

Yapı Mühendisliğinde Kuantum Hesaplama: Gelecek Uygulamalar İçin Teorik Bir Çerçeve

Filiz Kolcu¹

Özet

Kuantum hesaplama, karmaşık hesaplama problemlerini ele almak için devrim niteliğinde bir yaklaşım sunmakta ve yapı mühendisliği alanını dönüştürme potansiyeline sahiptir. Bu çalışma, kuantum algoritmalarının—özellikle **Grover algoritması** (Grover, 1996), **Varyasyonel Kuantum Özdeğer Çözücüsü (VQE)** (Peruzzo et al., 2014) ve **Kuantum Yaklaşık Optimizasyon Algoritması (QAOA)** (Farhi, Goldstone & Gutmann, 2014) klasik yapısal analiz ve tasarım yöntemleriyle ilişkili sınırlamaların aşılmasındaki olası rolünü ve teorik temellerini incelemektedir. Çalışmada, kuantum hesaplamının sonlu elemanlar analizi ve optimizasyon süreçlerine entegrasyonu için kavramsal bir çerçeve sunulmakta; veri kodlama, hibrit mimariler gibi temel teknik zorluklar ele alınmakta ve gelecekteki araştırmalar için umut verici yönler ortaya konulmaktadır. Bu çalışma, kuantum destekli yapısal tasarımın gelecekteki pratik uygulamaları için bir temel oluşturmayı amaçlamaktadır.

1. Giriş

Modern mühendislik problemleri; optimize edilmiş performans, sürdürülebilirlik ve dayanıklılık gereksinimlerinin artmasıyla giderek daha karmaşık hale gelmektedir. Bu durum, sonlu elemanlar analizi ve sezgisel optimizasyon algoritmaları gibi klasik hesaplama yöntemlerinin hem teorik hem de pratik sınırlarına yaklaşmasına neden olmaktadır. Bu yöntemler özellikle geniş tasarım uzayları, yüksek derecede doğrusal olmayan davranışlar veya gerçek zamanlı karar verme gerektiren problemlerde yetersiz kalabilmektedir. Bu durum özellikle yapısal optimizasyon ve belirsizlik altında tasarım problemlerinde daha belirgin hale gelmektedir.

1 Dr. Öğr. Üyesi, İnşaat Teknolojisi, İslahiye Meslek Yüksekokulu, Gaziantep Üniversitesi, Gaziantep, Türkiye, <https://orcid.org/0000-0003-2056-632X>

Kuantum hesaplama ise kuantum mekaniği ilkelerine dayanan ve klasik hesaplama yaklaşımlarından tamamen farklı bir hesaplama paradigması sunmaktadır. Klasik bilgisayarlarda veriler 0 veya 1 şeklinde temsil edilirken, kuantum bitleri (qubitler) aynı anda birden fazla durumda bulunabilen süperpozisyon özelliklerine sahiptir. Bu özellik sayesinde kuantum bilgisayarlar çok büyük çözüm uzaylarını paralel olarak inceleyebilme potansiyeline sahiptir.

Yapı mühendisliği bağlamında optimizasyon problemleri genellikle NP-zor problemler olup çok amaçlı tasarım kararları içermektedir. Bu nedenle Grover algoritması, Varyasyonel Kuantum Özdeğer Çözücüsü (VQE) ve Kuantum Yaklaşık Optimizasyon Algoritması (QAOA) gibi kuantum algoritmaları umut verici alternatifler sunmaktadır. Bu algoritmalar teorik olarak küresel minimumun belirlenmesi, topoloji optimizasyonu ve parametrik duyarlılık analizleri gibi görevlerde polinomik veya hatta üstel hızlanma sağlayabilir.

Bu çalışmanın amacı, kuantum hesaplamanın yapı mühendisliği süreçlerine entegrasyonunun teorik temellerini ve potansiyel uygulamalarını incelemektir. Kuantum-klasik hibrit sistemlerin yetenekleri, sınırlamaları ve entegrasyon stratejileri ortaya konularak yapısal analiz, tasarım ve optimizasyon alanlarında yeni bir hesaplama çerçevesinin temelleri sunulmaktadır. Kuantum hesaplama ve hibrit algoritmalar son yıllarda mühendislik optimizasyonu alanında yoğun biçimde araştırılmaktadır (Farhi et al., 2014; Peruzzo et al., 2014; Preskill, 2018).

2. Klasik Yapısal Optimizasyonun Zorlukları

Yapısal optimizasyon, mühendislik tasarımının temel bileşenlerinden biridir ve belirli kısıtlar altında en verimli malzeme dağılımını, geometriyi ve destek koşullarını belirlemeyi amaçlar. Geleneksel olarak bu süreç **sonlu elemanlar yöntemi (FEM)**, gradyan tabanlı optimizasyon yöntemleri ve çeşitli sezgisel algoritmalarla desteklenmektedir.

Ancak yapısal sistemlerin karmaşıklığı arttıkça bu klasik yöntemler önemli sınırlamalarla karşılaşmaktadır.

En önemli problemlerden biri boyutsallık laneti (curse of dimensionality) olarak bilinen durumdur. Tasarım değişkenlerinin ve kısıtların sayısı arttıkça çözüm uzayı üstel olarak büyümekte ve tüm olası tasarımların araştırılması hesaplama açısından çok maliyetli hale gelmektedir. Bu durum özellikle:

- topoloji optimizasyonu
- şekil optimizasyonu
- malzeme dağılımı problemleri

gibi alanlarda uzun hesaplama sürelerine ve yüksek bellek gereksinimlerine yol açmaktadır.

Buna ek olarak klasik optimizasyon yöntemleri çoğu zaman yerel minimumlara takılma problemi yaşamaktadır. Özellikle temas problemleri, doğrusal olmayan malzeme davranışı veya burkulma kısıtları içeren yapısal problemlerde amaç fonksiyonunun yüzeyi konveks değildir. Bu nedenle gradyan tabanlı yöntemler başlangıç tahminine bağlı olarak alt optimum çözümlere yakınsayabilmektedir.

Bu sorunları aşmak için genetik algoritmalar, tavlama benzetimi (simulated annealing) ve parçacık sürü optimizasyonu (PSO) gibi meta-sezgisel yöntemler geliştirilmiştir. Ancak bu yöntemler genellikle daha yüksek hesaplama maliyeti gerektirir ve yakınsama garantisi sunmaz.

Sonuç olarak bu hesaplama sınırlamaları, mühendislerin tasarım alternatiflerini hızlı biçimde incelemesini ve gerçek zamanlı adaptif tasarım yapmasını zorlaştırmaktadır. Bu durum, kuantum destekli hesaplama gibi yeni yaklaşımların önemini ortaya koymaktadır.

3. Kuantum Hesaplamanın Temelleri

Kuantum hesaplama, kuantum mekaniğinin ilkelerini kullanarak hesaplama yapan yeni bir paradigmadır. Bu yaklaşımın temelinde kuantum bitleri (qubitler) bulunur.

Klasik bitler yalnızca 0 veya 1 değerini alabilirken, qubitler süperpozisyon sayesinde aynı anda birden fazla durumda bulunabilir. Bu durum kuantum bilgisayarların çok sayıda olasılığı paralel olarak değerlendirmesine olanak tanır.

Kuantum hesaplamanın klasik modellerden ayrılmasını sağlayan bir diğer önemli özellik ise dolanıklık (entanglement) olgusudur. Dolanık qubitler arasında güçlü korelasyonlar oluşur ve bu durum karmaşık optimizasyon ve simülasyon problemlerinde büyük hesaplama avantajı sağlar.

Kuantum devrelerinin temel yapı taşları kuantum kapılarıdır. Bu kapılar qubit durumlarını doğrusal cebir ve kompleks vektör uzayları çerçevesinde manipüle eder.

Yapı mühendisliği açısından önemli bazı kuantum algoritmaları şunlardır:

Grover Algoritması

Yapı mühendisliğinde tasarım veri tabanlarının taranması veya çok sayıda yük senaryosu içinden kritik durumların belirlenmesi için kullanılabilir.

Variational Quantum Eigensolver (VQE)

Modal analiz ve titreşim problemlerinde ortaya çıkan özdeğer problemlerinin çözümünde kullanılabilecek hibrit bir algoritmadır.

Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA)

Kombinatorial optimizasyon problemleri için geliştirilmiştir ve özellikle:

- kafes sistem optimizasyonu
- kesit seçimi
- yük yolu belirleme

gibi problemlerde kullanılabilir.

4. Hibrit Kuantum-Klasik İş Akışları

Mevcut kuantum donanımlarının sınırlamaları nedeniyle günümüzde çoğu uygulama hibrit kuantum-klasik mimariler kullanmaktadır. Bu sistemlerde klasik bilgisayarların güvenilirliği ile kuantum hesaplamanın paralellik avantajı birleştirilmektedir.

Tipik bir hibrit sistem iki bölümden oluşur:

1. Klasik Hesaplama

- Sonlu eleman analizi
- sınır şartlarının uygulanması
- gerilme–şekil değiştirme hesapları

2. Kuantum Hesaplama

- optimizasyon problemlerinin çözümü
- tasarım konfigürasyonlarının değerlendirilmesi

Bu iki alan arasında varyasyonel geri besleme döngüsü bulunmaktadır. Klasik ve kuantum tabanlı optimizasyon yaklaşımlarının temel özellikleri ve karşılaştırılması **Tablo 1**'de özetlenmiştir.

Tablo 1. Yapısal Optimizasyonda Klasik ve Kuantum Algoritmaların Karşılaştırılması

Kriter	Klasik Algoritmalar	Kuantum Algoritmalar
Yakınsama Hızı	Orta	Daha hızlı (Grover \sqrt{N})
Küresel Optimizasyon	Yerel minimum riski	Daha geniş arama
Paralel Hesaplama	CPU/GPU ile sınırlı	Süperpozisyon kullanır
Donanım	Yüksek performanslı CPU	NISQ cihazları
Ölçeklenebilirlik	Zor	Potansiyel olarak iyi
Gürültü Dayanımı	Olgun algoritmalar	Hata düzeltme gerekli

5. Örnek Uygulama: İş Akışı Entegrasyonu

Bu bölümde iki boyutlu bir kafes sisteminin topoloji optimizasyonu için kavramsal bir örnek verilmiştir. Hibrit kuantum-klasik optimizasyon sürecinin genel iş akışı Şekil 1'de gösterilmektedir. Yapısal topoloji optimizasyonu klasik hesaplama açısından oldukça maliyetli problemler içermektedir (Bendsøe & Sigmund, 2003).

Adım 1 – Klasik Modelleme

- geometri tanımlanır
- malzeme özellikleri atanır
- FEM analizi yapılır

Adım 2 – Kuantum Kodlama

Tasarım değişkenleri QUBO formunda kuantum devresine aktarılır.

Adım 3 – Kuantum Optimizasyonu

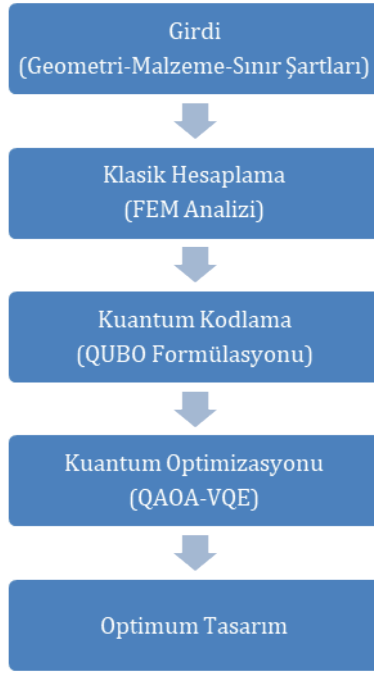
QAOA algoritması kullanılarak en iyi tasarım konfigürasyonları aranır.

Adım 4 – Klasik Değerlendirme

Bulunan tasarım FEM ile tekrar analiz edilir.

Adım 5 – Görselleştirme

Sonuçlar klasik yöntemlerle karşılaştırılır.



Şekil 1. Hibrit Kuantum-Klasik Yapısal Optimizasyon İş Akışı

6. Teknik Zorluklar

Kuantum hesaplamaların mühendislik uygulamalarında kullanılmasını sınırlayan bazı önemli zorluklar vardır.

6.1 Veri Kodlama

Mühendislik problemlerindeki sürekli değişkenlerin qubitlere dönüştürülmesi zordur.

6.2 Gürültü ve Decoherence

Kuantum sistemleri çevresel gürültüden etkilenir ve bu durum hesaplama doğruluğunu azaltır.

6.3 Ölçeklenebilirlik

Mevcut kuantum bilgisayarlar yalnızca yüzlerce qubit içermektedir.

6.4 Alan Özgü Yazılım Eksikliği

Yapı mühendisliği için özel kuantum yazılım kütüphaneleri henüz gelişmemiştir.

7. Gelecek Araştırma Yönleri

Önemli araştırma alanları şunlardır:

- hibrit optimizasyon çözücüleri
- kuantum tabanlı malzeme modelleme
- verimli kodlama yöntemleri
- hata azaltma teknikleri
- disiplinlerarası araştırma merkezleri
- eğitim programlarının geliştirilmesi

8. Sonuç

Kuantum hesaplama, hesaplama yoğun problemlerin çözümünde devrim niteliğinde bir potansiyele sahiptir. Yapı mühendisliği alanında tasarım ve optimizasyon süreçleri giderek daha fazla hesaplama gücü gerektirdiğinden, kuantum algoritmaları önemli fırsatlar sunmaktadır.

Bu çalışmada kuantum hesaplamanın yapısal mühendislik süreçlerine entegrasyonu için teorik bir çerçeve sunulmuştur. Hibrit kuantum-klasik sistemler, geleceğin mühendislik hesaplama araçlarının temelini oluşturabilir.

Kuantum donanımının gelişmesiyle birlikte mühendislik topluluğunun bu teknolojiyi aktif biçimde kullanmaya hazır olması büyük önem taşımaktadır.

Kaynakça

1. Farhi E, Goldstone J, Gutmann S (2014) A quantum approximate optimization algorithm. *arXiv preprint* arXiv:1411.4028
2. Peruzzo A, McClean J, Shadbolt P, Yung M-H, Zhou X-Q, Love PJ, Aspuru-Guzik A, O'Brien JL (2014) A variational eigenvalue solver on a photonic quantum processor. *Nat Commun* 5:4213
3. Grover LK (1996) A fast quantum mechanical algorithm for database search. *Proc 28th Annual ACM Symposium on Theory of Computing*, pp. 212–219
4. Schuld M, Petruccione F (2018) *Supervised Learning with Quantum Computers*. Springer, Cham
5. McClean JR, Romero J, Babbush R, Aspuru-Guzik A (2016) The theory of variational hybrid quantum-classical algorithms. *New J Phys* 18(2):023023
6. Han Y, Luo Y, Lu Y, Zhang H (2020) Structural topology optimization: From classical to quantum computing approaches. *Comput Struct* 238:106282
7. Bendsøe MP, Sigmund O (2003) *Topology Optimization: Theory, Methods, and Applications*. Springer, Berlin
8. Tapia M, Zavala EG, Sartori A, Eiben AE (2023) A survey of hybrid quantum-classical optimization methods. *Quantum Mach Intell* 5:3
9. Gurobi Optimization (2021) Gurobi Optimizer Reference Manual. <https://www.gurobi.com>
10. Wang Y, Tao Z, Li C (2019) Structural reliability analysis using surrogate models and quantum-inspired optimization. *Struct Saf* 76:85–95
11. Fingerhuth M, Babej T, Ing C (2018) A quantum-classical framework for combinatorial optimization. *arXiv preprint* arXiv:1810.13411
12. Preskill J (2018) Quantum computing in the NISQ era and beyond. *Quantum* 2:79
13. Li Y, Benjamin SC (2017) Efficient variational quantum simulator incorporating active error minimization. *Phys Rev X* 7(2):021050
14. Ajagekar A, Humble TS, You F (2020) Quantum computing based hybrid solution strategies for large-scale discrete-continuous optimization problems. *Comput Chem Eng* 132:106630
15. OpenQASM and IBM Qiskit documentation: <https://qiskit.org>
16. Raza H, Hasan S (2021) Application of quantum optimization in civil engineering: A review. *Int J Quantum Inf* 19(5):2150024
17. Daskin A, Kais S (2014) Decomposition of unitary matrices for finding quantum circuits: Application to molecular Hamiltonians. *J Chem Phys* 134:144112
18. Ortega A, Adalsteinsson H, et al. (2023) Quantum computing applications in engineering optimization: A roadmap. *Eng Comput* 39:657–676

19. Montemayor A, González J, Romera R (2020) Quantum machine learning in structural health monitoring. *Sensors* 20(4):1138
20. Nielsen MA, Chuang IL (2010) *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge University Press, Cambridge

Declarations

Funding The author received no financial support for the research, authorship, and/or publication of this article.

Conflicts of Interest The author declares that there is no conflict of interest.

Ethical Approval Not applicable.

Consent to Participate Not applicable.

Consent for Publication The author consents to the publication of this article.

Availability of Data and Materials No datasets were generated or analyzed during the current study.

Authors' Contributions The sole author is responsible for all aspects of the work including conceptualization, writing, and revision.

