DERS TANITIM ve UYGULAMA BİLGİLERİ

Dersin Adı	**Kodu**	**Yarıyıl**	**T+U+L (saat/hafta)**	**Türü (Z / S)**	**Yerel Kredi**	**AKTS**
Bilgi Kuramına Giriş: Klasikten Kuantuma	CMPE 493	Güz	03+00+00	Seçmeli	3	5

Akademik Birim:	MDBF / Bilgisayar Mühendisliği
Öğrenim Türü:	Örgün Eğitim
Ön Koşullar	Yok
Öğrenim Dili:	İngilizce
Dersin Düzeyi:	Lisans
Dersin Koordinatörü:	- -
Dersin Amacı:	Enformasyon, bilgisayar mühendisliği, yapay zekâ, haberleşme ve modern fiziğin ortak dili hâline gelmiştir. Bu ders, fiziğin temel yasalarının klasik değil kuantum olduğu durumda enformasyon işleme ilkelerinin nasıl değiştiğini aşağıdaki temel sorular üzerinden incelemektedir: • Enformasyon nedir? Nasıl ölçülür? • Korelasyonlar neden önemlidir? • Enformasyon fiziksel bir taşıyıcı olmadan var olabilir mi? • Kuantum enformasyonunu klasik enformasyondan temelden ayıran kuantum kaynaklar nelerdir? • Enformasyon, belirli bir nedensel düzen olmaksızın işlenebilir mi? Ders, olasılık kuramı, entropi, bağıl/göreli entropi ve karşılıklı enformasyon gibi klasik enformasyon kuramının temel kavramlarından başlayarak öğrencilerin kuantum durumları, ölçümler ve dinamiklere enformasyon kuramsal bir bakış açısı geliştirmelerini amaçlamaktadır. Bu temeller üzerine inşa edilen ders kapsamında, enformasyon işlemede kullanılan eşevrelilik (coherence), dolaşıklık (entanglement) ve bağlamsallık (contextuality) gibi kuantuma özgü kaynaklar incelenmekte; aynı zamanda bu kaynakların belirlediği enformasyon işleme sınırları ele alınmaktadır. Son olarak, standart kaynak kuramı çerçevesinin ötesine geçilerek kuantum nedensel ilişkiler, ön ve son seçilim (pre- and post-selection) ile belirsiz nedensellik sıralamaları (indefinite causal order) gibi modern yaklaşımların bu sınırları nasıl genişletebildiği tartışılmaktadır. Ders, Bilgisayar Mühendisliği ile Yapay Zekâ ve Veri Mühendisliği öğrencileri için tasarlanmış olup, enformasyonun fizik yasaları çerçevesinde nasıl temsil edildiğini, işlendiğini, aktarıldığını ve sınırlandığını kavramaya yönelik kuramsal altyapıyı kazandırmayı amaçlamaktadır. Ders, kuantum donanımı veya programlamasına odaklanmak yerine, kuantum teknolojilerinin hesaplama, haberleşme, algılama ve makine öğrenmesi alanlarında neden temelden yeni paradigmalar sunduğunu anlamak için gerekli kavramsal temelleri sağlamaktadır.
Dersin İçeriği:	Klasik enformasyon kuramı: Olasılık kuramı, belirsizlik, entropi, bağıl/göreli entropi, karşılıklı enformasyon ve enformasyon kazanımı. Fiziksel bir nicelik olarak enformasyon: kuantum süperpozisyonu, kuantum ölçümü, durum vektörleri, yoğunluk operatörleri ve von Neumann entropisi. Kuantum enformasyonunun matematiksel temelleri: Hilbert uzayları, Dirac gösterimi, tensör çarpımları, indirgenmiş durumlar, kısmi iz, kuantum ölçümleri, kuantum dinamiği, kuantum kanalları ve tam pozitif iz koruyan (CPTP) dönüşümler. Enformasyon işleme için kuantum kaynakları: Eşevrelilik (coherence), dolaşıklık (entanglement), kuantum uyuşmazlığı (discord), bağlamsallık (contextuality). Kuantum enformasyon işlemede temel sınırlar ve olanaklar: olanaksızlık teoremleri, temel eşitsizlikler, kuantum iletişimi, kuantum anahtar dağıtımı ve kuantum katalizi. Standart kaynak kuramı çerçevesinin ötesi: Ön ve son seçilim, zayıf ölçümler, zamansal kuantum korelasyonları, sözde yoğunluk operatörleri, kuantum nedensel ilişkileri, süreç matrisleri, belirsiz nedensellik sıralamaları, kuantum anahtarı (quantum switch) ve kuantum enformasyon bilimindeki güncel araştırma yönelimleri.
Dersin Öğrenme Çıktıları (ÖÇ):	• **1-** Olasılık dağılımları, entropi, bağıl/göreli entropi, karşılıklı enformasyon ve bunların enformasyon işlemedeki rollerini de kapsayacak şekilde klasik enformasyon kuramının temel kavramlarını açıklayabilir. • **2-** Enformasyon kuramsal kavramları kuantum durumları, kuantum ölçümleri ve kuantum dinamiği ile ilişkilendirerek enformasyonun neden fiziksel bir nicelik olduğunu açıklayabilir. • **3-** Hilbert uzayları, durum vektörleri, yoğunluk operatörleri, tensör çarpımları ve kısmi iz formalizmini kullanarak kuantum enformasyonunu temsil edebilir ve işleyebilir. • **4-** Kuantum kanalları ile tam pozitif iz koruyan (CPTP) dönüşümleri kullanarak kuantum enformasyonunun üniter ve açık sistem dinamikleri altındaki evrimini analiz edebilir.

	• **5-** Eşevrelilik, dolaşıklık, bağlamsallık ve diğer kuantum kaynaklarının enformasyon işleme görevlerindeki rollerini ayırt edebilir ve değerlendirebilir. • **6-** İmkânsızlık teoremleri ve enformasyon kuramsal sınırlar dâhil olmak üzere kuantum enformasyon işlemenin temel sınırlarını açıklayabilir ve bunları temel fizik ilkeleriyle ilişkilendirebilir. • **7-** Ön- ve son-seçilimin ve zamansal kuantum korelasyonlarının geleneksel kuantum enformasyon işleme çerçevelerini nasıl genişlettiğini temsili örnekler üzerinden açıklar. • **8-** Kuantum nedensel ilişkilerinin ve belirsiz nedensellik sıralamalarının temel ilkelerini açıklar ve bunların enformasyon işleme ve hesaplama açısından sağlayabileceği potansiyel avantajları belirler. • **9-** Kuantum enformasyon bilimindeki seçilmiş güncel gelişmeleri tartışır ve kuramsal kavramları gelişmekte olan kuantum teknolojileri ve disiplinlerarası uygulamalarla ilişkilendirir. • **10-** Standart kaynak-temelli yaklaşımlar, zamansal korelasyonlar ve kuantum nedensellik yapıları dâhil olmak üzere farklı kuantum enformasyon işleme paradigmalarını karşılaştırır ve bunların başlıca olanaklarını ve sınırlılıklarını belirler.
Dersin Öğrenme Yöntem ve Teknikleri	Ders, temel kavramların, matematiksel çıkarımların ve açıklayıcı örneklerin tahta veya eş zamanlı olarak ekrana yansıtılan dijital el yazısı kullanılarak adım adım geliştirildiği etkileşimli ders anlatımları şeklinde yürütülmektedir. Sunum slaytlarına dayalı bir öğretim yaklaşımı yerine, sınıf içi tartışmalar, soru-cevap etkinlikleri ve problem çözme uygulamaları aracılığıyla kavramsal öğrenmenin aktif olarak geliştirilmesi hedeflenmektedir. Öğrenme etkinlikleri; rehberli sınıf tartışmaları, çözümlü örnekler, kavramsal alıştırmalar, ödevler, kısa sınavlar, öğrenci sunumları ve kuantum enformasyon bilimi alanında seçilecek bir konuya ilişkin bireysel yazılı rapor hazırlanmasını kapsamaktadır. Öğrencilerin başarıları; iki ödev, iki kısa sınav, 8. haftada gerçekleştirilecek açık kaynak (open-book) ara sınav, 14. haftada yapılacak sözlü sunum ve dönem sonu sınavı yerine hazırlanacak bireysel yazılı rapor aracılığıyla değerlendirilecektir.

HAFTALIK PROGRAM

Hafta	Konular	Ön Hazırlık
1	Bölüm I – Temeller: Enformasyon Nedir? Enformasyon, belirsizliğin bittiği yerde başlar. Konular: Ayrık rassal değişkenler ve olasılık vektörleri; belirsizlik ve Shannon entropisi; bileşik ve marjinal olasılıklar; bağıl/göreli entropi ve ayırt edilebilirlik; karşılıklı enformasyon ve korelasyonlar; koşullu olasılıklar ve Bayes kuralı. Açıklayıcı örnekler: Veri sıkıştırma, rassallık çıkarımı, karmaşık enformasyon üretmeyi öğrenme, karmaşık enformasyonu tanımayı öğrenme.	Bertlmann ve Friis, Bölüm 19, Kısımlar 19.2–19.4 (sayfa 637-653) ya da Vedral, Bölüm 1, Kısımlar 1.1-1.4 (sayfa 3-11)
2	Bölüm I – Temeller: Enformasyon Fizikseldir Enformasyon madde üzerinde depolanır, ancak fizik yasaları tarafından yönetilir. Konular: Enformasyonun fiziksel olarak kodlanması ve temsili; olasılık genlikleri ve durum vektörleri; kuantum süperpozisyon ve ölçüm; saf ve karışık durumlar; yoğunluk operatörleri ve von Neumann entropisi. Açıklayıcı örnekler: Ardışık Stern–Gerlach deneyleri, Elitzur–Vaidman bomba sınayıcısı, ertelenmiş seçim deneyi ve kuantum silgi.	Bertlmann ve Friis, Kısımlar 3.1.3, 3.1.4, 3.2.1 (sayfa 75-80) & Kısımlar 11.1, 11.2 (sayfa 321-326) ya da Vedral, Kısımlar 2.1, 2.10–2.12 (sayfa 14–16, 25–29)
3	Bölüm I – Temeller: Kuantum Enformasyonunun Dili Kuantum enformasyonunun kendine özgü bir dili vardır. Konular: İç ve dış çarpım işlemleri; tensör çarpımı ve bileşik kuantum durumları; indirgenmiş durumlar ve kısmi iz; çarpım durumlar, ayrılabilir durumlar, dolaşık durumlar. Açıklayıcı örnekler: Bileşik kübit sistemleri, Bell durumları, Gibbs durumları, dolaşık sistemlerin indirgenmiş durumları.	Bertlmann ve Friis, Kısımlar 11.4-11.7 (sayfa 329-349) & Kısımlar 15.1.1, 15.1.3 (sayfa 434-436, 438-442) ya da Vedral, Kısımlar 2.2-2.4, 2.6-2.9, 2.13, 3.3 (sayfa 16-19, 21-25, 29-30, 35-37)

4	Bölüm I – Temeller: Kuantum Enformasyonunun İşlenmesi Ölçüm enformasyon üretir; ardından enformasyon evrilir. Konular: İzdüşüm ölçümleri, genelleştirilmiş ölçümler (POVM'ler) ve Born kuralı; Schrödinger evrimi ve üniter dönüşümler; açık sistem dinamikleri ve kuantum kanalları; tamamen pozitif ve iz koruyan (CPTP) haritalar ve Kraus gösterimleri. Açıklayıcı örnekler: Kuantum Eşevresizlik (decoherence), kuantum termalizasyon.	Bertlmann and Friis, Kısımlar 3.2, 11.3, 21.2, 21.3 (sayfa 77-82, 326-328, 705-712) ya da Vedral, Kısımlar 2.4-2.5, 3.6-3.7 (sayfa 19-21, 40-42)
5	Bölüm II – Kuantum Kaynakları: Kuantum Eşevrelilik Süperpozisyon yararlı hâle gelir. Konular: Kuantum eşevrelilik ve baz bağımlılığı; serbest durumlar ve serbest işlemler dâhil olmak üzere kaynak kuramlarının temel yapısı; eşevrelilik ölçütleri ve dönüşümleri; termodinamik bir kaynak olarak eşevrelilik. Açıklayıcı örnekler: Kuantum algoritmalarında girişim ve termo-eşevre etkisi.	G. Torun vd., Kısımlar 2.1-2.2, 3.2 (sayfalar 145-148, 153-158)
6	Bölüm II – Kuantum Kaynakları: Kuantum Korelasyonlar Korelasyonlar enformasyon taşır. Konular: Klasik ve kuantum korelasyonlar; kuantum karşılıklı enformasyonu; ayrılabilir ve dolaşık durumlar; seçilmiş dolaşıklık ölçütleri; kuantum uyuşmazlığı ve kuantum korelasyonların dağılımı. Açıklayıcı örnekler: Bell durumları, Werner durumları ve aynı yerel marjinallere sahip korelasyonlu durumlar.	Bertlmann ve Friis, Kısımlar 15.2.1-15.3.4, 16.1-16.2 (sayfa 443-459, 485-518) ya da Vedral, Kısımlar 10.3-10.7 (sayfa 111-123)
7	Bölüm II – Kuantum Kaynakları: Kuantumda Klasik Dışılığın Biçimleri Kuantum olguları, klasik özellikler üzerinden açıklanmaya direnç gösterir. Konular: Bell yerel-olmaması ve CHSH eşitsizliği; Kochen–Specker bağlamsallığı ve KCBS eşitsizliği; ontolojik modeller ve Pusey–Barrett–Rudolph teoremi. Açıklayıcı örnekler: GHZ paradoksu, KCBS beşgeni ve Mermin–Peres sihirli kare oyunu.	Bertlmann ve Friis, Kısımlar 13.1-13.2, 12.3-12.5 (sayfa 367-382, 354-366)
8	Ara Sınav (Açık Kaynak)	
9	Bölüm III – Temel Sınırlar: Ne Mümkün Değil? Her kaynağın kendine özgü sınırları vardır. Konular: Kopyalanamazlık ve yayınlanamazlık teoremleri; sinyalleşmeme ilkesi. Enformasyon kuramsal sınırlara ilişkin açıklayıcı örnekler: Erişilebilir klasik enformasyona ilişkin Holevo sınırı; veri işleme eşitsizliği ve kuantum göreli entropisinin monotonluğu.	Bertlmann ve Friis, Kısımlar 21.5 (sayfa 721-726) ya da Vedral, Kısımlar 3.1, 6.2 (sayfa 31-33, 71-73)
10	Bölüm III – Temel Sınırlar: Ne Mümkün? Fiziğin getirdiği kısıtlamalar çoğu zaman tümüyle yeni olanakların doğmasına yol açar. Konular: Kuantum kaynaklarıyla desteklenen iletişim; ölçüm bozunumu ve yerel olmayan korelasyonlara dayalı güvenli anahtar dağıtımı; katalitik kuantum durum dönüşümleri. Açıklayıcı örnekler: Kuantum uzaktarım, süper yoğun kodlama, BB84 ve E91 protokolleri ve kuantum katalizi.	Bertlmann ve Friis, Kısımlar 14.1-14.4 (sayfa 403-434) ya da Vedral, Kısımlar 4.1-4.4 (sayfa 44-52)
11	Bölüm III – Temel Sınırlar: Ön ve Son Seçilimli Enformasyon Gelecekteki ölçüm sonuçları, mevcut enformasyonu daha kesin hâle getirebilir mi? Konular: Ön- ve son-seçilim ve ABL kuralı; iki-durum-vektörü formalizmi; zayıf ölçümler ve zayıf değerler. Açıklayıcı örnekler: Üç kutu	Y. Aharonov ve D. Rohrlich, Kısımlar 16.1-16.4 (sayfa 225-235), Y. Aharonov ve L. Vaidman, Kısımlar 13.1-13.4, (sayfa 399-424)

	paradoksu, kuantum Cheshire Kedisi, etkileşimsiz ölçümün yeniden değerlendirilmesi.	
12	Bölüm IV – Kuantum Enformasyon Biliminin Geleceği: Zamansal Kuantum Enformasyon Zaman boyunca kurulan korelasyonlar bir enformasyon kaynağına dönüşebilir mi? Konular: Zamansal kuantum korelasyonları ve ardışık ölçümler; Leggett–Garg eşitsizlikleri ve zamansal Bell senaryoları; sözde-yoğunluk operatörleri ve zaman boyunca durumlar (states over time); zamansal karşılıklı enformasyon. Açıklayıcı örnekler: Leggett–Garg testleri, zamansal Bell deneyleri ve kuantum süreçleri boyunca enformasyon akışı.	Fitzsimons, J.A. Jones, V. Vedral (sayfa 1-7)
13	Bölüm IV – Kuantum Enformasyon Biliminin Geleceği: Belirsiz Nedensellik Sıralamaları Nedensel sıra, enformasyon işleme için başlı başına bir kaynağa dönüşebilir mi? Konular: Kuantum ortak-neden ve neden–sonuç ilişkileri; süreç matrisleri ve nedensel ayrılabilirlik; belirsiz nedensel sıra ve nedensel ayrılamazlık. Açıklayıcı örnekler: Kuantum anahtarı, nedensel oyunlar ve iletişim karmaşıklığı avantajları.	Oreshkov, F. Costa, C. Brukner (sayfa 1-7)
14	Bölüm IV – Kuantum Enformasyon Biliminin Geleceği: Öğrenci Sunumları Yeni ortaya çıkan bilgi işleme paradigmaları hesaplama, iletişim ve öğrenmeyi nasıl yeniden şekillendirebilir? Konular: Klasik ve kuantum bilgi kuramındaki güncel gelişmeler ve disiplinler arası uygulamalar üzerine öğrenci sunumları.	

Kadir Has Üniversitesi'nde bir dönem 14 haftadır, 15. ve 16. hafta sınav haftalarıdır.

ZORUNLU ve ÖNERİLEN OKUMALAR

1) R.A. Bertlmann ve N. Friis, Modern Quantum Theory: From Quantum Mechanics to Entanglement and Quantum Information, Springer (2021).
2) V. Vedral, Introduction to Quantum Information Science, Oxford Graduate Texts (2006)
3) Y. Aharonov ve D. Rohrlich, Quantum Paradoxes, Wiley-YCH (2005)

DİĞER KAYNAKLAR

1.G. Adesso et al. (2016). Measures and applications of quantum correlations, J. Phys. A: Math. Theor. 49(47), 473001. (doi: 10.1088/1751-8113/49/47/473001)
2. G. Torun, O. Pusuluk, ve Ö.E.Müstecaplıoğlu (2023). A compendious review of majorization-based resource theories: quantum information and quantum thermodynamics. Turk. J. Phys. 47: 141 – 182 (doi: 10.55730/1300-0101.2744)
3. Popular Article: A. Zeilinger (1998). Fundamentals of quantum information. Physics World (link: https://physicsworld.com/a/fundamentals-of-quantum-information/)
4. Y. Aharonov ve L. Vaidman (2008). The Two-State Vector Formalism: An Updated Review. Lect. Notes Phys. 734, 399–447 (doi: 10.1007/978-3-540-73473-4 13)
5. J.F. Fitzsimons, J.A. Jones, V. Vedral (2015). Quantum correlations which imply causation. Sci. Rep. 5, 18281 (doi: 10.1038/srep18281)
6. D. Horsman, C. Heunen, M.F. Pusey, J. Barrett, R.W. Spekkens (2017). Can a quantum state over time resemble a quantum state at a single time? Proc. R. Soc. A 473:20170395 (doi: 10.1098/rspa.2017.0395)
7. Seok Hyung Lie and Nelly H. Y. Ng (2024). Quantum state over time is unique. Phys. Rev. Research 6, 033144 (doi: 10.1103/PhysRevResearch.6.033144)
8. O. Oreshkov, F. Costa, C. Brukner (2012). Quantum correlations with no causal order. Nat. Commun. 3, 1092 (doi:

10.1038/ncomms2076)
9. Popular Article: N. Wolchover (2021).Quantum Mischief Rewrites the Laws of Cause and Effect. Quanta Magazine (link: https://www.quantamagazine.org/quantum-mischief-rewrites-the-laws-of-cause-and-effect-20210311/)
10. Popular Article: H. Johnston (2025). Indefinite causal order: how quantum physics is challenging our understanding of cause and effect. Physics World (link: https://physicsworld.com/a/indefinite-causal-order-how-quantum-physics-is-challenging-our-understanding-of-cause-and-effect/)

DEĞERLENDİRME SİSTEMİ

Yarıyıl İçi Çalışmaları	Sayı	Katkı Payı (%)
Katılım	14	10
Proje	1	20
Ödev	2	10
Sunum/Jüri	1	20
Dersle İlgili Sınıf Dışı Etkinlikler (okuma, bireysel çalışma vb.)	14	-
Ara Sınavlar/Sözlü Sınavlar/Kısa Sınavlar	3	40
Total:	**35**	**100**

İŞ YÜKÜ HESAPLAMASI

Etkinlikler	Sayısı	Süresi (saat)	Toplam İş Yükü (saat)
Ders Saati	14	3	42
Proje	1	12	12
Ödev	2	6	12
Sunum/Jüriye Hazırlık	1	10	10
Dersle İlgili Sınıf Dışı Etkinlikler	14	2	28
Ara Sınavlar/Sözlü Sınavlar/Kısa Sınavlar	3	7	21
Toplam İş Yükü (saat):			**125**

1 AKTS = 25 saatlik iş yükü

PROGRAM YETERLİLİKLERİ (PY) ve ÖĞRENME ÇIKTILARI (ÖÇ) İLİŞKİSİ

#	PY1	PY2	PY3	PY4	PY5	PY6	PY7	PY8	PY9	PY10	PY11
OC1											
OC2											
OC3											
OC4											
OC5											
OC6											
OC7											

OC8											
OC9											
OC10											

Katkı Düzeyi: 1 Düşük, 2 Orta, 3 Yüksek