geçtim. 29 bitlik bir data olmasından memnun değilim ancak yeni tipleri eklemek için bunu uygulamalıydım.

İleride *bitfield*'lar ve değişken boyutta instructionlar kullanarak daha iyi bir instruction formatı geliştirmeyi düşünüyorum.

Header format :

```
100 : Primitive Instruction
011 : Addressing ([10] etc.)
010 : Negative Addressing ([-10] etc.)
110 : Register
111 : Symbol
000 : Positive Integer
001 : Negative Integer
```

register	data
AX	0001
BX	0002
SP	0003
BP	0004
PC	0005

Instruction headerlara bakarken farketmiş olabileceğiniz gibi: *float* gibi temel veri tipleri henüz BASM ve BengiVM'de yok. Zor olanı sonraya bırakıyorum diyebilirim. Fonksiyon-symbol sistemini(fonk. çağırma, döndürme, argüman iletme) de bu blogu hazırlamadan hemen öncesindeki günlerde ekledim.

## Registerlar

AX, BX, BP, SP, PC olmak üzere 5 adet sanal makine registerı var. Her register 32 bitten oluşuyor ve 4 farklı işlevi olan register var.

ID	Register	İşlev
1	AX	Veri tutmak, taşımak
2	BX	Veri tutmak, taşımak
3	SP	Son stack elemanını işaret etmek
4	BP	Fonksiyon stack frame'i işaret etmek
5	PC	Çalıştırılacak instructionı işaret etmek

## AX ve BX:

Bu iki registerımız basit veriler tutuyor. Teoride **Akümülatör Registerı** olarak geçiyorlar. Bu VM için görevleri; çağırılan fonksiyonlardan dönen değerleri tutmak, aritmetik işlemlerinden ardından (isteğe bağlı olarak) stackteki herhangi bir veriyi tutmak.

## SP:

**Stack Pointer**, Stack'teki son değer(en tepedeki) adresini gösterir. Stack Pointer sayesinde program akışı sırasında Stacki kontrol ederiz.

## BP:

Base Pointer ya da Base Register şeklinde adlandırılabilir. Yaptığı şey: Bir fonksiyon çağırıldığında, stack üzerinde çağırdığımız fonksiyonu **baz adres** olarak tutar. Bir fonksiyon içindeyken adresleme işlemlerinde base pointer sayesinde **relative** olarak adresleme yapılabilir. Böylece fonksiyon yazarken programın genelini düşünerek adresleme yapmanın zorluğundan kurtuluruz.

## PC:

Program Counter ya da Program Pointer şeklinde adlandırılabilir. Yaptığı şey, VM'in o sırada uygulayacağı instructionı işaret etmektir. Program Counter sayesinde yazdığımız programı aşağıdan yukarıya düz bir şekilde işleyip çalıştırmak yerine, çeşitli fonksiyonları çağırıp dilediğimiz adresteki instructionları tekrar tekrar çalıştırabiliyoruz.

## Bengi Fonksiyon-Symbol Sistemi

Not: BASM'deki fonksiyon tanımlama yazımı(**.fonk:**), gerçek Assembly dillerinde sectionları tanımlamak için kullanılan bir yazım. Bunun farkındayım. Bu yazımı kullanmak **.basm** dosyalarında derleme sırasında fonksiyon tanımlarının bulunmasında kolaylık sağlıyor.(Çünkü iki özel karakter arasına fonksiyon ismi yazılıyor ve bunu dosyayı parse ederken ayrıştırması çok kolay.)

```
symbolizing function : get_bau_age (symbol : e0000010)
symbolizing function : main (symbol : e0000000)
```

BASM'de fonksiyonlar **.fonksiyon-adi:** şeklinde tanımlanır ve program derlenirken her fonksiyona özel bir sembol üretilir. Her yeni tanımlanan sembol, sembol tablosu denen vektöre ismi ile birlikte(fonksiyon ismi) itilir ve kaydedilir.

Sembol tablosunun ilk elemanı her zaman **main** fonksiyonudur ve sembolü daima **0xE0000000**'dir. Her program **main** fonksiyonu barındırmak zorundadır. Assembler **main** tanımlaması göremezse derleme işlemini bitirir.

Eğer tanımlanmış fonksiyonlardan biri dosyada tekrar tanımlanırsa BASM hata verir ve program derlenemez.

**main** fonksiyonu dışında tanımlanan her fonksiyonun sembol tablosundaki sembol değeri, **tabloda kendisinden önce tanımlanmış** fonksiyonun sembol değerinin **0x10** fazlasıdır. Yani **main** dahil olmak üzere 3 adet fonksiyonu bulunan bir programda tablodaki semboller şu şekilde gözükmeli:

```

func_name    symbol
main       : 0xE0000000
fonk_2     : 0xE0000010
fonk_3     : 0xE0000020

```

Önceden tanımlanmış bir fonksiyon tekrar tanımlanmadan, ismi dosyada kullanılırsa ("*call fonksiyon*" gibi), isminin geçtiği adrese sembol değeri yazılır. (Bu şekilde binary'ye derlenir.)

Fonksiyon tanımlamalarının yapıldığı yerler "*func symbol*" instruction formatında binary'ye çevirilir. (*func* kullanıcının değil, assembler'ın kullanabildiği özel bir instruction'dur. Derlenmiş program(.c*ben*) üzerindeki sembolleri işaretlemek için kullanılır.)

```

$ bengi_dbg apply_bau.cben
instructions : 21
Func symbol found : address -> 1001 | symbol -> e0000010
Func symbol found : address -> 1013 | symbol -> e0000000
push 2019
call e0000010 (1001) call get_bau_age (address)
push [-1]
push 1998
sub 2019 1998
mov ax, [sp]
pop
ret (1017)
push ax
end

```

Yukarıdaki görselde de görebildiğiniz gibi, *call* instructionı ile fonksiyon çağırılırken, fonksiyonun adresine Assembler tarafından verilen sembolünü kullanarak erişildi.

Bengi Virtual Machine binary dosyasını okurken ilk yaptığı şey tüm dosya üzerinde **sembol** aramaktır. Bunu yaparken *func* instructionlarını bulur ve bulduğu her *func* instructionunun ardından gelen instructionı **sembol tablosuna**, sembolün adresi ile birlikte kaydeder.

Her program *main* fonksiyonundan başlar.

Program çalıştırılmaya başladıktan sonra bu sembolün tekrar kullanıldığı(örn. fonksiyon çağırma) görülürse, **sembol** hakkında tabloya kaydettiği bilgileri kullanarak işlem yapar.

## Bengi Calling Convention - Fonksiyon Çağırma Düzeni

Bengi Calling Convention, her zaman uyulması gereken fonksiyon çağırma kuralları bütünü denebilir. Bengi Calling Convention *\_\_stdcall* gibi tamamen stack üzerinden işliyor.

Çağırma düzeni pseudocode üzerinde şöyle:

```

caller :
    push arg    //      fonkiyon argümanlarını ittir
    call func   //      (push PC, push BP, PC = fonksiyon adresi, BP = yeni BP)
    pop arg     //      fonksiyon argümanlarını stackten sil

```

```

callee :
    push[-1]          //      son ittirilen elemanı al (argüman)
    mov ax [sp]        //      AX'e dönme değerini yaz
    pop               //      lokalleri stackten sil
    ret               //      return (BP = eski BP, pop, PC = eski PC, pop)

```

## Fonksiyonu çağırın:

Çağıracağı fonksiyon herhangi bir argüman gerektiriyorsa, fonksiyon çağırılmadan önce argümanları stacke ittmekten sorumlu. Argümanlar ittirildikten sonra **call** ile fonksiyonu çağırır. Eğer gereklyse, fonksiyon argümanlarını stackten silmek de kendi görevidir.

**Call** aslında birden fazla instruction içeren bir instruction. Sırasıyla yaptığı şeyler:

- 1 - **PC**'yi stacke ittir. (Fonksiyonun çağırıldığı yere dönebilmesi için gerekli)
- 2 - **BP**'yi stacke ittir. (Fonk. döndükten sonra çağırılmadan önceki **BP** değerini tekrar alabilmesi için gerekli)
- 3 - **PC**'yi fonksiyon adresine eşitle. (Fonksiyondaki instructionlari çalıştırabilmek için önce fonksiyon adresine zıplamamız(**jmp**) gerekli)
- 4 - **BP**'yi yeni **BP**'ye eşitle. (Önceki fonksiyon ile çalıştırılan fonksiyonun stack frameleri arasında bir ayırıt gerekli ki, genel adreslemeden bağımsız olarak bir adresleme kullanabilelim ve her fonksiyon kendi lokalindekilerle çalışsın. **BP**'yi değiştirmemizin gerekçesi bu.)

## Çağırılan fonksiyon:

Çalışması için herhangi bir argüman gerekli ise bu argümanları stack üzerinden seçerek, kendi stack frameine itirmekle sorumlu. Döndürmesi gereken bir değer var ise **AX** ya da **BX** registerlarına bu değerleri **-zorunlu olarak-** yazarak döndürmeli. Dönme değerini hazırladıktan sonra **ret** ile dönmeden önce stack frameinde bulunan lokalleri silmek **-zorunlu olarak-** kendi görevidir.

**(Herhangi bir fonksiyonun başarılı bir şekilde dönebilmesi için SP'nin eski BP'nin adresini göstermesi zorunludur.** Tüm lokaller silindikten sonra SP'nin gösterdiği değer eski BP'yi kaydettiğimiz adrestir. BengiVM bu bilgiye güvenerek fonksiyonu döndürür.)

**Ret** birden fazla instruction içeren bir instruction. Sırasıyla yaptığı şeyler:

- 1 - **BP**'yi eski **BP**'ye eşitle. (**ret**'in ardından **SP**'nin gösterdiği adresteki değer, **BP**'nin önceki değeridir (bu değer fonksiyon çağırılırken **call** ile ittirilmişti). Önceki **BP** değerine dönerek çağırılan fonksiyonun bulunduğu stack frame'e yeniden girmiş oluyoruz.)
- 2 - **pop**. (Eski **BP**'yi tutan stack elemanı ile işimiz bittiği için siliyoruz.)
- 3 - **PC**'yi eski **PC**'ye eşitle. (Fonksiyon çağırırken **call** instructionu ile ittirdiğimiz eski Program Counter'ımızı yeniden kullanmaya başlıyoruz. Yani fonksiyonu çağırduğumuz yere geri zıplıyoruz)
- 4 - **pop**. (Eski **BP**'yi tutan stack elemanı ile işimiz bittiği için siliyoruz.)

## Örnek program

```
1  .fonk:
2      push [-1]
3      push bx
4      add
5      mov ax [sp]
6      pop
7      ret
8
9  .main:
10     push 2
11     push 16
12     push -5
13     add
14     mul
15     mov bx [sp]
16
17     push -18
18     call fonk
19     push ax
20     end
```

Bu programı `bengi -c ornek.basm` ya da `basm ornek.basm` komutlarıyla derliyoruz. Derlenirken, Bengi Assembler dosyadaki fonksiyonları bulup her fonksiyonu sembolize ediyor. Bu sayede fonksiyon tanımlayıp çağırabiliyoruz.

```
$ bengi -c ornek.basm
symbolizing function : fonk (symbol : e0000010)
symbolizing function : main (symbol : e0000000)
```

Derlemenin ardından üretilmiş `ornek.cben` dosyasını, `bengi ornek.cben` komutu ile VM üzerinde çalıştırıyoruz.

```
$ bengi ornek.cben
tos : 4  SP : 3
```

BengiVM programı yüklüyor, çalıştırıyor ve 4 sonucunu veriyor. Şimdi bu sonucun nasıl üretildiğine sırayla instructionlar üzerinden giderek bakalım.

İlk olarak; `main` fonksiyonumuzda, stack'e 3 adet tam sayı ittirip bunlar arasında işlem yapıyoruz. (`16 + (-5)` ardından `11 * 2`)



```
.main:
    push 2
    push 16
    push -5
    add          ;; 16 + (-5)    --> 11
    mul          ;; 11 * 2      --> 22
```

İşlemlerin ardından stackte kalan sonucu *mov* ile *BX register*ımıza aktarıyoruz.

```
mov bx [sp]
```

Sonrasında çağırılacak fonksiyonumuz için argümanımızı stacke ittirip, fonksiyonu *call* ile çağırıyoruz.

```
push -18
call fonk
```

Bu fonksiyonun ilk yaptığı şey, **stacke en son ittirilmiş değeri** kendi stack frame'ine tekrar ittirmek. (*push[-1]*) Yani kendisi çağırılmadan önce ittirdiğimiz argümanı kullanabilmek için bu argümanı stackteki kendi bölmesine tekrar ittirdi.

```
.fonk:
    push [-1]
```

Ardından *BX register*da tutulan değeri de ittirip, fonksiyon argümanı ile topluyor.

```
push bx
add
```

Bu işlemin sonucunu *AX register*a yazıyor ve stack frame'inde olan her lokali(1 tane var, o da toplam sonucu) *pop* ile stackten siliyor.

```
mov ax [sp]
pop
```

Ardından *ret* ile fonksiyon çağırıldığı yere dönüyor.

```
ret
```

**AX**'te tutulan değer ittiriliyor. Fonksiyonun döndürdüğü sonucu bu şekilde elde ediyoruz. Ve programımız *end* ile bitiriliyor.

```
push ax
end
```

Program sonunda *tos : 4 SP : 3* şeklinde bir çıktıyla karşılaşıyoruz.

**tos**: Top of the stack demek. Program bitirildiği sırada stackteki son elemanın değerini bize gösteriyor. **SP** ise son elemanın stackteki konumunu gösteriyor.

Bu programı **bengi\_dbg** ile **debug** modunda çalıştırdığımızda, instructionların hangi sırada işlediğine ve hangi değerlerle işlem yaptıklarına dair bilgileri görebiliyoruz. Şöyle bir çıktı alıyoruz:

```
$ bengi_dbg ornek.cben
instructions : 32
Func symbol found : address -> 1001 | symbol - > e0000010
Func symbol found : address -> 1013 | symbol - > e0000000
push 2
push 16
push -5
add 16 -5
mul 2 11
mov bx, [sp]
push -18
call e0000010 (1001)
push [-1]
push bx
add -18 22
mov ax, [sp]
pop
ret (1028)
push ax
end
tos : 4  SP : 3
```

## BASM Fibonacci Örneği

Uygulaması görece daha zor olan bir örnek oluşturmak istedim. Aklıma gelen ilk şey, *fibonacci*'nin n. elemanını döndüren bir fonksiyon oluşturmak oldu. Bu fonksiyonun hem **C** hem de **BASM** implementasyonlarını aşağıda inceleyebilirsiniz.

(Not : İki örnek de iterative şekilde *fibonacci*'yi hesaplıyor.)

## C Implementasyonu

```
int fibonacci(int n)
{
    int ret = 1;
    int prev = 0;
    int prevprev;
    for (int i = 1; i < n; i++)
    {
        prevprev = prev;
        prev = ret;
        ret = prev + prevprev;
    }
    return ret;
}

int main()
{
    int fib = fibonacci(20)
    return fib;
}
```

## BASM Implementasyonu

```
;; fibonacci(n) function, bengi-asm

.fib:
    mov bx [-1]          ;; copy func. argument to BX
                        ;; as loop stop variable

    push 2                ;; loop var
    mov ax 1
    push 1
                        ;; loop start

    push ax
    add
    push [sp]
    push ax
    sub
    mov ax [sp]
    pop
                        ;; loop var += 1

    push [1]
    push 1
    add
                        ;; copy loop var

    mov [1] [sp]
                        ;; check if loop var == loop stop var

    push bx
    eq
```

```

jz 1012          ;; jump to loop start instruction (push ax)
                 ;; and pop stack
                 ;; loop end

mov ax [sp]      ;; write return value to AX
pop              ;; remove function locals
pop
ret              ;; return

.main:
push 20           ;; push 20 as function argument
call fib          ;; call fibonacci function
pop              ;; remove function argument
push ax           ;; push function return value
end              ;; end program

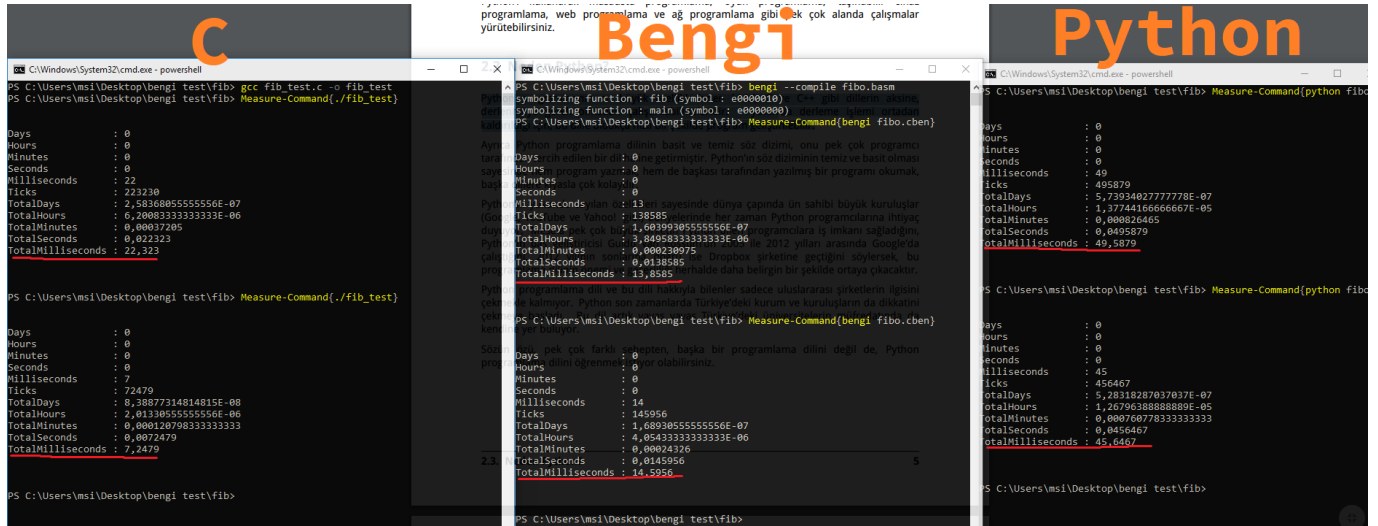
```

## Performans Hakkında

Yukarıdaki fibonacci örneğinden de yararlanarak; C, Bengi ve Python'ın fibonacci'nin 20. basamağını ne kadar sürede hesaplayacağını ölçüp karşılaştırmak istedim. Ölçümlerim tam olarak "hesaplama süresi"ni vermiyor. Bu nedenle çalışma zamanı(runtime) süresini baz alarak basit bir karşılaştırma hazırladım.

Karşılaştırma için kullandığım dosyalar :

<https://gist.github.com/humanova/d9a752a90ba93d5628970e9dcca88e51>



C - 1. çalıştırma : 22.32 ms

C - 2. çalıştırma : 7.24 ms

(2. çalıştırmada olan bu büyük süre farkının nedeni, programın(binarynin) ilk çalıştırmanın ardından cache'de tutuluyor olması olabilir.)

Bengi - 1. çalıştırma : 13.85 ms

Bengi - 2. çalıştırma : 14.59 ms

Python - 1. çalıştırma : 49.58 ms

Python - 2. çalıştırma : 45.64 ms

