

SSB Kuantum Algoritması Yarışması

TRUBA İkinci Ön Eleme Aşaması

Soru Belgesi

İçindekiler

QAOA ile Maksimum Bağımsız Küme Probleminin Çözümü	1
1. Problem Tanımı	1
2. Amaç.....	1
3. Çözüm, Girdi ve Çıktı Dosyaları	2
3.1 Çözüm Şablon Dosyası	2
3.2 Girdi Formatı	2
3.3 Çıktı Formatı	3
4. Rapor.....	4
5. Sorular	5
Soru 1 – Standart Maksimum Bağımsız Küme Problemi	5
Soru 2 – Zorunlu Düğüm Kısıtı	5
Soru 3 – Birlikte Seçilemeyen Düğüm Çiftleri	6
Soru 4 – Grover-QAOA.....	6
6. Değerlendirme Kriterleri	6
6.1 Rapor Değerlendirmesi Ayrıntıları	7
6.2 Kod Değerlendirmesi Performans Metrikleri	8
6.3 Eşitlik Durumu.....	8
Referanslar	9

QAOA ile Maksimum Bağımsız Küme Probleminin Çözümü

1. Problem Tanımı

Bir çizge $G = (V, E)$ için, bir düğüm kümesi $S \subseteq V$ aşağıdaki koşulu sağlıyorsa **bağımsız küme (independent set)** olarak adlandırılır:

- S kümesindeki herhangi iki düğüm arasında bir kenar bulunmaz.

Başka bir ifadeyle, $(u, v) \in S$ ise $(u, v) \notin E$ olmalıdır.

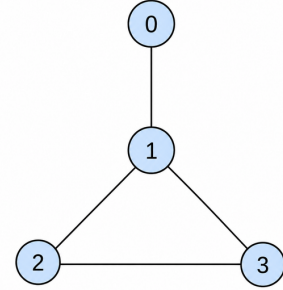
Maksimum Bağımsız Küme (Maximum Independent Set - MIS) problemi, verilen bir çizgede mümkün olan en fazla sayıda düğüm içeren bağımsız kümeyi bulmayı amaçlar.

Örnek olarak verilen çizgeyi ele alalım:

- Düğümler: $\{0,1,2,3\}$
- Kenarlar: $\{(0,1), (1,2), (1,3), (2,3)\}$

Bu çizgede:

- $\{0,2\}$ bir bağımsız kümedir.
- $\{0,3\}$ bir bağımsız kümedir.
- $\{0,2,3\}$ bağımsız küme değildir; çünkü (2) ve (3) arasında bir kenar vardır.



Bu örnekte maksimum bağımsız kümenin boyutu 2'dir.

2. Amaç

Bu etapta, Kuantum Yaklaşık Optimizasyon Algoritması (Quantum Approximate Optimization Algorithm, QAOA) [1] kullanarak Maksimum Bağımsız Küme (Maximum Independent Set, MIS) probleminin farklı kısıtlar altında nasıl çözülebileceğini incelemeniz beklenmektedir.

Her soru için:

- İkili karar değişkeni şu şekilde seçilmelidir:
 $x_i = 1$ eğer i . düğüm bağımsız kümede yer alıyorsa, $x_i = 0$ aksi takdirde
- Her soru için kurulacak QAOA devresindeki kubit sayısı, girdi olarak verilen çizgenin düğüm sayısına eşit olmalıdır. Kubit sayısı azaltılmamalıdır.
- Post-processing yöntemleri kullanmak yasaktır.
- Her soru için elde edilen en iyi çözüm olarak, QAOA simülasyonu sonucu elde edilen örneklem kümesinde yer alan en büyük bağımsız kümeye karşılık gelen dizi seçilmelidir.

Qiskit bit sıralaması dikkate alınmalıdır. Örneğin 01101 dizisi, [0,2,3] kümesine karşılık gelmektedir.

- Kapı (gate) sayısını azaltmaya yönelik optimizasyonlar uygulanabilir.
- QAOA katman sayısı (p) serbestçe belirlenebilir.
- Kullanılacak klasik optimizasyon yöntemi serbestçe seçilebilir.
- Hiperparametreler serbestçe belirlenebilir.
- Kullanılması istenen varyant özel olarak belirtilmediği ve yukarıdaki kurallara uyulduğu sürece, QAOA algoritmasının varyantları ele alınabilir.
- Takımlar kodlarını belirlenen süre limiti içerisinde çalıştırmak zorundadır. Belirlenen süre limitini aşan kodlar değerlendirmeye alınmayacaktır. Takımlar bu süreyi çözüm yaklaşımlarını geliştirmek ve iyileştirmek amacıyla kullanabilirler.
- Problemlerin çözümünde verilen tüm kararların gerekçelendirilmesi ve elde edilen sonuçların analiz edilmesi beklenmektedir.

Problemin doğru modellenmesi ve QAOA veya QAOA'nın uygun bir varyantı kullanılarak çözülmesi ve yukarıdaki kurallara uyulması tüm sorular için zorunlu koşullardır. Belirtilenin dışında herhangi bir kuantum algoritmasının ya da klasik hesaplama ağırlıklı bir yöntemin kullanılması durumunda çözüm değerlendirmeye alınmayacaktır.

3. Çözüm, Girdi ve Çıktı Dosyaları

3.1 Çözüm Şablon Dosyası

Katılımcıların çözümlerini verilen şablon dosyasını kullanarak hazırlamaları gereklidir. Dosya okuma ve çıktı kaydetme formatları değiştirilmemelidir. Aksi takdirde çözümler değerlendirmeye alınmayacaktır.

Her soru için, Python şablon dosyasının bir kopyasını alıp içine çözümlerinizi ekledikten sonra dosyayı “takimXX_cozumY.py” olarak kaydetmeniz ve sınav kurallarında belirtilen klasöre yüklemeniz gerekmektedir. Burada “XX” takım kodunu ve “Y” soru numarasını temsil etmektedir. **Tek haneli olan takım numaraları başına sıfır koymalı; örneğin hackathong4 proje hesabına sahip takım için “takim04_cozumY” şeklinde olmalıdır.**

Örnek: Python dosyası, 20. takım, 3. soru, 1. girdi için şu şekilde çalıştırılacaktır:

```
python takim20_cozum_soru3.py --input soru3_girdi1.json
```

Python dosyası, 6. takım, 1. soru, 2. girdi için şu şekilde çalıştırılacaktır:

```
python takim06_cozum_soru1.py --input soru1_girdi2.json
```

3.2 Girdi Formatı

Tüm sorularda giriş verileri JSON formatında sağlanacaktır. Girdi dosyaları “`soruY_girdiZ.json`” şeklinde isimlendirilmiştir. Burada “Y” soru numarasını, “Z” ise girdi numarasını temsil etmektedir.

N düğümlü bir çizgede düğüm kümesi $\{0,1,\dots,N-1\}$ şeklindedir. Çizge, düğümler arasındaki bağlantıları gösteren bir komşuluk (adjacency) matrisi ile temsil edilecektir. Sorulara bağlı olarak çizge dışında ek girdiler olabilir. Örneğin zorunlu düğümler veya birlikte seçilemeyen düğüm çiftleri ayrı alanlar altında verilecektir.

Örnek 1:

```
{
  "question_id": 2,
  "case_id": 1,
  "cizge": [[0,1,0,0],
            [1,0,1,0],
            [0,1,0,1],
            [0,0,1,0]],
  "zorunlu_dugumler": [1,2]
}
```

Örnek 2:

```
{
  "question_id": 3,
  "case_id": 2,
  "cizge": [[0,1,0,0],
            [1,0,1,0],
            [0,1,0,1],
            [0,0,1,0]],
  "yasak_ikililer": [[1,2],[2,3]]
}
```

Yazılan kodun yalnızca örnek girdiler için değil, aynı formatta verilen tüm geçerli girdiler için çalışması beklenmektedir.

3.3 Çıktı Formatı

Tüm sorularda çıktı json formatında bir sözlük olarak kaydedilecektir. Dosyaların kaydedileceği klasör ve dosya isimleri, verilen şablon dosyasında belirlenmiştir. Bu formatın değiştirilmemesi gerekmektedir.

Kaydedilecek sözlükte aşağıdaki alanların yer alması gerekmektedir.

“**job_id**”: Slurm’den alınan Job ID

“**question_id**”: Soru numarası

“**input**”: Girdi dosyasının adı

“**shots**”: Kullanılan shot sayısı

“p”: Kullanılan katman sayısı

“counts”: Örneklem kümesi (sözlük formatında)

“max_ind_set”: Elde edilen örneklemde bulunan en büyük bağımsız küme

“approximation_ratio”: Bulunan en büyük bağımsız kümenin büyüklüğünün, klasik algoritmayla (katılımcılar kendi klasik algoritmalarını kullanabilirler, teslim edilmesine gerek yoktur.) bulunan en büyük bağımsız kümenin büyüklüğüne oranı. Virgülden sonra 2 basamak kullanılarak ifade edilmelidir.

“circuit”: Örneklemeleri elde etmek için kullanılan devre (qasm formatında). Devre, sadece CNOT ve U3 kapısında sahip olacak şekilde transpile edilmelidir.

“cnot_count”: Örneklemeleri elde etmek için kullanılan devredeki CNOT sayısı. Devre, sadece CNOT ve U3 kapısına sahip olacak şekilde transpile edildikten sonra hesaplanmalıdır.

“depth”: Örneklemeleri elde etmek için kullanılan devrenin derinliği. Devre, sadece CNOT ve U3 kapısına sahip olacak şekilde transpile edildikten sonra hesaplanmalıdır.

Örnek:

Aşağıdaki örnekte 1 katmanlı QAOA devresi 10 shot olarak çalıştırılmıştır. Örneklemde, 10 adet örnek vardır. Bunlardan geçerli ve en büyük olan 0101 dizisidir. Qiskit sıralaması göz önüne alındığında [0, 2] kümesine denk gelmektedir. Klasik optimal çözümün bu örnek için 3 olduğunu varsayalım. approximation ratio $\frac{2}{3} = 0.67$ olarak raporlanmıştır.

```
{  "job_id": 12345
  "question_id": 1,
  "input": "input_q1_case1.json",
  "shots": 10,
  "p": 1,
  "counts": {"0101": 2, "1111": 3, "0001", "0100":5},
  "max_ind_set": [0, 2],
  "approximation_ratio": 0.67,
  "circuit": "OPENQASM 3.0;\ninclude \"stdgates.inc\";\nqubit[4] meas;\nqubit[4] q;\nu3(pi/2, -2.4865595065504182, -pi) q[0];\nu3(pi/2, 1.3100662940787497, -pi) q[1];\ncx q[0], q[1];\nu3(0, 0, 2.4865595065504182) q[1];\ncx q[0], q[1];\nu3(pi/2, 0, pi) q[2];\ncx q[1], q[2];\nu3(0, 0, 2.4865595065504182) q[2];\ncx q[1], q[2];\nu3(5.440290885330258, -pi/2, pi/2) q[2];\nn",
  "cnot_count": 4,
  "depth": 9
}
```

4. Rapor

Raporlarda takımların aldıkları kararları gerekçelendirmeleri ve geliştirdikleri tasarımları, yaklaşımları ve yöntemleri açık ve anlaşılır bir şekilde açıklamaları beklenmektedir. Rapor, yalnızca elde edilen sonuçları sunmakla sınırlı olmamalı; sonuçlara nasıl ulaşıldığını ve tasarım tercihlerinin nedenlerini de ortaya koymalıdır.

- İki oturum için ayrı ayrı iki rapor hazırlanacaktır.
- Her oturumun sonunda ilgili final raporu INDICO sayfasında yayınlanan kayıt formu üzerinden gönderilecektir (<https://indico.truba.gov.tr/event/278/registrations>).

- Takımların her bir oturuma ait hazırlayacağı final raporunu “PDF” formatında sisteme yüklemesi zorunludur.
- Takımlar raporlarını oluştururken aşağıdaki LaTeX şablonlarını veya bu formatı koruyan başka bir programı kullanabilirler.
- Şablonda verilen birinci ve ikinci seviye başlıklar değiştirilemez, üçüncü ve daha alt seviye başlıklar eklenebilir.
- Sayfa sınırları Birinci Oturum Raporu için minimum 4 sayfa ve maksimum 10 sayfa; İkinci Oturum Raporu için minimum 4 sayfa ve maksimum 8 sayfadır. Bu sınırlara kapak, içindekiler, referanslar dahildir.
- Rapor değerlendirmesi kör hakem usulüne göre yapılacaktır. Raporlarda takım ismi, takım kaptanı ismi ve/veya takım üyeleri isimleri doğrudan yazılamaz; bu bilgilerin ipuçları verilemez. **Takım kimliğini ortaya çıkarabilecek herhangi bir bilginin veya ipucunun kasıtlı ya da kasıtsız olarak paylaşıldığının tespit edilmesi halinde takım diskalifiye edilecektir.**

Rapor Şablonları

Birinci Oturum Rapor Şablonu:

<https://www.overleaf.com/read/jkprtmgbgnnz#1d348a>

İkinci Oturum Rapor Şablonu:

<https://www.overleaf.com/read/kmtkmvwbpnxx#94ee5d>

5. Sorular

Aşağıda, Maksimum Bağımsız Küme (Maximum Independent Set, MIS) probleminin farklı varyantlarını ve QAOA algoritmasının farklı uygulama/uyarlamalarını kapsayan dört soru yer almaktadır. Tüm sorularda, oluşturulan devrelerin CNOT ve U3 kapıları kullanılarak transpile edilmiş olması gerekmektedir. Devre bağlantılılığı (connectivity) olarak tam bağlantılı (all-to-all) yapı kullanılmalıdır.

Soru 1 – Standart Maksimum Bağımsız Küme Problemi

Verilen çizge için standart QAOA kullanarak Maksimum Bağımsız Küme problemini çözünüz.

Soru 2 – Zorunlu Düğüm Kısıtı

Standart MIS problemine ek olarak bazı düğümlerin çözümde kesin olarak bulunması istenmektedir. Bu düğümler girdi dosyasında bir liste olarak verilmiştir. Örnek:

```
{  
  ...  
  "zorunlu_dugumler": [1, 2, 5]  
}
```

Zorunlu düğüm kısıtı ceza yöntemi ile entegre edilmelidir. Kullanılan yaklaşımın kısıtları doğru şekilde sağladığı gösterilmelidir.

Soru 3 – Birlikte Seçilemeyen Düğüm Çiftleri

Standart MIS problemine ek olarak bazı düğüm çiftlerinin birlikte seçilmesi yasaktır. Bu düğümler liste içerisinde ikililer olarak verilmiştir. Örnek:

```
{  
  ...  
  "yasak_ikililer": [  
    [1, 2],  
    [5, 7],  
    [3, 6]  
  ]  
}
```

Örneğin, 5 ve 7 yasak ikiliyse, $\{0, 2, 5, 7\}$ bağımsız kümesinde 5 ve 7 düğümleri bir arada yer aldığından geçerli bir çözüm değildir. Amacımız, verilen kısıt altında en büyük bağımsız kümeyi bulmaktır.

Birlikte seçilmesi yasaklanan düğüm çiftleri, ceza terimleri ile entegre edilmelidir. Kullanılan yaklaşımın kısıtları doğru şekilde sağladığı gösterilmelidir.

Soru 4 – Grover-QAOA

Standart QAOA’de karıştırıcı operatörü (mixer) olarak $-\sum_i X_i$ kullanılmaktadır. Kısıtlı problemler için alternatif olarak önerilen, Grover karıştırıcı operatörü [2], geçerli çözümler altuzayı üzerinde yayılım (diffusion) işlemi gerçekleştiren bir operatör olarak düşünülebilir. Böylece optimizasyon süreci boyunca belirli kısıtların korunması amaçlanabilir.

Bu soruda, Soru 3’te verilen kısıtlar için uygun bir Grover karıştırıcı operatörü ve başlangıç durumu tasarlamamız ve QAOA devresinde bu operatörü ve başlangıç durumunu kullanmamız beklenmektedir.

Grover karıştırıcı operatörünün ve başlangıç durumunun nasıl oluşturulduğunu, bu aşamanın QAOA devresinin tasarımına etkisini açıklayınız ve çözüm uzayını nasıl etkilediğini tartışınız.

6. Değerlendirme Kriterleri

Her takımın çözüm kodu, sınav sırasında verilen girdilerden farklı iki test girdisi kullanılarak yeniden çalıştırılacaktır. Kodların ürettiği devreler, Hakem Heyeti tarafından geliştirilen analiz kodu kullanılarak değerlendirilecektir. Her bir soru-girdi çifti üç kez çalıştırılacak ve elde edilen sonuçların ortalaması alınacaktır. Soru-girdi çiftlerinin her biri diğerlerinden bağımsız olarak değerlendirilecektir.

Problemin doğru modellenmesi ön koşul olarak değerlendirilecektir. Bu koşulu sağlayan çözümler aşağıda yer alan Tablo 1’de belirlenen kriterler doğrultusunda değerlendirilecektir. **Problemi doğru modellemeyen çözümler, doğru sonuç üretmiş olsalar dahi değerlendirmeye alınmayacaktır.**

Tablo 1: Puan Dağılımı

Kriter		Puan
Kod değerlendirmesi	Ayrıntılar için Tablo 2’ye bakınız.	80
Rapor değerlendirmesi	Yaklaşım, kullanılan yöntemler ve yapılan seçimlerin gerekçelendirilmesi	20
TOPLAM		100

6.1 Rapor Değerlendirmesi Ayrıntıları

Rapor içeriği: Hazırlanacak raporda, her soru için aşağıdaki bölümlerin bulunması beklenmektedir:

1. Problemin Tanımı ve Formülasyonu: Problemin nasıl ele alındığı, kullanılan değişkenler, amaç fonksiyonu ve ilgili kısıtların açıklanması.
2. Çözüm Yaklaşımı: Kullanılan algoritma ve yöntemin açıklanması ve problemin çözümüne nasıl uygulandığının belirtilmesi.
3. Teknik Tasarım ve Seçimler: Katman sayısının (p) seçimi, başlangıç durumu, mixer, klasik-kuantum hibrit yaklaşım, optimizatör, kullanıldıysa ceza katsayısı, hiperparametreler ve benzeri teknik tercihlerin açıklanması ve gerekçelendirilmesi.
4. Sonuçlar ve Yorumlar: Elde edilen sonuçların ve kullanılan yaklaşımın yorumlanması; yöntemin güçlü ve zayıf yönlerinin tartışılması.
5. Yapay Zeka Kullanım Bildirisi: Bu kısımda hangi teknolojik araçlardan ne şekilde faydalandığınızdan bahsedebilirsiniz. Eğer herhangi bir yapay zeka aracından yardım aldıysanız bunu bu kısımda ayrıntılı şekilde belirtmelisiniz.

Rapor değerlendirmesi her soru için ayrı olarak 5 puan üzerinden yapılacaktır. Değerlendirmede, probleme yönelik yaklaşımın ve kullanılan yöntemlerin etkinliği ile yapılan teknik seçimlerin gereklendirilmesi dikkate alınacaktır. Bu kapsamda, örneğin katman sayısının (p) seçimi, klasik-kuantum hibrit yaklaşımın tasarımı, optimizatör ve hiperparametrelerin seçimi, başlangıç durumu ve mixer seçimi gibi teknik tercihler ile bu tercihlerin gerekçeleri değerlendirilecektir. Değerlendirme, sorunun yapısına ve kullanılan yönteme bağlı olarak ilgili teknik tercihlerin uygun ve etkin biçimde ele alınması üzerinden yapılacaktır.

Takımlar tarafından raporlanan sayısal sonuçlar performans değerlendirmesinde esas alınmayacaktır. Performans metrikleri, değerlendirme aşamasında kullanılan yeni veri setleri üzerinde takım kodlarının yeniden çalıştırılması ve Hakem Heyeti tarafından hazırlanan değerlendirme kodu kullanılarak hesaplanacaktır.

6.2 Kod Değerlendirmesi Performans Metrikleri

Kodların değerlendirilmesi sırasında dikkate alınan metrikler, değerlendirme komitesi tarafından hazırlanan ve tüm takımlara aynı şekilde uygulanan değerlendirme kodu kullanılarak hesaplanacaktır. Her bir soru biri küçük diğeri bk olmak üzere iki farklı veri seti ile çalıştırılacak ve aşağıdaki formül ile puanlanacaktır.

$$S_{q,d} = P_{q,d} \left[0.6r + 0.2 \frac{C_{min,p}}{C} + 0.2 \frac{D_{min,p}}{D} \right] \frac{1}{1 + 0.1(p - 1)}$$

Burada,

- $S_{q,d}$: q . soru, d . veri seti için skor,
- $P_{q,d}$: q . soru, d . veri seti için ayrılmış olan maksimum puan,
- r : Approximation ratio,
- $C_{min,p}$: Aynı p değeri kullananlar arasındaki minimum CNOT sayısı,
- C : Takımın CNOT sayısı,
- $D_{min,p}$: Aynı p değeri kullananlar arasındaki minimum derinlik,
- D : Takımın derinlik değeri,
- p : QAOA katman sayısı,

olarak kullanılmaktadır. $P_{q,d}$ değerleri Tablo 2’de ayrıntılı olarak verilmiştir.

Tablo 2: $P_{q,d}$ dağılımı tablosu. Her bir soru için gönderilen kodlar 2 veri seti (VS-1 ve VS-2) ile çalıştırılacaktır.

	Soru 1		Soru 2		Soru 3		Soru 4		Toplam Puan
	VS-1	VS-2	VS-1	VS-2	VS-1	VS-2	VS-1	VS-2	
Soru ve veri seti başına maksimum puan ($P_{q,d}$)	6	8	8	10	10	12	12	14	80

6.3 Eşitlik Durumu

Takımların eşit puan alması durumunda ilk ön eleme aşamasındaki video puanına bakılacaktır.

Referanslar

- [1] Farhi, Edward, Jeffrey Goldstone, and Sam Gutmann. "A quantum approximate optimization algorithm." *arXiv preprint arXiv:1411.4028* (2014).
- [2] Bärtschi, Andreas, and Stephan Eidenbenz. "Grover mixers for QAOA: Shifting complexity from mixer design to state preparation." In *2020 IEEE International Conference on Quantum Computing and Engineering (QCE)*, pp. 72-82. IEEE, 2020.