Mevduattan CBDC ve nakde kaçışta muhasebe sınırları ve geri besleme kanalları: CBDC-SPAR NetLogo modeli v0.2 ile kilitli tasarımlı mekanizma deneyleri

Tarık İsmet Alkan · Harun Kınacı

Ankara Yıldırım Beyazıt Üniversitesi, Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu

Çalışma metni, 13 Ekim 2026. Hakemli gönderime hazır değildir; yazar sırası ve katkı beyanları yazarlarca kesinleştirilecektir.

Öz

Bu çalışma, CBDC-SPAR banka hücumu prototipinin v0.1 sürümünde sonuçların ne kadarının muhasebe ve işlem kısıtlarından, ne kadarının ajan etkileşiminden geldiğini ayırmak için yeniden yazılmış v0.2 modelini ve kilitli bir deney tasarımını raporlar. Önce özgün 320 koşu native NetLogo 7.0.4 ile alan düzeyinde birebir yeniden üretilmiştir. v0.2'de servet, ağ, banka etiketi ve koşu için ayrı rastgele sayı akışları, ağdan bağımsız banka ataması, ayrı nakit işlem büyüklüğü ve kotası, CBDC cazibesinin araç seçimi ve kaçış eğilimi için ayrı anahtarlar, her adımda bilanço denetimi ve kesin sabit nokta durdurması vardır. Beş deney ailesinde 158.410 koşu yürütülmüş, tasarımdaki 52 dilimin tamamı tamamlanmış, hiçbir koşuda denetim ihlali görülmemiştir. Bireysel karar eşiklerinden ve rezerv tavanından türetilen analitik kıyas, harekete geçme eşiğini (kriz şiddeti 0,35 ile 0,36 arası) tam olarak, ilk banka stresi eşiğini ise yaklaşık 0,40 düzeyinde açıklar. Sosyal bulaşma ilk stres eşiğini tohum düzeyinde −0,030 [−0,031; −0,028] kadar kaydırır; banka stresi geri beslemesi ilk stresi tanımı gereği değiştiremez, tam rezerv tükenmesini ise öne çeker. İki kanal birlikte tam tükenme eşiğini nakit kanalında −0,123 [−0,126; −0,119] (n=99/100), CBDC kanalında −0,120 [−0,123; −0,117] kadar düşürür. Hizmet sırası halka konumundan ayrıldığında (kilit sonrası keşifsel ek deney) nakit kanalındaki bu kaymalar ilk streste −0,013 [−0,015; −0,012], tam tükenmede −0,053 [−0,056; −0,050] (n=99/100) düzeyine iner; CBDC kanalında sosyal bulaşmanın 120 adımlık stres eşiğini öne çekmesi (−0,093 [−0,095; −0,091]) korunur. Zamanlamayı en çok nakit kotası belirler; yalnız nakit senaryosunda 120 adımda banka stresi işlem kapasitesi nedeniyle olanaksızdır. Homofili ailesinde bitişik banka bloklarının sonucu, hizmet sırasının halka konumuna bağlı olmasından doğan bir model yapıntısıyla karışmıştır; rastgele hizmet sırasıyla homofili eşikleri belirgin biçimde değiştirmemiştir. Sonuçlar sentetik ve kalibre edilmemiştir; davranışsal katkı parametreye bağlı ve küçüktür. Çalışma bir mekanizma denetimi olarak değerlidir, politika sonucu üretmez ve bu haliyle hakemli dergi gönderimi için yeterli özgün katkı göstermez.

Anahtar kelimeler: merkez bankası dijital parası; banka hücumu; ajan tabanlı model; eşik modeli; mekanizma denetimi; NetLogo; yeniden üretilebilirlik

Abstract

We re-implement the CBDC-SPAR bank-run prototype as a research model (v0.2) and run a locked design to separate accounting and transaction constraints from agent interaction. The original 320 runs are reproduced field by field in native NetLogo 7.0.4. Across five experiment families, 158,410 runs completed with zero balance-sheet violations. An analytical benchmark built from individual thresholds and the reserve ceiling explains the activation threshold exactly and the first bank-stress threshold (about 0.40) closely. Social contagion lowers the first-stress threshold by about 0.03 in crisis intensity; bank-stress feedback cannot affect first stress by construction but advances full reserve exhaustion; together they lower the full-exhaustion threshold by about 0.12 (cash only) and 0.12 (with CBDC). In a post hoc exploratory

experiment with a service order independent of network position, the cash-channel shifts shrink to about 0.01 and 0.05, whereas the CBDC-channel timing effect of contagion (about 0.09 at 120 steps) persists. Cash quotas dominate timing. Results for contiguous bank blocks were confounded by a service-order artefact; with random service order, homophily leaves thresholds essentially unchanged. The model is synthetic and uncalibrated; its behavioural contribution is modest and parameter dependent, and it is not yet sufficient for journal submission.

1 Giriş

Dijital paranın banka mevduatından merkez bankası parasına geçişi kolaylaştırması, banka hücumu tartışmalarında önemli bir tasarım sorusudur. Ancak bir simülasyonda CBDC bulunan ve bulunmayan senaryoların farklı sonuç vermesi, bu farkın CBDC'nin özgül etkisi olduğunu kendiliğinden göstermez. Aynı karşılaştırmada aktarım hızı, nakit işlem kapasitesi, davranışsal cazibe ve likiditeye erişim birlikte değişiyorsa, gözlenen fark birden çok mekanizmanın bileşimidir.

CBDC-SPAR prototipinin v0.1 sürümü için yapılan önceki denetim, kırk hücrede sekiz eşleştirilmiş başlangıçla yürütülen 320 koşuyu inceledi. Bu koşuları native NetLogo 7.0.4 ile yeniden ürettik: 320 koşunun bütün alanları arşivle dizgi düzeyinde aynıdır. Çıktıların 96 tanesi sıfır, 136 tanesi yüzde 20 rezerv tavanında, 88 tanesi ara değerdedir; uç payı %72,5. Negatif kontrolün 32 karşılaştırmasının 16 tanesi iki tarafta sıfır, 16 tanesi iki tarafta tavandadır; bu nedenle davranış bulgusu değil kod özdeşliği denetimidir. Banka ataması hane sırasından türediği için halka ağındaki komşular sistematik olarak farklı bankalardadır: aynı bankalı bağ payı tohuma göre 0,009 ile 0,018 arasında değişir; ortalaması 0,0146. Eşit sürtünme müdahalesi nakit hızını ve kotasını birlikte değiştirmiştir.

Bu çalışmanın sorusu şudur: yalnız rezerv ve işlem kısıtlarının açıkladığı davranıştan sonra, bağımsız banka ataması ve sosyal bulaşma çıkışın zamanlaması, araç bileşimi ve kriz eşiği üzerinde ne fark yaratır? CBDC cazibesinin araç seçimine etkisi ile kaçış kararına eklenmesi ayrı müdahaleler olarak ele alınır. Merkez bankası likiditesinin yokluğu gerçek sistemin değişmez özelliği sayılmaz; v0.2'nin bilinçli kapsam sınırıdır.

Katkımızı dar tutuyoruz. Birincisi, yeniden üretilebilir ve denetlenebilir bir v0.2 modeli ve kilitli bir deney tasarımı sunuyoruz. İkincisi, her sonucu analitik bir bireysel kıyasla karşılaştırarak modelin neyi muhasebe ve karar kuralı gereği zorunlu olarak ürettiğini, neyi etkileşimle eklediğini ayırıyoruz. Üçüncüsü, bulunan yapıntıları ve boş sonuçları saklamadan raporluyoruz. Bunlar bir mekanizma denetiminin katkılarıdır; kalibre edilmiş bir politika modeli iddiası değildir.

2 İlgili çalışmalar

Barucci, Gurgone, Iori ve Azzone (2025, arXiv:2510.21071 v2), firmalar, bankalar ve hanelerin emek, mal, kredi ve bankalar arası piyasalarda etkileştiği makroekonomik bir ajan tabanlı modelde CBDC ve kaliteye kaçışı inceler. Hanelerin CBDC'ye dönüşümü bankalarının kaldıraç temelli risk ölçüsüne bağlıdır (Denk. 5 ve 6); beş dönüşüm kuralı Denk. (41) ile (45) arasında tanımlanır. Tam metinde haneler arası etkileşim, komşu etkisi veya taklit tanımlanmaz. Bölüm 2.4.1 bankanın merkez bankasından likidite alamadığını varsayar ve Bölüm 2.4.5'teki dipnot marjinal borç verme olanağına erişimi dışlar; buna karşın likidite açığı bankalar arası borçlanma (Denk. 29) ve varlık satışıyla (Denk. 37) karşılanabilir. Bu nedenle "merkez bankası desteği yok" ifadesi bu çalışma için "merkez bankası kredi olanağı yok, bankalar arası piyasa ve varlık satışı var" biçiminde daraltılmalıdır. Bölüm 4'e göre ağ yapısı ve rastgele tohum bütün simülasyonlarda sabittir.

Bidder, Jackson ve Rottner (2025, BIS Working Paper 1280), Bundesbank Tüketici Beklentileri Anketi'nin Nisan 2023 dalgasını (yaklaşık 5.700 katılımcı) Diamond ve Dybvig (1983) türü, güneş lekesiyle seçilen sistemik hücumlar içeren bir makro modelle birleştirir. Model temsili haneye dayanır (Bölüm 3.1; Bölüm 6.1 hane heterojenliğini soyutlar), akranlar arası bulaşma içermez ve son ödünç

verici olarak merkez bankası kredisi tanımlamaz; CBDC gelirleri firma menkul kıymetlerine yatırılır (Denk. 25). Temel kalibrasyonda optimal elde tutma limiti yaklaşık 1.750 avrodur (Bölüm 6.1).

Keister ve Monnet (2022), CBDC seçeneğinin zayıf bankalara hücum güdüsünü artırabileceğini, ancak daha az vade dönüşümü ve CBDC'ye akışların izlenmesiyle zayıf bankaların daha erken çözümlenmesi sayesinde kırılganlığın azalabileceğini gösterir. Bizim modelimizde politika tepkisi ve bilgi kanalı yoktur; bu fark sonuçların yorumunu sınırlar. Iyer ve Puri (2012), bir banka hücumunda sigortasız mudilerin daha çok kaçtığını, banka-mudi ilişkisinin kaçışı azalttığını ve sosyal ağların önemli olduğunu mudi düzeyinde veriyle gösterir; bu, modeldeki komşu sinyalinin gerekçesidir, büyüklüğünün kalibrasyonu değildir. Karar kuralı Granovetter (1978) eşik modelleri ailesindendir; ağ üzerindeki kaskad koşulları Watts (2002) ile tartışılmıştır. Model açıklaması ODD protokolünü izler (Grimm ve ark., 2020).

Bu çalışma yukarıdaki modellerin yeniden uygulaması değildir. Daha dar amacı, küçük bir prototipte çıktının hangi kısmının önceden konmuş muhasebe ve hizmet kurallarından, hangi kısmının etkileşimden geldiğini ayırmaktır.

3 Model v0.2

3.1 Yapı ve karar kuralı

Model 500 hane ve 4 bankadan oluşur. Hane başlangıç mevduatı U(80; 120), panik eşiği θ U(0,35; 0,80) dağılımından çekilir; dört temsili algı puanı da U(0; 1) dağılımından çekilir. Her banka rezerv R, sabit kredi L ve mevduat D tutar; başlangıçta R = ρD ve R + L = D eşitlikleri sağlanır. Merkez bankası örtük olarak rezerv, CBDC ve nakit yükümlülüklerini taşır. Kriz haberi 10. adımdan sonra etkindir.

Her adımda hanenin kaçış eğilimi, kriz şiddeti κ, önceki adımda gerçekten transfer yapan komşu payı (ağırlık: sosyal etki) ve bankası önceki adımda stresliyse banka stresi sinyalinin toplamıdır. Eğilim panik eşiğini aşarsa hane, CBDC kanalı açık ve limitte yer varsa CBDC'ye, aksi halde nakde çevirir. Talep: CBDC için min(0,08d; 10) ve kalan limit; nakit için yavaş min(0,02d; 3) veya hızlı min(0,08d; 10). Gerçekleşen tutar banka rezerviyle sınırlıdır; nakit kotası açıksa banka başına adımda en çok 4 nakit işlemi yapılır. Banka, rezerv < 0,08 × mevduat olduğunda stresli sayılır.

Kararlar yalnız önceki adımın durumuna dayandığı için hesaplama sırası sonucu değiştirmez. Hizmet, başlangıç noktası her adım bir hane kayan deterministik sırayla verilir; v0.2.0'da bu sıra hane indeksidir ve indeks aynı zamanda halka ağındaki konumdur. Bu ayrıntı Bölüm 7.2'de bir yapıntının kaynağı olarak yeniden ele alınır.

3.2 v0.1'e göre değişiklikler

- Ayrı rastgele sayı akışları: oluşturma, nüfus (servet, eşik, puanlar), ağ ve banka etiketi için ayrı tohumlar; dinamik adımlar ana akışı tüketmez. Koşu sonu RNG izi, kurulum iziyle bütün koşularda aynıdır.
- Ağdan bağımsız banka ataması: sabit topoloji üzerinde homofili parametresi h ile etiket ataması. h = 0 dengeli etiketlerin rastgele permütasyonu, h = 1 halka üzerinde bitişik bloklardır. v0.1'deki döngüsel atama yalnız karşılaştırma içindir.
- Nakit işlem büyüklüğü ve nakit kotası iki ayrı faktördür.
- CBDC cazibesinin araç seçimindeki etkisi ile kaçış eğilimine eklenmesi iki ayrı anahtardır. Limit 0 CBDC kanalını kapatır; limitte kalan pay kanal kapalıyken tanımsız sayılır (v0.1'de bu durumda bütün haneler limitte görünüyordu).
- Banka stresi sinyali ve sosyal etki 2 × 2 mekanizma tasarımında ayrı ayrı sıfırlanabilir (M0: ikisi kapalı, M1: yalnız banka stresi, M2: yalnız sosyal, M3: ikisi açık).

- Her adımda hane serveti, merkez bankası yükümlülükleri, banka bilançosu (mevduat hanelerden yeniden toplanarak), transfer-rezerv uyumu, negatif bakiye, limit, kapalı kanal ve kota denetimi. Toleranslar başlangıç servetine göre ölçeklidir (Bölüm 3.4).
- Karşılanamayan talep üç ayrı ölçüdür: adımlık akış, tekrarlı kümülatif toplam ve hâlâ kaçmak isteyen hanelerin mevduatı (tekil stok).
- Kesin sabit nokta durdurması: kriz başlamışken art arda iki adımda hiç transfer yoksa durum değişmez; ileri kontrol noktaları mevcut durumdan doldurulur. Bu kuralın sonuçları değiştirmediği testle gösterilmiştir.

3.3 Analitik önermeler

Önerme 1 (harekete geçme). Cazibe kaçış eğilimine eklenmiyorsa ve $\kappa \le \min \theta = 0{,}35$ ise kriz başladığında hiçbir hanenin eğilimi eşiği aşmaz; önceki adımda transfer ve stres olmadığından komşu ve banka sinyalleri sıfırdır. Tümevarımla çıkış her adımda tam sıfırdır.

Önerme 2 (rezerv tavanı). Her transfer bankanın rezervini birebir azalttığı ve gerçekleşen tutar mevcut rezervle sınırlı olduğu için banka b'nin toplam çıkışı ρD_b'yi, sistem çıkışı ρW_0'ı aşamaz.

Önerme 3 (stres muhasebe eşiği). Kümülatif çıkış x olduğunda $R = \rho D_0 - x$ ve $D = D_0 - x$ olur; $R < sD$ koşulu $x > (\rho - s)D_0/(1 - s)$ eşdeğeridir. $\rho = 0{,}20$ ve $s = 0{,}08$ için eşik banka mevduatının yüzde 13,04'üdür. $\rho < s$ ise banka hiç çıkış olmadan ilk adımda stresli görünür.

Önerme 4 (bireysel kıyas). Sosyal etki ve banka stresi sinyali kapalıyken sonsuz ufukta hane i'nin talebi, $\theta_i < \kappa$ ise mevduatının tamamıdır (cazibe kaçışa ekliyse CBDC hedefi sürerken eşik κ + net cazibe ile, limit dolunca κ ile karşılaştırılır). Banka b'nin çıkışı $\min(\rho D_b, \Sigma \text{ talep})$ olur. Bu kıyas her koşu için başlangıç durumundan hesaplanır; sonlu ufuk ve işlem kapasitesi bu değeri yalnız aşağı çeker.

Önerme 5 (işlem kapasitesi). Yalnız nakit senaryosunda (yavaş büyüklük, kota 4) bir banka 120. adıma kadar en çok $4 \times 2{,}4 \times 110 = 1.056$ birim çıkış verebilir. $\rho = 0{,}20$ olan bütün koşularda (bütün banka atamaları dahil) en küçük banka mevduatı 12.122 birim olduğundan stres için gereken çıkış en az 1.581 birimdir. Bu nedenle $\rho = 0{,}20$ iken bu senaryoda 120. adımda banka stresi olanaksızdır.

3.4 Kayan nokta toleransları

Başlangıç serveti yaklaşık 50.000 model birimidir. Toplam denetimleri $10^{-10} \times W_0$ (yaklaşık 5×10^{-6} birim), bireysel bakiye denetimleri 10^{-9} birim tolerans kullanır. 480 adımda en fazla yaklaşık 7×10^5 bakiye güncellemesi ve 504 terimli toplamlar için en kötü yuvarlama sınırı 10^{-7} birim mertebesindedir; tolerans bunun yaklaşık 50 katı, en küçük gerçek transferin (yavaş nakitte 1,6 birim) ise milyonda birkaçıdır. Gerçek bir muhasebe hatası bu toleransla gizlenemez.

4 Deney tasarımı

Amaçlar, olaylar, ölçüler, faktörler, tohum listesi, ufuklar, sansür, analiz ve durdurma kuralları sonuçlar görülmeden önce design-v02.json dosyasında sabitlendi ve 2026-10-13 15:19:13 UTC tarihinde SHA-256 özetiyle kilitlendi (özet 08f71bb7d77a…). Bu yerel bir kayıttır, kamuya açık ön kayıt değildir. Kilitten önce model geliştirme sırasında zamanlama amacıyla ana tohum numaralarıyla az sayıda teknik koşu yapıldığı kilit dosyasında açıkça beyan edilmiştir; bu koşular tasarım kararlarında kullanılmamıştır.

Kriz şiddeti 0,30 ile 0,60 arasında 0,01 adımla (31 değer) taranır. Her koşu 480 adıma kadar sürer; 120. adım durumu aynı koşudan kaydedilir. Ana senaryo $\rho = 0{,}20$'dir; $\rho = 0{,}10$ ve 0,30 ayrı sağlamlık kolundadır. Ana hücrelerde 100 eşleştirilmiş tohum (1 ile 100) kullanılır. Aynı tohum bütün müdahalelerde aynı servet, eşik ve ağı verir; banka etiketleri yalnız atama kuralıyla değişir.

Tablo 1. Deney aileleri ve tamamlama durumu

Aile	Amaç ve faktörler	Dilim	Beklenen koşu	Gözlenen koşu	Tam dilim
A	Ana mekanizma karşılaştırması: M0-M3 × yalnız nakit (I0) / CBDC limit 20 (I1), h = 0	8	24.800	24.800	8/8
B	Ağ ve homofili: eski döngüsel atama, h = 0,5, h = 1 × M2/M3 (M1 kontrol: eski ve h = 1)	16	49.600	49.600	16/16
C	Sürtünme ayrıştırması: nakit büyüklüğü × nakit kotası, M3 (M0 öncelik 2)	12	37.200	37.200	12/12
D	CBDC tasarımı: cazibe seçimde/kaçışta, limit 0/10/20/50, M3	8	22.010	22.010	8/8
E	Rezerv sağlamlığı: ρ = 0,10 ve 0,30, M0/M3, I0/I1	8	24.800	24.800	8/8
Toplam		52	158.410	158.410	52/52

Her dilim: 31 kriz değeri × 100 tohum (D ailesindeki limit 0 doğrulama dilimi: 10 tohum). Tamamlama tablosunun dilim düzeyi sürümü depoda tablolar/tamamlama.csv dosyasındadır.

Olaylar ayrı tanımlanır: (i) en az bir bankada stres; (ii) en az bir bankanın rezervinin tükenmesi; (iii) bütün rezervlerin tükenmesi (sistem çıkışı tavanda); (iv) çıkışın 0,10'u aşması; (v) herhangi bir çıkış. Birincil olaylar ilk stres ve tam tükenmedir. Olay zamanları 120 ve 480 adımda sağdan sansürlüdür; olay olmayan koşular ortalamadan atılmaz. Olasılıklar için Wilson %95 aralığı, ortalamalar için Monte Carlo standart hatası, müdahale farkları için aynı tohum ve kriz değerinde eşleştirilmiş farklar kullanılır.

Kriz eşiği iki biçimde raporlanır. Hücre düzeyinde κ50 yalnız olay olasılığı ızgarada 0,5'i gerçekten kesiyorsa, $p < 0{,}5$ olan en büyük ve $p \geq 0{,}5$ olan en küçük komşu ızgara değerleri aralığı olarak verilir; aralık dışına enterpolasyon yapılmaz. Tohum düzeyinde ise her tohum için olayın görüldüğü en küçük kriz değeri hesaplanır (0,30'da olay varsa soldan, 0,60'a kadar yoksa sağdan sansürlü) ve iki müdahale arasındaki fark aynı tohumda alınır. Hücre başına n = 100, olay olasılıkları için Wilson yarı genişliğini en kötü durumda yaklaşık 0,10 ile sınırladığından önceden belirlenen hassasiyet hedefi uyarlamalı ek tekrar gerektirmemiştir. Keyfi bir etki büyüklüğü veya anlamlılık eşiğiyle sonuç seçilmemiştir.

Teknik pilot ana tohumlardan ayrı 9001 ile 9010 tohumlarıyla yapıldı (5.560 koşu, denetim ihlali 0). Koşular iki makinede yürütüldü: bulut kapsayıcısı (Linux x86_64, OpenJDK 21, 2 iş parçacığı) ve kullanıcının bilgisayarındaki Linux sanal makinesi (aarch64, OpenJDK 11, 4 iş parçacığı). Pilotta aynı 70 koşu iki platformda bütün alanlarda aynı çıktıyı verdi. Ana ailelerin toplam iş süresi bulutta 2,2 saat, sanal makinede 1,8 saattir.

5 Doğrulama

Tablo 2. Doğrulama testleri (test tohumları 8001-8020; v0.1 regresyonu tohum 1-8)

Test	Kapsam	Sonuç	Durum
T1	$\kappa \in \{0; 0{,}2; 0{,}34\}$, cazibe kaçıştan ayrık, bütün sinyaller açık	60 koşunun 0 tanesinde hareket; azami |çıkış| 0,0	geçti
T2	Sosyal etki 0 iken yalnız ağ tohumu değişir	60 grup, fark 0	geçti
T3	Limit 0 ile CBDC kapalı	60 grup, fark 0	geçti
T4	Erken durdurma açık/kapalı	100 grup, fark 0; ortalama adım 312 / 480	geçti
T5	v0.2 kodu v0.1 kurulumuyla 320 arşiv koşusu (ufuk ve erken durdurma iki değerli)	640 koşu; ayrık ölçütlerde uyumsuzluk yok; azami sürekli fark $5{,}0 \times 10^{-13}$	geçti
T6	M0, hızlı ve kotasız nakit: simülasyon = analitik kıyas	azami fark $5{,}0 \times 10^{-13}$; stresli banka sayısı her koşuda aynı	geçti
T7	$\rho = 0{,}05 < s = 0{,}08$	ilk stres adımı 1; kaçışa ekli cazibeyle kriz olmadan çıkış 3/5 koşu	yapıntı gösterildi

Test	Kapsam	Sonuç	Durum
T8	Homofili parametresi ve gerçekleşen aynı bankalı bağ payı	döngüsel: 0,011; h=0: 0,243; h=0,25: 0,289; h=0,5: 0,425; h=0,75: 0,645; h=1: 0,954	ölçüldü
v0.2.1	Hizmet sırası seçeneği: varsayılan sırada T2, T4, T5 ve T6 yeniden koşuldu; rastgele sırada erken durdurma (T10) ve limit 0 (T11)	1.320 koşuda 83.160 hücre v0.2.0 ile dizgi düzeyinde aynı (fark 0); T10 100 grup, T11 60 grup, fark 0	geçti

Bütün ana ve ek koşularda denetim ihlali sayısı 0, koşu içinde ana rastgele sayı akışını tüketen koşu sayısı 0. Aynı tohum bütün dilimlerde aynı başlangıç izini ve aynı ağ izini vermiştir (100/100 tohum). Böylece "eşleştirilmiş başlangıç durumu" ve "ortak dışsal rastgelelik" iddiaları v0.2 için ayrı ayrı doğrulanmıştır: dinamik adımlarda rastgele sayı kullanılmadığından ikisi örtüşür. v0.1'de ise ask ve of komutları ana akıştan sayı tüketir; bu tüketim karar sonucunu değil yalnız kayan nokta toplama sırasını etkiler.

6 Bulgular: ana mekanizma ailesi (A)

6.1 Harekete geçme ve sıfır bölgesi

A ailesindeki 24.800 koşunun 4.800 tanesinde çıkış tam sıfırdır ve bunların tamamı $\kappa \leq 0{,}35$ olan hücrelerdedir; $\kappa = 0{,}36$'dan itibaren bütün koşularda çıkış vardır. Bu, Önerme 1'in ve eşik dağılımının alt sınırının doğrudan sonucudur; dört mekanizmanın hiçbiri bu sınırı değiştirmez (Tablo 3, herhangi bir çıkış satırı). Sosyal bulaşma ve banka stresi, ancak bireysel olarak harekete geçen haneler varsa devreye girebilir.

6.2 İlk banka stresi ve tam rezerv tükenmesi

Analitik bireysel kıyas, tohum başına ilk stres eşiğini ortalama 0,40 (aralık 0,38 ile 0,42), bütün rezervlerin tükenme eşiğini ortalama 0,46 olarak verir. M0 simülasyonu bu kıyası hiçbir koşuda aşmaz; 480 adımda stres olayında kıyasla uyum yalnız nakit senaryosunda %95,6, CBDC senaryosunda %97,2 düzeyindedir ve uyumsuzlukların tamamı kıyasın öngördüğü stresin sonlu ufukta henüz görülmediği koşulardır.

Banka stresi geri beslemesi (M1) ilk stres eşiğini hiçbir tohumda değiştirmez: 0 (100/100 tohumda aynı). Bu boş sonuç bir bulgu değil tanımın sonucudur: geri besleme ancak bir banka stresli olduktan sonra eğilime eklenir. Sosyal bulaşma (M2) ilk stres eşiğini yalnız nakit senaryosunda −0,030 [−0,031; −0,028] (n=100), CBDC senaryosunda −0,029 [−0,030; −0,027] (n=100) kadar düşürür; M3 ile M2 arasındaki fark yine sıfırdır. Bu kaymaların nakit kanalındaki büyüklüğü hizmet sırası kuralına duyarlıdır (Bölüm 7.6).

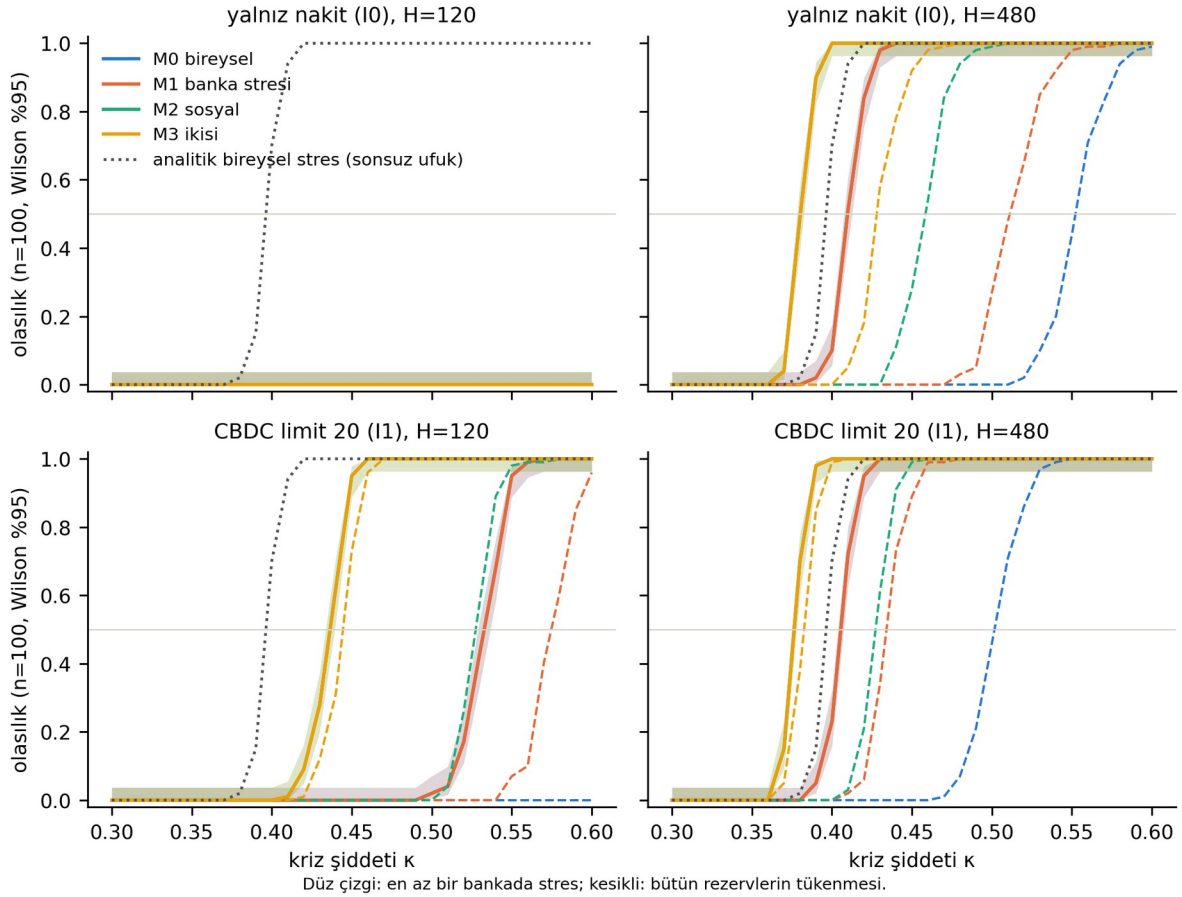
Tam tükenmede iki kanalın da katkısı vardır. Yalnız nakit senaryosunda tohum düzeyinde kayma M1 için −0,040 [−0,043; −0,037] (n=99/100), M2 için −0,095 [−0,097; −0,092] (n=99/100), M3 için −0,123 [−0,126; −0,119] (n=99/100); CBDC senaryosunda sırasıyla −0,067 [−0,070; −0,065] (n=100), −0,075 [−0,077; −0,072] (n=100) ve −0,120 [−0,123; −0,117] (n=100). Köşeli parantezler tohumlar arası %95 güven aralığıdır.

Tablo 3. A ailesinde κ50: olay olasılığının 0,5'i kestiği komşu ızgara aralığı

Hücre	Herhangi çıkış H=480	Stres H=120	Stres H=480	Tam tükenme H=120	Tam tükenme H=480
I0 M0	(0,35; 0,36]	>0,60	(0,40; 0,41]	>0,60	(0,55; 0,56]
I0 M1	(0,35; 0,36]	>0,60	(0,40; 0,41]	>0,60	(0,51; 0,52]
I0 M2	(0,35; 0,36]	>0,60	(0,38; 0,39]	>0,60	(0,45; 0,46]
I0 M3	(0,35; 0,36]	>0,60	(0,38; 0,39]	>0,60	(0,42; 0,43]
I1 M0	(0,35; 0,36]	(0,53; 0,54]	(0,40; 0,41]	>0,60	(0,50; 0,51]

Hücre	Herhangi çıkış H=480	Stres H=120	Stres H=480	Tam tükenme H=120	Tam tükenme H=480
I1 M1	(0,35; 0,36]	(0,53; 0,54]	(0,40; 0,41]	(0,57; 0,58]	(0,43; 0,44]
I1 M2	(0,35; 0,36]	(0,43; 0,44]	(0,37; 0,38]	(0,52; 0,53]	(0,42; 0,43]
I1 M3	(0,35; 0,36]	(0,43; 0,44]	(0,37; 0,38]	(0,44; 0,45]	(0,38; 0,39]
Analitik (sonsuz ufuk)	(0,35; 0,36]		ort. 0,40		ort. 0,46

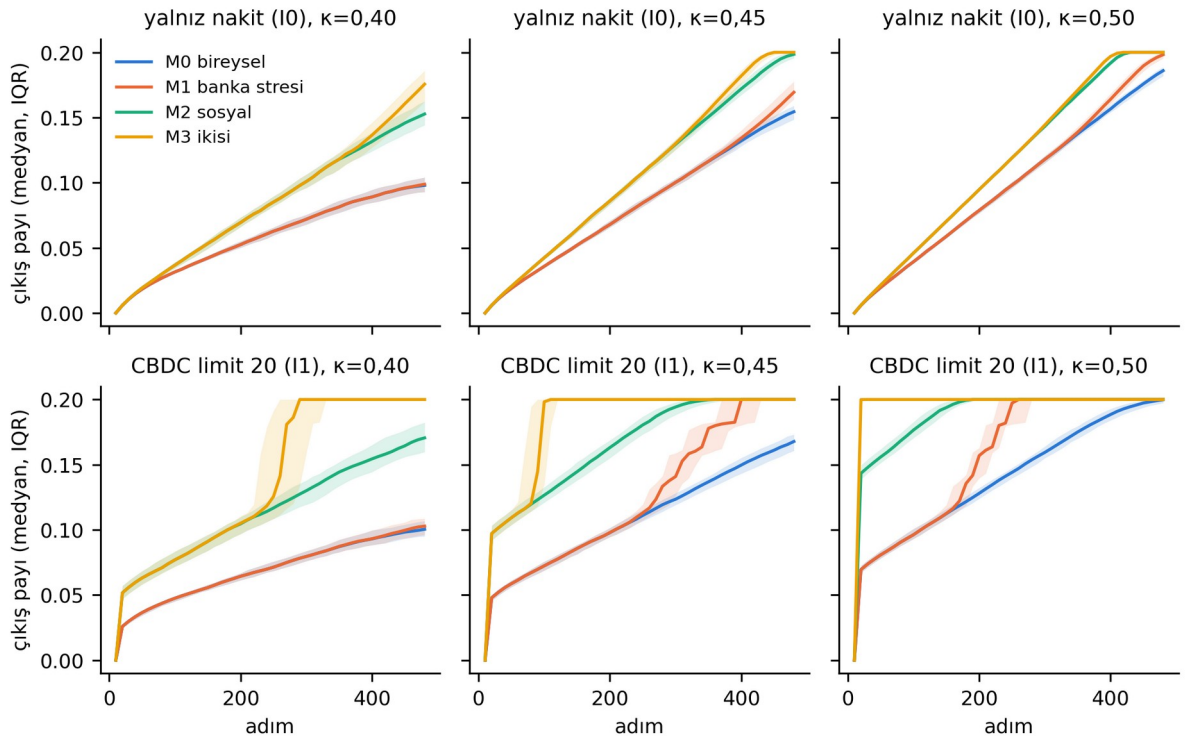
>0,60: olasılık taranan aralıkta 0,5'e ulaşmıyor. Analitik satırı tohum başına bireysel eşiklerin ortalamasıdır; hücre κ50'si değildir.



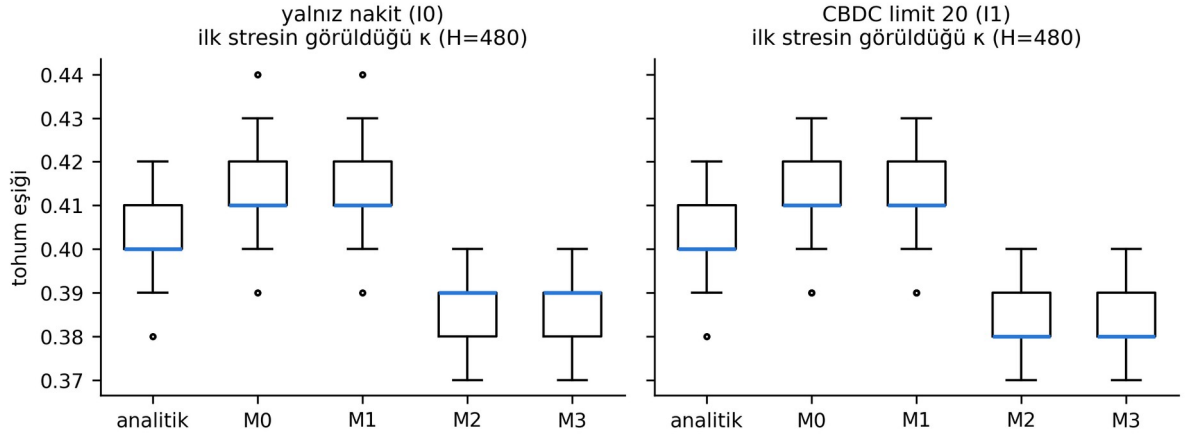
Şekil 1. A ailesi: en az bir bankada stres (düz) ve bütün rezervlerin tükenmesi (kesikli) olasılıkları, 100 tohum, Wilson %95 bantları. Noktalı gri çizgi analitik bireysel stres olasılığıdır (sonsuz ufuk).

6.3 Zamanlama ve işlem kapasitesi

Yalnız nakit senaryosunda 120 adımda stres hiçbir mekanizmada, hiçbir kriz değerinde görülmez (Tablo 3). Bu bir davranış sonucu değildir; Önerme 5'teki kapasite sınırı (1.056 birim) gerekli çıkıştan küçüktür. CBDC kanalı açıkken aynı ufukta stres eşiği M0 ve M1 için (0,53; 0,54], sosyal bulaşmayla (0,43; 0,44] aralığındadır; tohum düzeyinde kayma −0,097 [−0,099; −0,095] (n=100). Yani sosyal bulaşmanın en büyük etkisi uzun ufuk eşiğinde değil, CBDC'nin hızlı kanalı üzerinden zamanlamadadır. Şekil 3 seçili üç kriz değerinde çıkış yollarını gösterir.



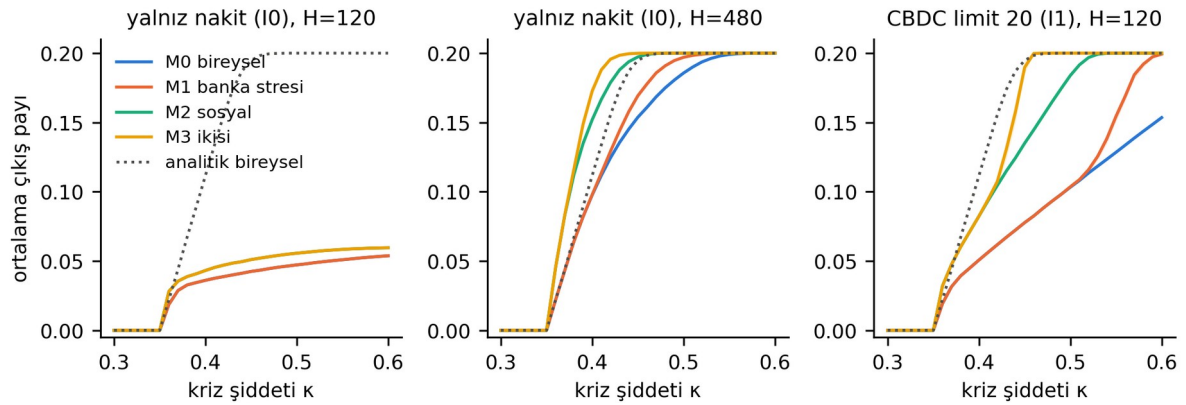
Şekil 3. A ailesi: 10 adımlık aralıklarla çıkış payının tohumlar arası medyanı ve çeyrekler arası bandı. Kriz değerleri (0,40; 0,45; 0,50) analiz öncesinde seçilmiştir.



Şekil 4. A ailesi: tohum başına ilk stresin görüldüğü kriz değeri (H = 480) ve analitik bireysel eşik. Sansürlü tohumlar kutu grafiğine girmez.

6.4 Çıkış düzeyi ve araç bileşimi

Ortalama çıkış ve CBDC payı Şekil 2'de verilmiştir. CBDC senaryosunda çıkış içinde CBDC payı κ ve geri beslemeyle artar; örneğin κ = 0,50 için 480 adımda M0'da %33,5, M3'te %98,4. Bu bileşimin bir kısmı parametre seçiminden gelir: hane başına limit 20 ile 500 hane çarpıldığında toplam CBDC kapasitesi (10.000 birim) başlangıç rezervine (yaklaşık ρW_0 = 10.000 birim) eşittir. Aynı tavana ulaşan iki koşu aynı dinamiği izlemez: tavana ulaşma zamanının medyanı aynı κ = 0,50 hücresinde yalnız nakit M3'te 415 adım, CBDC M3'te 21 adımdır.



Şekil 2. A ailesi: ortalama çıkış (başlangıç servetine oran) ve 1,96 × Monte Carlo standart hata bandı. Noktalı gri çizgi analitik bireysel kıyastır.

6.5 Karşılanamayan talep

Rezerv tükendikten sonra kaçmak isteyen haneler her adım yeniden talep eder. Bu nedenle tekrarlı kümülatif karşılanamayan talep ufukla büyür ve tutar olarak yorumlanamaz: κ = 0,60 ve M1'de, yalnız nakit senaryosunda 480 adımda başlangıç servetinin 5,7 katına ulaşır. Tekil stok, yani hâlâ kaçmak isteyen hanelerin bankada kalan mevduatı aynı hücrede servetin %80,0 kadarıdır. Üç ölçü (adımlık akış, tekrarlı toplam ve tekil stok) ayrı raporlanmalıdır.

6.6 Uç sonuç payı

Tablo 4. Sıfır, tavan ve ara sonuçlar: v0.1 denetimi ve v0.2 A ailesi

Veri	Koşu	Sıfır	Tavan	Ara	Uç payı
v0.1, 320 koşu (iki ufuk birlikte)	320	96	136	88	%72,5
v0.2 A, H = 120	24.800	4.800	2.685	17.315	%30,2
v0.2 A, H = 480	24.800	4.800	11.390	8.610	%65,3

Tavan: bütün banka rezervlerinin tükenmesi (sistem çıkışı ρ). v0.2'de sıfır sonuçların tamamı κ ≤ 0,35 hücrelerindedir.

7 Bulgular: ikincil aileler

7.1 Eski döngüsel atama ile bağımsız atama (B)

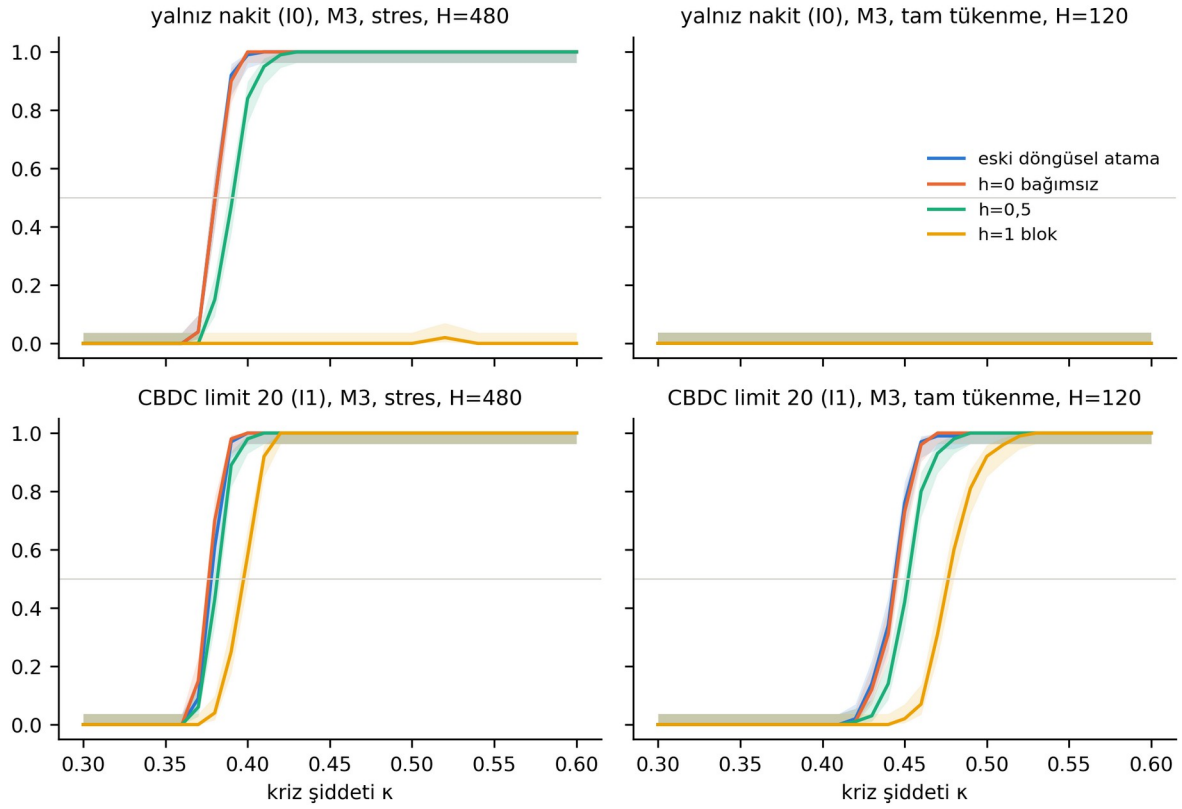
Gerçekleşen aynı bankalı bağ payı eski döngüsel atamada ortalama 0,013, bağımsız atamada (h = 0) 0,248, h = 0,5'te 0,424, h = 1'de 0,951; parametre gerçekleşen paya eşit değildir. Topoloji bütün atamalarda aynıdır (derece 2 ile 7 arası, tek bileşen).

v0.1'deki döngüsel atama komşuları sistematik olarak farklı bankalara yerleştiriyordu. Bu atamanın bağımsız atamaya göre etkisi küçüktür: M3 ve yalnız nakit senaryosunda ilk stres eşiğindeki kayma 0,000 [−0,001; +0,001] (n=100), tam tükenmede −0,011 [−0,013; −0,009] (n=100); CBDC senaryosunda +0,002 [0,000; +0,003] (n=100) ve −0,001 [−0,002; 0,000] (n=100). Önceki denetimde ağ ile banka atamasının aynı indeksten türemesi bir geçerlik tehdidi olarak işaretlenmişti; bu modelde eşik sonuçlarını belirgin biçimde değiştirmediği görülmüştür.

7.2 Bitişik banka blokları: bir hizmet sırası yapıntısı

h = 0,5 ve h = 1 dilimlerinde yalnız nakit senaryosunda çıkış ve stres belirgin biçimde bastırılır; h = 1'de 480 adımda stres olasılığı taranan aralıkta 0,5'e ulaşmaz. Ancak aynı bastırma sosyal etkinin sıfır olduğu M1 kontrolünde de görülür: κ = 0,50 için ortalama çıkış h = 1'de 0,092, h = 0'da 0,197; analitik bireysel kıyas ise h = 1 dilimlerinde de 0,200 düzeyindedir. Sosyal etki yokken ağ sonucu etkileyemeyeceğine göre fark homofiliden gelmez.

Nedeni hizmet kuralıdır. v0.2.0'da hizmet sırası her adım bir hane kayan hane indeksidir ve indeks halka konumuyla aynıdır. h = 1'de her bankanın haneleri indekste bitişik bir blok oluşturur; kayma noktası bloğun dışındayken banka başına 4 nakit işlemi her adım bloğun başındaki aynı birkaç haneye gider. Bu haneler mevduatlarının yüzde 2'sini aldıkça tutarlar küçülür ve bankanın nakit çıkışı kısılır. Bağımsız atamada bir bankanın haneleri indekse yayıldığından kota farklı hanelere dağılır. Bu nedenle B ailesinin h = 0,5 ve h = 1 karşılaştırmaları homofili etkisi olarak yorumlanmaz; tablolar depoda korunmuştur. Bu yapıntı kilitli tasarımda öngörülmemişti; kilit sonrası keşifsel bir ek deneyle (EK1, Bölüm 7.6) ayrıştırılmıştır.

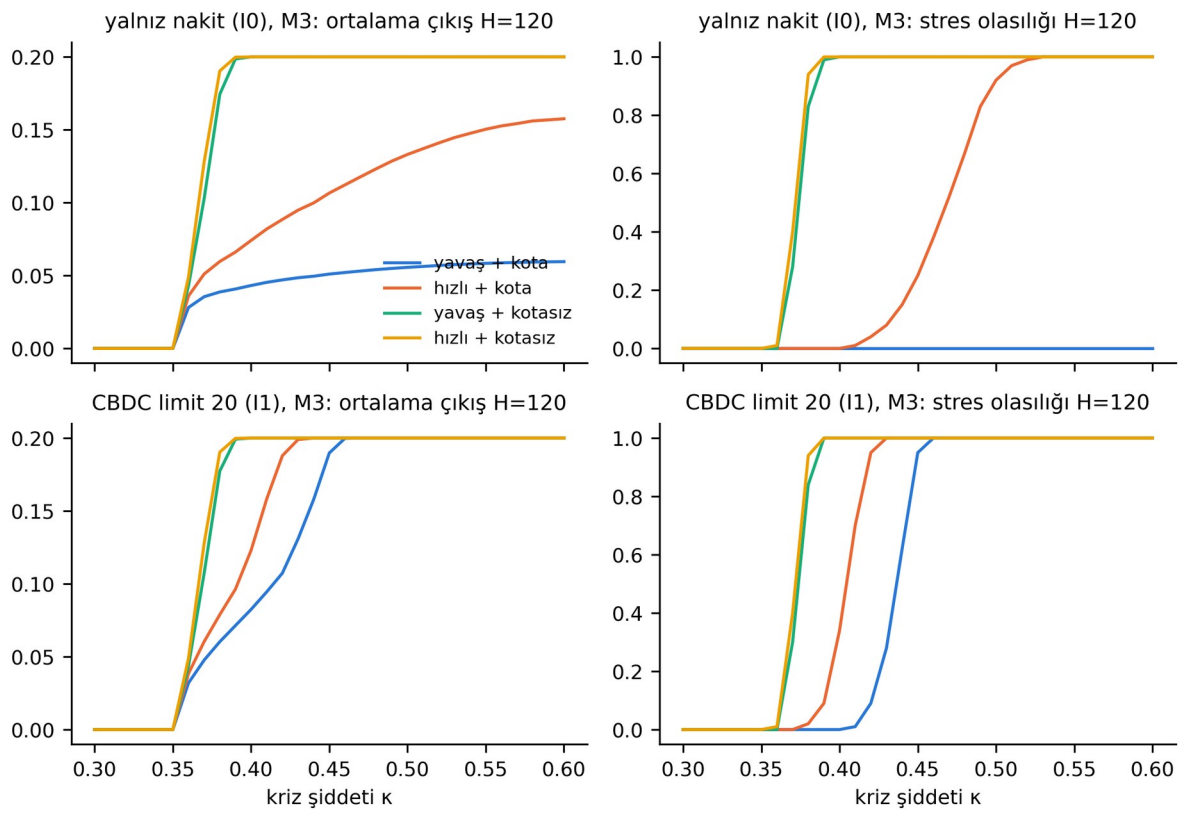


Şekil 5. B ailesi ve A (h = 0): M3 altında stres (H = 480) ve tam tükenme (H = 120) olasılıkları. h = 0,5 ve h = 1 eğrileri hizmet sırası yapıntısıyla karışmıştır (Bölüm 7.2); homofili etkisi olarak okunmamalıdır.

7.3 Nakit işlem büyüklüğü ve kotası (C)

Nakit büyüklüğü ve kotası ayrı faktörler olarak değiştirildiğinde, zamanlamayı belirleyen kısıtın kota olduğu görülür. CBDC senaryosunda ve M3 altında 120 adımlık stres eşiği hızlı nakitle (kota sürerken) −0,032 [−0,034; −0,029] (n=100), kotasız yavaş nakitle −0,062 [−0,064; −0,060] (n=100), ikisi birlikte −0,064 [−0,066; −0,062] (n=100) kayar. Yalnız nakit senaryosunda kota kaldırıldığında M3 altında stres ve tam tükenme 120 adımda bile (0,37; 0,38] aralığında gerçekleşir; kota sürerken hızlı büyüklük 120 adımda tam tükenmeyi sağlamaz.

M0 altında kotanın kaldırılması simülasyonu analitik kıyasa yaklaştırır: yalnız nakit, kotasız ve yavaş büyüklükte 480 adımlık tam tükenme κ50'si (0,45; 0,46], analitik ortalama 0,46. M3 altında aynı sürtünmesiz durumda tam tükenme (0,37; 0,38] aralığına iner; bu, bireysel olarak harekete geçen hane payının yaklaşık %6 olduğu bir kriz düzeyidir. Hızlı aktarım koşulunda bulaşma ve banka stresi, küçük bir başlangıç grubunu sistem çapında tükenmeye taşıyabilmektedir.

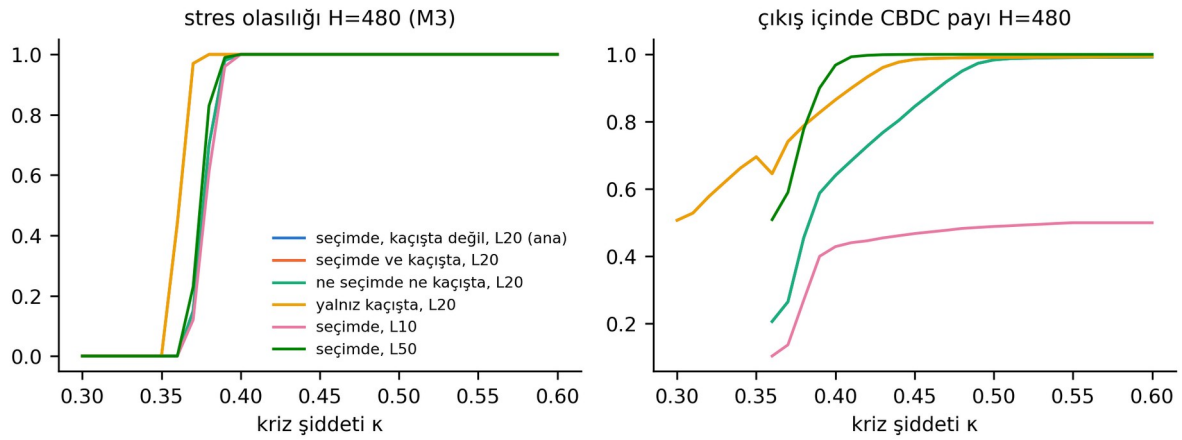


Şekil 6. C ailesi ve A: M3 altında dört sürtünme bileşiminde 120 adımlık ortalama çıkış ve stres olasılığı.

7.4 CBDC tasarımı (D)

Kilitli tasarım, CBDC cazibesinin araç seçimine etkisi ile kaçış eğilimine eklenmesini ayrı sınamıştır. Cazibenin araç seçiminden çıkarılması hiçbir tohumda eşik değiştirmemiştir (0 (100/100 tohumda aynı)). Bu boş sonucun nedeni parametrelerdir: mahremiyet düzeyi 0,8 iken net cazibenin −0,03'ün altında kalma olasılığı model dağılımlarından yaklaşık %0,010 düzeyindedir; seçim ölçütü neredeyse hiç bağlayıcı değildir. Cazibenin kaçış eğilimine eklenmesi (v0.1 tanımı) ise çıkışı κ = 0,30'da bile başlatır ve eşikleri düşürür: 120 adımlık stres eşiğinde −0,050 [−0,051; −0,049] (n=100), 480 adımda −0,016 [−0,017; −0,015] (n=100).

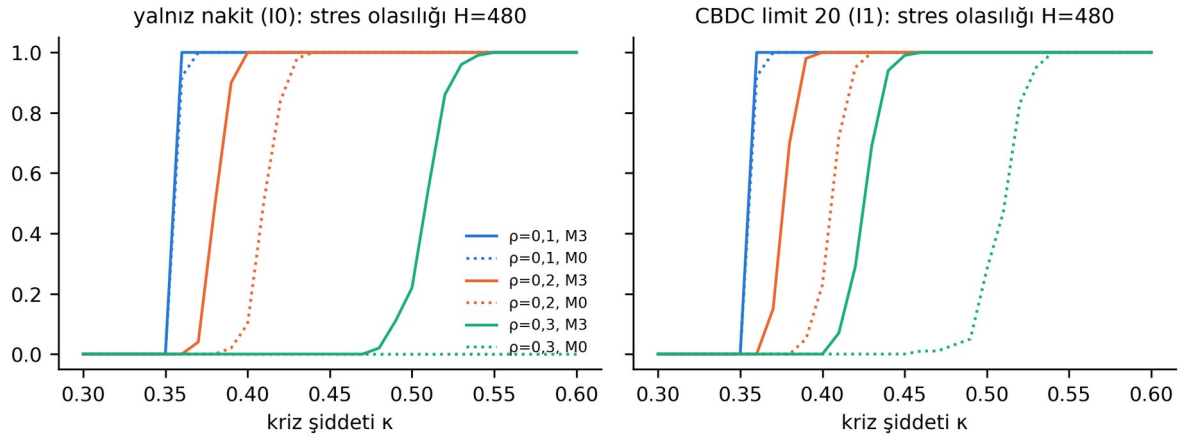
Limit düzeyi esas olarak zamanlamayı etkiler. 120 adımlık stres eşiği limit 10'da +0,081 [+0,079; +0,084] (n=100), limit 50'de −0,047 [−0,049; −0,046] (n=100) kayar (karşılaştırma limit 20); 480 adımda kaymalar küçüktür (+0,001 [+0,001; +0,002] (n=100) ve −0,002 [−0,003; −0,001] (n=100)). Limit 50 ve kaçışa ekli cazibe birlikte bütün olay eşiklerini (0,33; 0,34] aralığına, yani bireysel eşik alt sınırının altına indirir. Limit 0 ile yalnız nakit senaryosu 10 ana tohumda bütün ölçütlerde aynıdır (0 (10/10 tohumda aynı)); kanal gerçekten kapanmaktadır.



Şekil 7. D ailesi ve A-I1-M3: cazibe kanalları ve limit düzeylerine göre stres olasılığı ve çıkış içinde CBDC payı (H = 480).

7.5 Rezerv oranı (E)

Rezerv oranı birinci dereceden belirleyicidir ve büyük ölçüde muhasebe yoluyla etkilidir. ρ = 0,10'da stres eşiği (yüzde 2,2'lik çıkış) harekete geçme eşiğiyle çakışır: bütün mekanizmalarda ilk stres (0,35; 0,36] aralığındadır. ρ = 0,30'da M3 altında ilk stres eşiği yalnız nakit senaryosunda +0,127 [+0,125; +0,130] (n=100), CBDC senaryosunda +0,048 [+0,047; +0,050] (n=100) kayar; M0 ve yalnız nakit senaryosunda 480 adımda stres olasılığı 0,5'e ulaşmaz.



Şekil 8. E ailesi ve A: rezerv oranına göre stres olasılığı (H = 480); düz M3, noktalı M0.

7.6 Kilit sonrası keşifsel ek deney (EK1): hizmet sırası halka konumundan ayrıldığında

EK1, B ailesindeki yapıntıyı ayırmak için B sonuçları görüldükten sonra tanımlandı ve kilit dosyasına gerekçesiyle birlikte ek olarak kaydedildi (2026-10-13 17:45:52 UTC). v0.2.1 modelinde tek değişiklik hizmet sırası seçeneğidir: varsayılan sıra v0.2.0 ile bütün alanlarda aynı çıktıyı verir; "rastgele permütasyon" sırası ayrı bir tohumla (1000s + 6) çekilir, halka konumundan ve banka bloklarından bağımsızdır ve ana rastgele sayı akışını tüketmez. EK1'de A ailesi rastgele sırayla yeniden koşuldu (SA, 100 tohum) ve homofili dilimleri rastgele sırayla 50 tohumla tekrarlandı (SB). Toplam 43.400 koşudur; sonuçlar doğrulayıcı değil keşifseldir.

Hizmet sırası A ailesinin sonuçlarını kanala göre farklı etkiler. CBDC senaryosunda karşılaştırmalar büyük ölçüde dayanıklıdır: rastgele sırada sosyal bulaşmanın ilk stres eşiğine etkisi −0,021 [−0,023; −0,020] (n=100), 120 adımlık stres eşiğine etkisi −0,093 [−0,095; −0,091] (n=100), iki kanalın birlikte tam tükenme eşiğine etkisi −0,112 [−0,115; −0,109] (n=100) kadardır. Yalnız nakit senaryosunda ise sosyal bulaşmanın etkisi belirgin biçimde küçülür: ilk streste −0,013 [−0,015; −0,012] (n=100), tam tükenmede M2 için −0,015 [−0,017; −0,013] (n=99/100) ve M3 için −0,053 [−0,056; −0,050]

(n=99/100). Banka stresi geri beslemesinin tek başına etkisi sıradan etkilenmez (−0,039 [−0,041; −0,036] (n=99/100)).

Bunun mekanizması şudur: halka sırasında aynı adımda art arda hizmet alan haneler ağda da birbirine yakındır. Kota yalnız ilk birkaç talebi karşıladığından gerçekleşen transferler, dolayısıyla komşu sinyalleri, ağın aynı bölgesinde yoğunlaşır ve bulaşmayı güçlendirir. Rastgele sırada bu yoğunlaşma ortadan kalkar. CBDC kanalında kota olmadığı için talep eden hanelerin çoğu her adım hizmet alır ve sıra etkisi küçüktür. Dolayısıyla A ailesinde nakit kanalı için raporlanan sosyal bulaşma büyüklüğü kısmen hizmet kuralının ürünüdür ve davranışsal bulgu olarak yalnız alt ve üst sınırlarıyla birlikte okunmalıdır.

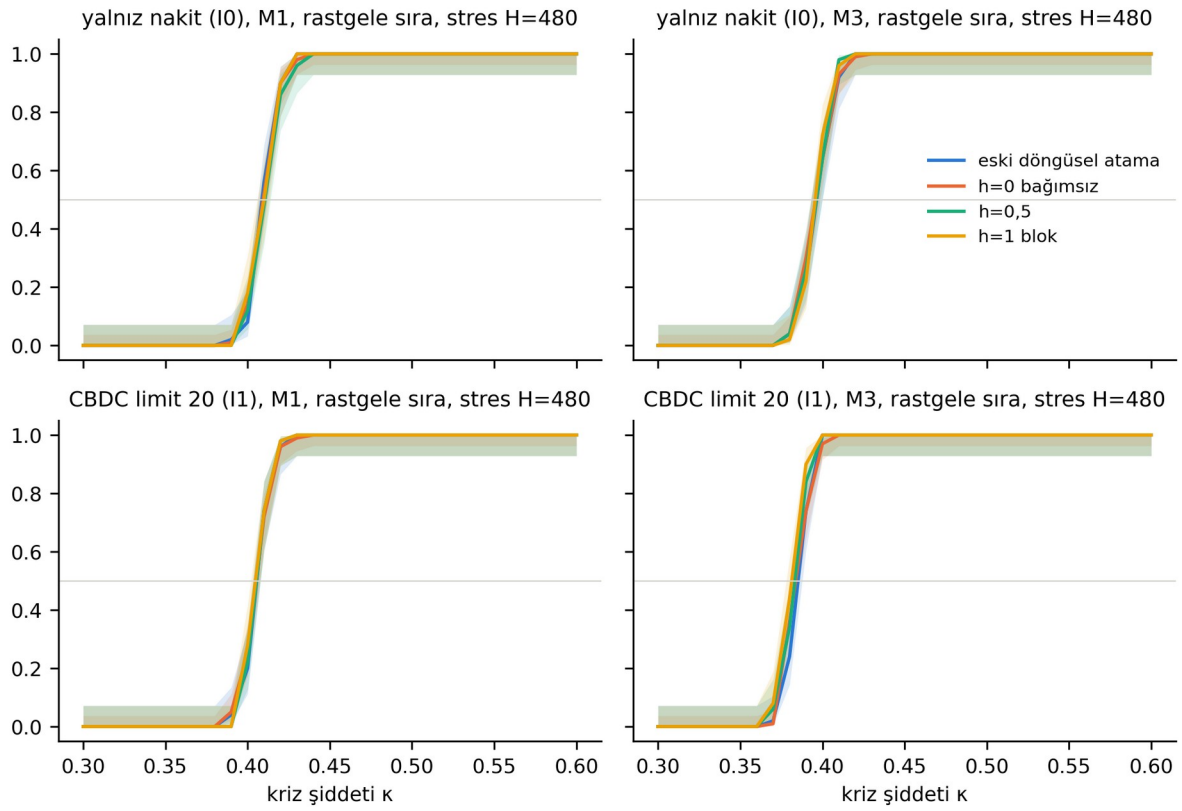
Tablo 6. Tohum düzeyinde eşik kaymalarının hizmet sırasına duyarlılığı

Karşılaştırma	Olay	Halka sırası (kilitli tasarım)	Rastgele sıra (EK1)
Yalnız nakit: M2 − M0	ilk stres, H=480	−0,030 [−0,031; −0,028]	−0,013 [−0,015; −0,012]
Yalnız nakit: M3 − M0	tam tükenme, H=480	−0,123 [−0,126; −0,119] (n=99/100)	−0,053 [−0,056; −0,050] (n=99/100)
Yalnız nakit: M1 − M0	tam tükenme, H=480	−0,040 [−0,043; −0,037] (n=99/100)	−0,039 [−0,041; −0,036] (n=99/100)
CBDC: M2 − M0	ilk stres, H=480	−0,029 [−0,030; −0,027]	−0,021 [−0,023; −0,020]
CBDC: M2 − M0	ilk stres, H=120	−0,097 [−0,099; −0,095]	−0,093 [−0,095; −0,091]
CBDC: M3 − M0	tam tükenme, H=480	−0,120 [−0,123; −0,117]	−0,112 [−0,115; −0,109]
Yalnız nakit, M1: h=1 − h=0	ilk stres, H=480	sansürlü	0,000 [−0,004; +0,004]
Yalnız nakit, M3: h=1 − h=0	ilk stres, H=480	+0,130 [+0,130; +0,130] (n=2/100)	−0,001 [−0,004; +0,002]
CBDC, M3: h=1 − h=0	tam tükenme, H=480	+0,043 [+0,041; +0,045]	+0,015 [+0,012; +0,017]

Köşeli parantez: tohumlar arası %95 güven aralığı. Homofili satırlarında rastgele sıra için 50 tohum kullanılmıştır; "sansürlü": iki tarafta da olay görülen tohum yok.

Rastgele sırada sosyal etkinin olmadığı M1 kontrolünde h = 1 ile h = 0 arasındaki ilk stres farkı yalnız nakit senaryosunda 0,000 [−0,004; +0,004] (n=50), CBDC senaryosunda −0,001 [−0,004; +0,002] (n=50); tam tükenmede −0,002 [−0,006; +0,002] (n=50) ve 0,000 [−0,004; +0,004] (n=50). Bu kontrolün sıfıra yakın olması, B ailesindeki bastırmanın hizmet sırasından geldiğini doğrular. M3 altında homofilinin etkisi ise şöyledir: h = 1 için ilk streste −0,001 [−0,004; +0,002] (n=50) (yalnız nakit) ve −0,004 [−0,006; −0,001] (n=50) (CBDC); tam tükenmede +0,003 [−0,002; +0,007] (n=50) ve +0,015 [+0,012; +0,017] (n=50); h = 0,5 için ilk streste −0,001 [−0,004; +0,002] (n=50) ve −0,002 [−0,004; 0,000] (n=50). Eski döngüsel atama ile fark −0,001 [−0,003; +0,002] (n=50) ve 0,000 [−0,002; +0,003] (n=50). Hepsi 50 tohumluk keşifsel tahminlerdir.

Rastgele sırada homofilinin etkisi küçüktür ve yalnız nakit senaryosunda güven aralıkları sıfırı içerir. CBDC senaryosunda bitişik bloklar ilk stresi çok az öne çekerken bütün rezervlerin tükenmesini geciktirir: bulaşma bir bankanın müşterileri arasında yoğunlaştığında o banka daha erken streslenir, ancak diğer bankalara yayılma yavaşlar. Bu sonuç önceden kilitlenmiş bir sınama değildir; homofili ailesinin rastgele sırayla ve 100 tohumla yeniden kilitlenmesi gerekir.



Şekil 9. EK1 (kilit sonrası, keşifsel): rastgele hizmet sırasıyla M1 ve M3 altında homofili düzeylerine göre stres olasılığı (H = 480). h = 0 eğrisi SA dilimlerinden (100 tohum), diğerleri SB dilimlerinden (50 tohum) gelir.

8 Analitik ayrıştırma ve özgünlük değerlendirmesi

Tablo 5. A ailesinde simülasyonun analitik bireysel kıyasla karşılaştırması (H = 480)

Hücre	Çıkış farkı ort.	|fark| < 10^{-6}	Stres olayı uyumu	Tam tükenme uyumu	Tohum stres eşiği − analitik
I0 M0	−0,0113	%36,4	%95,6	%68,9	+0,014
I0 M1	−0,0068	%49,3	%95,6	%81,8	+0,014
I0 M2	+0,0088	%65,4	%94,8	%96,8	−0,016
I0 M3	+0,0120	%67,2	%94,8	%91,4	−0,016
I1 M0	−0,0066	%53,0	%97,2	%85,2	+0,009
I1 M1	+0,0001	%67,7	%97,2	%93,0	+0,009
I1 M2	+0,0120	%67,3	%93,5	%90,7	−0,020
I1 M3	+0,0167	%67,3	%93,5	%76,1	−0,020

Çıkış farkı = simüle edilen çıkış − analitik bireysel kıyas (başlangıç servetine oran). M0'da en büyük fark 2,8 × 10^{-16} olup kayan nokta yuvarlaması düzeyindedir; M2 ve M3'te pozitif değerler geri beslemenin bireysel kıyası aştığını gösterir.

Analitik eşitsizliklerin açıkladığı. Harekete geçme eşiği (Önerme 1), %20 rezerv tavanı (Önerme 2), stres muhasebe eşiği (Önerme 3) ve yalnız nakit senaryosunda 120 adımlık stresin olanaksızlığı (Önerme 5) koşu yapmadan bilinir. M0 simülasyonu analitik kıyasın altında kalır ve aradaki fark sonlu ufuk ile işlem kapasitesinden gelir; hızlı ve kotasız nakitte fark 10^{-12} mertebesine iner (T6). Rezerv oranının etkisi de büyük ölçüde bu muhasebe ilişkisinden gelir.

Simülasyonun eklediği. Kilitli tasarımda sosyal bulaşma ilk stres eşiğini yaklaşık 0,03 birim, iki geri besleme kanalı birlikte tam tükenme eşiğini yaklaşık 0,12 birim düşürür; ancak nakit kanalında bu büyüklükler hizmet sırası rastgele olduğunda 0,01 ve 0,05 düzeyine iner. Sıraya en dayanıklı sonuç,

CBDC kanalı açıkken sosyal bulaşmanın 120 adımlık stres eşiğini yaklaşık 0,10 birim (rastgele sırada 0,09) öne çekmesidir. Sürtünmesiz aktarımda (kotasız nakit) bulaşma ve banka stresi, haneleri bireysel olarak yalnız küçük bir pay harekete geçirdiğinde bile sistem çapında tükenme üretir. Bunlar eşik modeli ve ağ kaskadı yazınından beklenen niteliksel sonuçlardır (Granovetter, 1978; Watts, 2002); bu modelin katkısı büyüklüklerini kilitli bir tasarımla ve muhasebe kısıtlarından ayrıştırarak göstermesidir. Büyüklükler sosyal etki (0,3), banka stresi sinyali (0,25) ve eşik dağılımı gibi kalibre edilmemiş seçimlere bağlıdır.

Model yapıntıları. (i) Hizmet sırası ile bitişik banka bloklarının etkileşimi (Bölüm 7.2). (ii) Hane başına limit 20 ile hane sayısının çarpımının başlangıç rezervine eşit olması; bu, CBDC'nin tek başına bütün rezervi boşaltabilmesini parametre seçimine bağlar. (iii) Cazibenin araç seçimi ölçütünün mahremiyet düzeyi 0,8 iken neredeyse hiç bağlayıcı olmaması (yaklaşık %0,010). (iv) Yüzde tabanlı çekimlerin mevduatı asimptotik olarak sıfırlaması ve rezervi kalan bankada akışın ufka kadar sürmesi. (v) Sosyal sinyalin gerçekleşen transfere bağlı olması: kota veya rezerv nedeniyle hizmet alamayan hane komşularına sinyal vermez. (vi) $\rho < s$ iken çıkış olmadan ortaya çıkan başlangıç stresi (T7). (vii) Tekrarlı karşılanamayan talebin ufukla büyümesi.

Özgünlük kararı. v0.2, v0.1'e yöneltilen eleştirilerin çoğunu gidermiştir: koşular gerçek ve yeniden üretilebilir, rastgele sayı akışları ayrıdır, banka ataması ağdan bağımsızdır, sürtünme faktörleri ayrıdır, CBDC kanalları ayrı sınanmış ve kriz eşikleri tohum düzeyinde ölçülmüştür. Buna karşın ortaya çıkan davranışsal katkı küçüktür, parametreye bağlıdır ve yazındaki eşik ve kaskad sonuçlarının bilinen niteliksel biçimini aşmaz. Model kalibre edilmemiştir; merkez bankası likiditesi, politika tepkisi ve heterojen sigorta veya ilişki yapıları yoktur. Bu nedenle çalışma bu haliyle bir ekonomi veya finans dergisinde hakemli gönderim için yeterli özgün katkı göstermez. Bir yöntem notu veya konferans bildirisi olarak, mekanizma denetimi örneği biçiminde sunulabilir; dergi düzeyi için Bölüm 10'daki eksiklerin giderilmesi gerekir.

9 Sınırlılıklar

- Bütün davranış parametreleri temsilidir; Türkiye için kalibrasyon, gerçek veri veya TCMB ile ortak çalışma yoktur. Sonuçlar politika tahmini değildir.
- Merkez bankası likidite desteği yoktur. Bu, gerçek sistemin değişmez özelliği değil v0.2'nin kapsam sınırıdır; teminatlı destek için bilanço kayıtları tanımlanmış, ancak v0.3 kolu bu çalışmada kodlanmamış ve koşulmamıştır.
- Kredi daralması, sermaye, mevduat sigortası, bankalar arası piyasa, varlık satışı ve faiz tahakkuku yoktur. Rezerv tükenmesi iflasla özdeş değildir.
- Ağ tek bir halka ve yüzde 5 yeniden bağlama ailesidir; ölçeksiz veya topluluk yapılı ağlar sınanmamıştır.
- Homofili etkisi yalnız kilit sonrası keşifsel ek deneyle ve 50 tohumla tahmin edilmiştir; doğrulayıcı bir sınama değildir.
- Kilitli tasarımda tek bir hizmet kuralı (halka sırası) kullanılmıştır; EK1 bu kuralın nakit kanalındaki sosyal bulaşma büyüklüğünü etkilediğini göstermiştir. Kuyruk ve hizmet kuralları ayrı bir tasarım faktörü olarak sınanmalıdır.
- Tohumlar arası güven aralıkları sentetik başlangıç nüfusları üzerindeki Monte Carlo belirsizliğidir; gerçek nüfus belirsizliği değildir.
- Kilitli tasarım yerel bir kayıttır; kamuya açık ön kayıt, kalıcı arşiv ve DOI henüz yoktur.

10 Sonuç ve gönderim öncesi eksikler

Kilitli tasarımla yürütülen 158.410 koşu ve 43.400 koşuluk keşifsel ek deney, v0.1'de muhasebe tavanına ve kod özdeşliğine dayanan sonuçların büyük bölümünün analitik olarak açıklanabildiğini

doğrulamıştır. Ağ ve banka atamasının ayrılması v0.1'deki eşik sonuçlarını belirgin biçimde değiştirmemiştir. Homofili sınaması hizmet sırasına bağlı bir yapıntıyı ortaya çıkarmış; sıra rastgele olduğunda homofilinin etkisi küçük kalmıştır. Sosyal bulaşma ve banka stresi geri beslemesi analitik kıyasın ötesinde ölçülebilir kaymalar üretir; bunların nakit kanalındaki büyüklüğü hizmet kuralına duyarlı, CBDC kanalındaki zamanlama etkisi ise daha dayanıklıdır. Hepsi kalibre edilmemiş parametrelere bağlıdır.

Dergi gönderimi öncesinde şu eksikler giderilmelidir: davranış eşiklerinin ve sosyal etki ağırlığının veriyle (örneğin CBDC-SPAR anket ve tercih verileriyle, ayrı etik onayla) ilişkilendirilmesi; sosyal etki, banka stresi sinyali ve eşik dağılımı üzerinde önceden tanımlı bir duyarlılık analizi; hizmet sırasının bir tasarım faktörü olarak doğrulayıcı biçimde yeniden kilitlenmesi ve homofili ailesinin rastgele sırayla 100 tohumla yeniden koşulması; teminatlı merkez bankası desteği kolunun (v0.3) uygulanması; farklı ağ aileleri; kalıcı arşiv, DOI ve yazar onaylı kamuya açık ön kayıt.

Beyanlar

İnsan katılımcı verisi kullanılmamıştır; bütün çıktılar simülasyon üretimidir. CBDC-SPAR nitel çalışmasının etik onayının bu simülasyonu kapsadığı iddia edilmez. Kodun, deneylerin ve bu metnin hazırlanmasında üretken yapay zekâ desteği kullanılmıştır; yöntem, kaynak, kod ve metin sorumluluğu yazarlara aittir. Yazar sırası, CRediT katkıları, finansman ve çıkar çatışması beyanları yazarlarca kesinleştirilecektir. Bu metin herhangi bir dergiye veya konferansa gönderilmemiştir.

Veri ve kod erişimi

Model kaynağı (cbdc-spar-v02.nls, v0.2.1 için cbdc-spar-v021.nls), BehaviorSpace deneylerini içeren NetLogo dosyaları, kilitli tasarım (design-v02.json) ve kilit kaydı, ek deney tasarımı, test tasarımları, çalıştırma parçaları, tek komutlu yeniden üretim betiği (reproduce.sh), ham BehaviorSpace tabloları, düzenli tablolar, analiz ve şekil kaynakları, zamanlama kayıtları ve SHA-256 bildirimi proje deposunda simulasyon/revision-v02 dizinindedir. Özgün v0.1 modeli ve 320 koşuluk arşiv değiştirilmemiştir. Kalıcı arşiv ve DOI henüz yoktur.

Kaynakça

Barucci, E., Gurgone, A., Iori, G. ve Azzone, M. (2025). Central Bank Digital Currency, Flight-to-Quality, and Bank-Runs in an Agent-Based Model. arXiv:2510.21071, sürüm 2. https://doi.org/10.48550/arXiv.2510.21071

Bidder, R., Jackson, T. ve Rottner, M. (2025). CBDC and banks: disintermediating fast and slow. BIS Working Papers No. 1280. Bank for International Settlements. https://www.bis.org/publ/work1280.htm

Diamond, D. W. ve Dybvig, P. H. (1983). Bank Runs, Deposit Insurance, and Liquidity. Journal of Political Economy, 91(3), 401-419. https://doi.org/10.1086/261155

Granovetter, M. (1978). Threshold Models of Collective Behavior. American Journal of Sociology, 83(6), 1420-1443. https://doi.org/10.1086/226707

Grimm, V., Railsback, S. F., Vincenot, C. E., Berger, U., Gallagher, C., DeAngelis, D. L., Edmonds, B., Ge, J., Giske, J., Groeneveld, J., Johnston, A. S. A., Milles, A., Nabe-Nielsen, J., Polhill, J. G., Radchuk, V., Rohwäder, M.-S., Stillman, R. A., Thiele, J. C. ve Ayllón, D. (2020). The ODD Protocol for Describing Agent-Based and Other Simulation Models: A Second Update to Improve Clarity, Replication, and Structural Realism. Journal of Artificial Societies and Social Simulation, 23(2), 7. https://doi.org/10.18564/jasss.4259

Iyer, R. ve Puri, M. (2012). Understanding Bank Runs: The Importance of Depositor-Bank Relationships and Networks. American Economic Review, 102(4), 1414-1445. https://doi.org/10.1257/aer.102.4.1414

Keister, T. ve Monnet, C. (2022). Central bank digital currency: Stability and information. Journal of Economic Dynamics and Control, 142, 104501. https://doi.org/10.1016/j.jedc.2022.104501

Watts, D. J. (2002). A simple model of global cascades on random networks. Proceedings of the National Academy of Sciences, 99(9), 5766-5771. https://doi.org/10.1073/pnas.082090499

Wilensky, U. (1999). NetLogo. Center for Connected Learning and Computer-Based Modeling, Northwestern University. http://ccl.northwestern.edu/netlogo/