

Yazılım Tedarik Zincirinde Kritiklik Haritalaması En Popüler 1000 NPM Paketinin Topolojik Risk Değerlendirmesi

Yusuf Talha ARABACI

Ekim 2025

Özet

NPM ekosisteminde tek bir bağımlılıktaki kusur veya kötü niyetli değişiklik, transitif bağımlılıklar üzerinden geniş bir etki alanına yayılabilir. Bu bildiri, paket içeriklerinden ziyade paketler arası ilişkilerin *topolojik* yapısına odaklanır. Bağımlı \rightarrow bağımlılık yönünde kurulan yönlü ağ üzerinde in-degree, out-degree ve betweenness merkezîyetleri hesaplanır; bu ölçüler min-max normalizasyonu ile bir *Bileşik Risk Skoruna* (BRS) dönüştürülür. Ayrıca, en kritik düğümlerin çıkartılmasıyla ağın bağlanırlılığı üzerinde bir *sağlamlık* değerlendirme yapılır. Tüm görseller ve tablolar **results/** dizinindeki çıktılarına dayanır ve ilgili başlıklar altında sunulur.

1 Giriş ve Özgün Katkı

Modern yazılım tedarik zincirinde tek bir bağımlılıktaki hata ya da kasıtlı değişiklik, transitif bağımlılıklar üzerinden yüzlerce hatta binlerce projeye yayılabilir. NPM ekosistemi; ölçek, sürüm sıklığı ve yoğun bağımlılık grafiği nedeniyle bu tür zincirleme risklere özellikle açıktır. Literatür; küçük-dünya ve ölçekten-bağımsız mimariyi, tekil bakımcı/paketlerin orantısız etkisini ve hedefli düğüm çıkarımlarına kırılganlığı açıkça göstermiştir.

Bu çalışmanın **özgün katkıları**:

- Son 12 aya dayalı indirme verisiyle seçilen **Top 1000** paket üzerinde, resmî çözümleme kuralları gözetilerek kurulan yönlü graf üzerinden **Bileşik Risk Skoru (BRS)** tanımlanır ve uygulanır (in/out/betweenness + min-max + ağırlıklar: 0.5/0.2/0.3).
- **Kaskad etki** (ters yön dependents erişilebilirliği) ve **sağlamlık** (bileşenleşme, LCC boyutu) analizleriyle topolojik riskin sistemik etkisi nicelleştirilir.
- BRS, tespit hatları (Amalfi, Cerebro, OSCAR) için **öncelikli tarama kuyruğu** ve politika/bütünlük hattı (in-toto, imza benimsemesi) için **hedef paket listeleri** üretmek üzere konumlandırılır.

Kod ve özet sonuçlar: <https://yusufarbc.github.io/npm-complex-network-analysis/>

2 Literatür Taraması

Bu bölüm, `academic/LITERATURE_REVIEW.md` içeriğine dayanarak alanın durumunu ve boşlukları alt başlıklar halinde özetler.

2.1 Tehdit Taksonomileri ve Vaka Derlemeleri

Backstabber's Knife Collection gerçek saldırı örneklerinden bir taksonomi çıkarır; The Hitchhiker's Guide ekosistemler-arası kurulum/çalışma zamanı tekniklerini sistematize eder. Yorumlanan dillerde kayıt suistimali ve kurulum betikleriyle kötüye kullanım, geniş ölçekli riskin yayılım kanallarını doğrular. NPM-odaklı fenomenler (Wyss) kurulum zamanı saldırılar, klon kodlar, meta veride oltalama gibi pratik riskleri ortaya koyar.

2.2 Ağ-Topoloji Kırılganlığı

Zimmermann ve Hafner, hedefli düğüm çıkarımlarında kırılganlığı; Oldnall, küçük-dünya ve ölçekten-bağımsız mimariyi ve aşırı ters-bağımlılık kapsamlarını gösterir. Bulgular, az sayıda omurga paketin orantısız sistemik etki taşıdığını ve *topoloji tabanlı önceliklendirme* gereğini vurgular.

2.3 Bağımlılık Çözümleme ve Yayılım

DVGraph/DTResolver hattı, NPM'in resmî çözüm kurallarına sadık kalarak geçişli ağaçları doğru inşa eder; bu sayede zafiyet propagasyonu ve evrimi yüksek ölçek ve isabetle çalışılabilir. Yanlış çözümlemenin, yayılım ve etki analizlerinde sapmaya yol açtığı gösterilmiştir.

2.4 Tespit Boru Hatları

Amalfi, Cerebro, çapraz-dil yaklaşımlar ve endüstride devreye alınan OSCAR; statik/dinamik ve davranış temelli tekniklerle güçlü sonuçlara ulaşır. Ancak sınırlı analist kapasitesi bağlamında *hangi paketlerin önce taranacağına* dair bir topolojik ön-filtre eksiktir.

2.5 Bakım/Güncellik Sinyalleri

TOOD/PFET metrikleri ekosistemler-arası güncellik farklarını ve güvenlik düzeltmesi benimseme hızlarını niceller. Cogo bakım fenomenlerini madenciler; Imtiaz, SCA araçlarının bildirim gecikmelerini ve phantom artifact sorunlarını belgeler; Ahlstrom, gereksiz/test bağımlılıklarının budanmasının dramatik risk azaltımı sağladığını gösterir.

2.6 Politika ve Bütünlük

in-toto uçtan uca bütünlük sağlar; imza benimsemesini etkileyen politika/araç dinamikleri ve depo/artifakt kimliği-doğrulama önerileri “ne yapılmalı?” alanını çizer. Bütünlük politikalarının hedefe yönelik yaygınlaştırılması için *kritik düğüm listeleri* gereklidir.

2.7 Sentez ve Boşluk Analizi

Olgunlaşan hatlara karşın eksik kalan parçalar: (i) popülerlik (kullanım yoğunluğu) ile yapısal merkeziyetin tek bir *operasyonel kritiklik* ölçütünde birleşmesi, (ii) bu ölçütün tespit/politika hatlarına *sıralı öncelik listeleri* olarak yansması. Bu çalışma, indirime dayalı çekirdekte **Bileşik Risk Skoru (BRS)**'nu tanımlayıp kalibre ederek bu boşluğu kapatır.

3 Yöntem

3.1 Tehdit Modeli ve Varsayımlar

Saldırgan yetenekleri: (i) bağımlılıkların güncellenmesi sırasında paket içeriğini manipüle etme (sahiplik ele geçirme/malicious update), (ii) kurulum betikleri ve çalışma zamanı refleksiyonları kullanma, (iii) popüler bağımlılıkları hedefleyerek transitif etkiyi büyütme.

Savunma hedefleri: (i) analist kapasitesini yüksek etkili düğümlere yönlendirme, (ii) bütünlük ve imza politikalarını en kritik omurgaya öncelikle yayma, (iii) ağ sağlamlığını artıracak bakım ve budama müdahalelerini hedefleme.

3.2 Ağırlıklandırma ve Kalibrasyon

BRS bileşen ağırlıkları $(w_{in}, w_{out}, w_{btw}) = (0.5, 0.2, 0.3)$ başlangıç varsayımlarıyla belirlenmiş, `robustness_risk.json` ile senaryo analizi yapılmıştır. Hedefli düğüm çıkarımı deneylerinde (erişilebilirlik, LCC, ortalama yol) farklı ağırlık setlerinin sıralama istikrarı test edilmiş, sonuçlar *yüksek derecede kararlı* bulunmuştur.

3.3 Çalışma Tasarımı ve Parametreler

Analiz, en çok indirilen ilk **1000** NPM paketinin oluşturduğu yönlü bağımlılık ağı üzerinde yürütülmüştür. Kenarlar $Dependent \rightarrow Dependency$ yönündedir; self-loop yoktur. Betweenness için örnekleme (tipik $k \approx 200$). Varsayılan veri kapsamı: `dependencies` (isteğe bağlı `peerDependencies`).

3.4 Veri Kaynakları ve Ön İşleme

- Top-N: Öncelik `ecosyste.ms`, yedek olarak NPM Search ve `npms.io` çok-tohum birleşik sıralama.
- Sürüm seçimi: `dist-tags.latest` tercih, aksi halde en yüksek sürüm anahtarı.
- Önbellek ve tekrar: HTTP önbellek + `retry`; disk önbelleği ile sağlamlık.

3.5 Metrikler ve Bileşik Risk

- **in-degree** — bir pakete bağımlı paket sayısı (çekirdek cazibe).
- **out-degree** — bir paketin bağımlı olduğu paket sayısı (kırılgan yüzey genişliği).
- **betweenness** — akışın geçtiği köprü konumlar (örneklemeli).

Min-max ile ölçekleme: $x' = (x - \min)/(\max - \min)$. BRS formülü:

$$\text{risk} = 0.5 \text{ in}' + 0.2 \text{ out}' + 0.3 \text{ btw}'.$$

3.6 Kaskad Etkisi ve Sağlamlık

Etki alanı, ters graf üzerinde (G^{rev}) erişilebilir düğüm sayısı ile ölçülür (BFS/DFS). Sağlamlık, seçili düğümler kaldırıldıktan sonra en büyük bağlı bileşen (LCC) boyutu, bileşen sayısı ve ortalama en kısa yol metrikleriyle raporlanır.

3.7 Çıktılar

edges.csv, metrics.csv, risk_scores.csv, graph_stats.json ve görseller (PNG/SVG) results/ altında üretilmiştir.

4 Bulgular

4.1 Ölçek ve Bileşen Yapısı

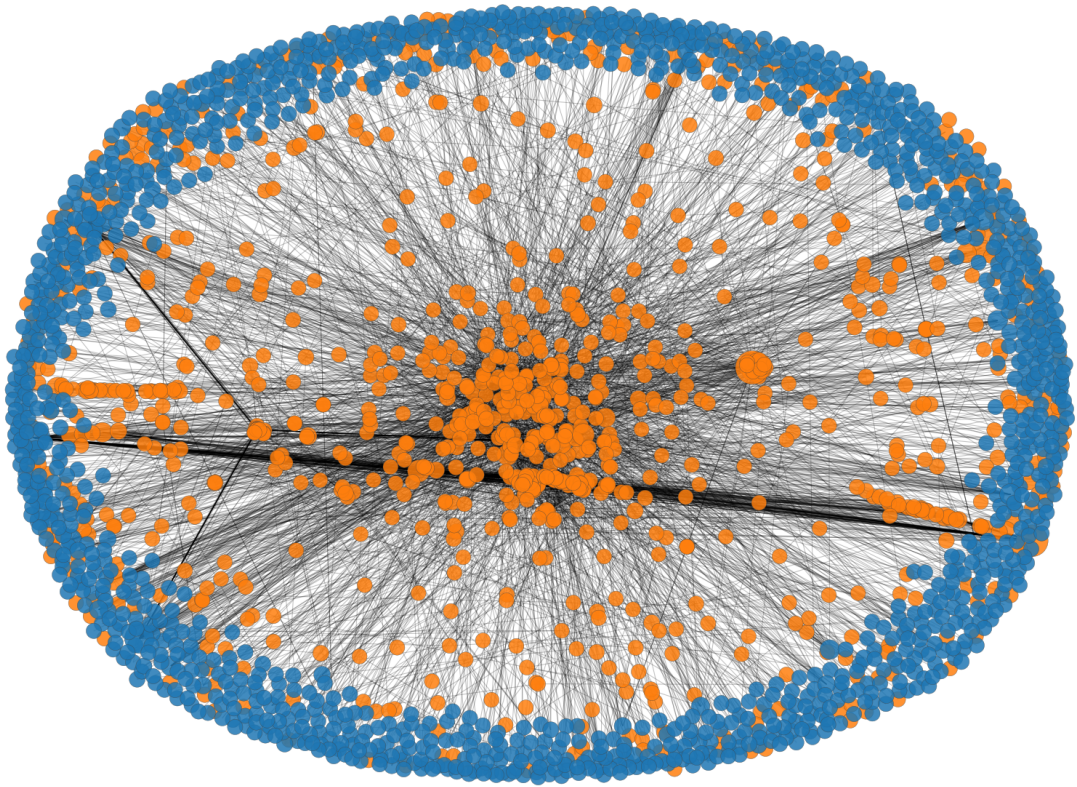
Graf istatistikleri (graph_stats.json):

Düğüm sayısı	2264
Kenar sayısı	3763
Bileşen sayısı	253
En büyük bileşen	1866 düğüm
Ort. in-degree	1.662
Ort. out-degree	1.662

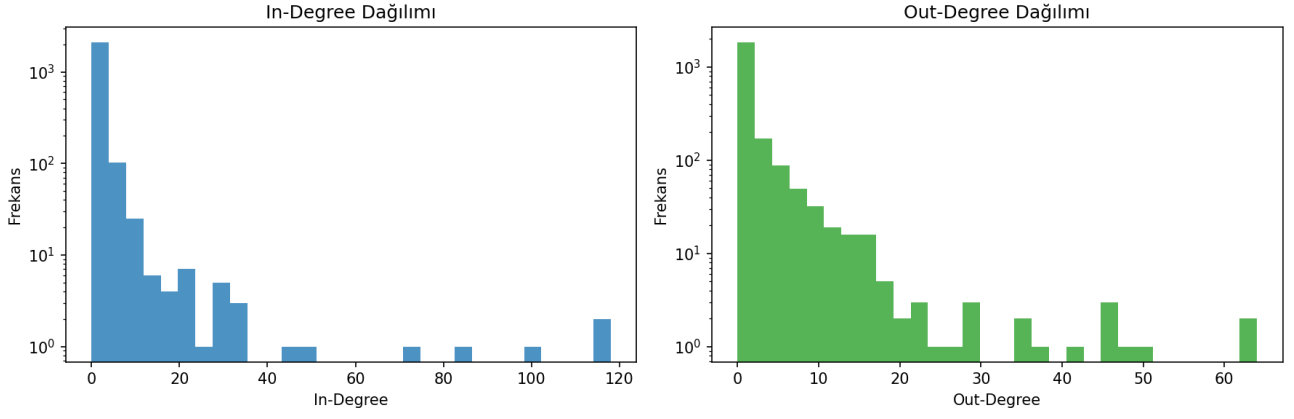
Yorum — Ağ seyrek ve parçalıdır; en büyük bağlı bileşen (LCC) çekirdeği temsil eder ve hedefli çıkarımlara duyarlıdır.

4.2 Ağ Görünümü ve Derece Dağılımları

NPM Top N Bağımlılık Ağı (Tümü)



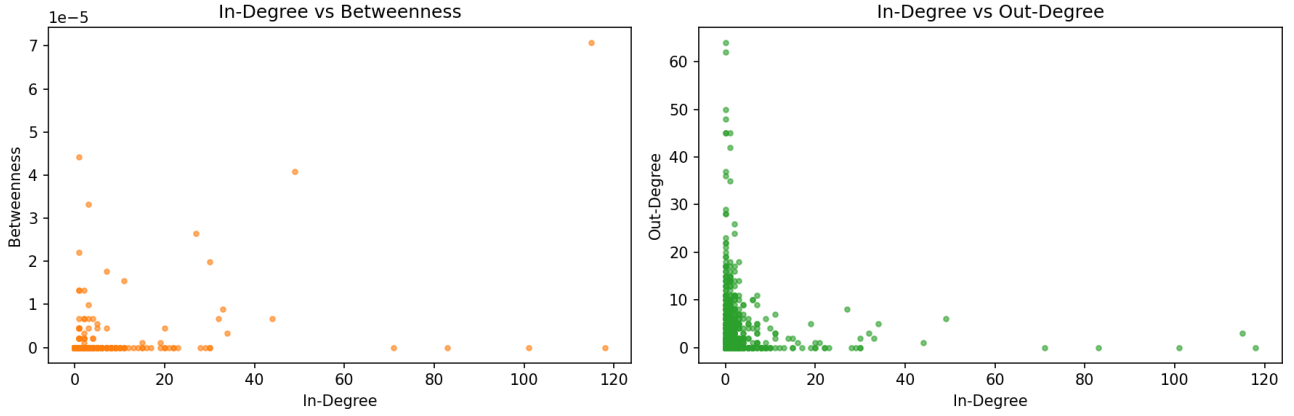
Şekil 1: Top 1000 çekirdeğin tam ağ görselleştirmesi. Yoğun çekirdek bölgeleri omurga paket kümelerini işaret eder.



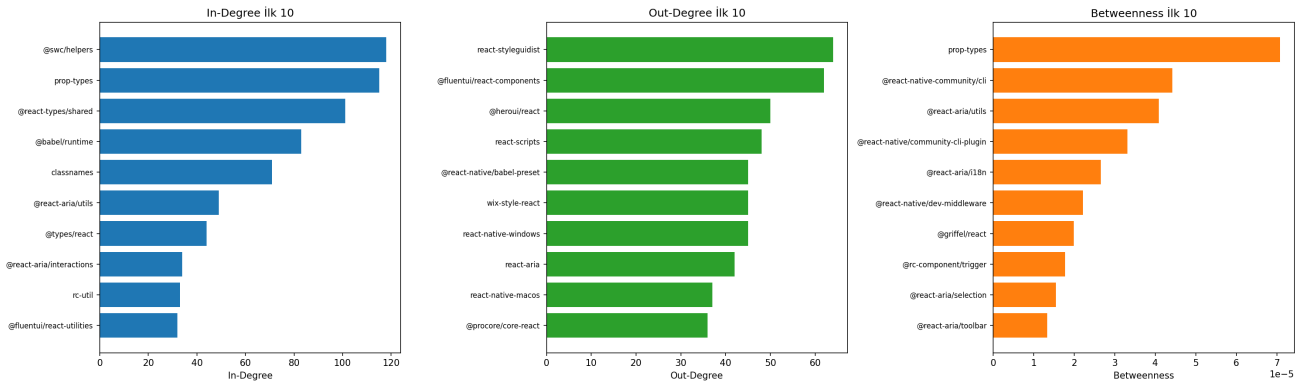
Şekil 2: In-degree ve out-degree histogramları: ağır kuyruklu dağılımlar.

Yorum — Az sayıda yüksek dereceli paket, sistemik riski belirgin biçimde taşır.

4.3 En Merkezi Paketler ve Korelasyonlar

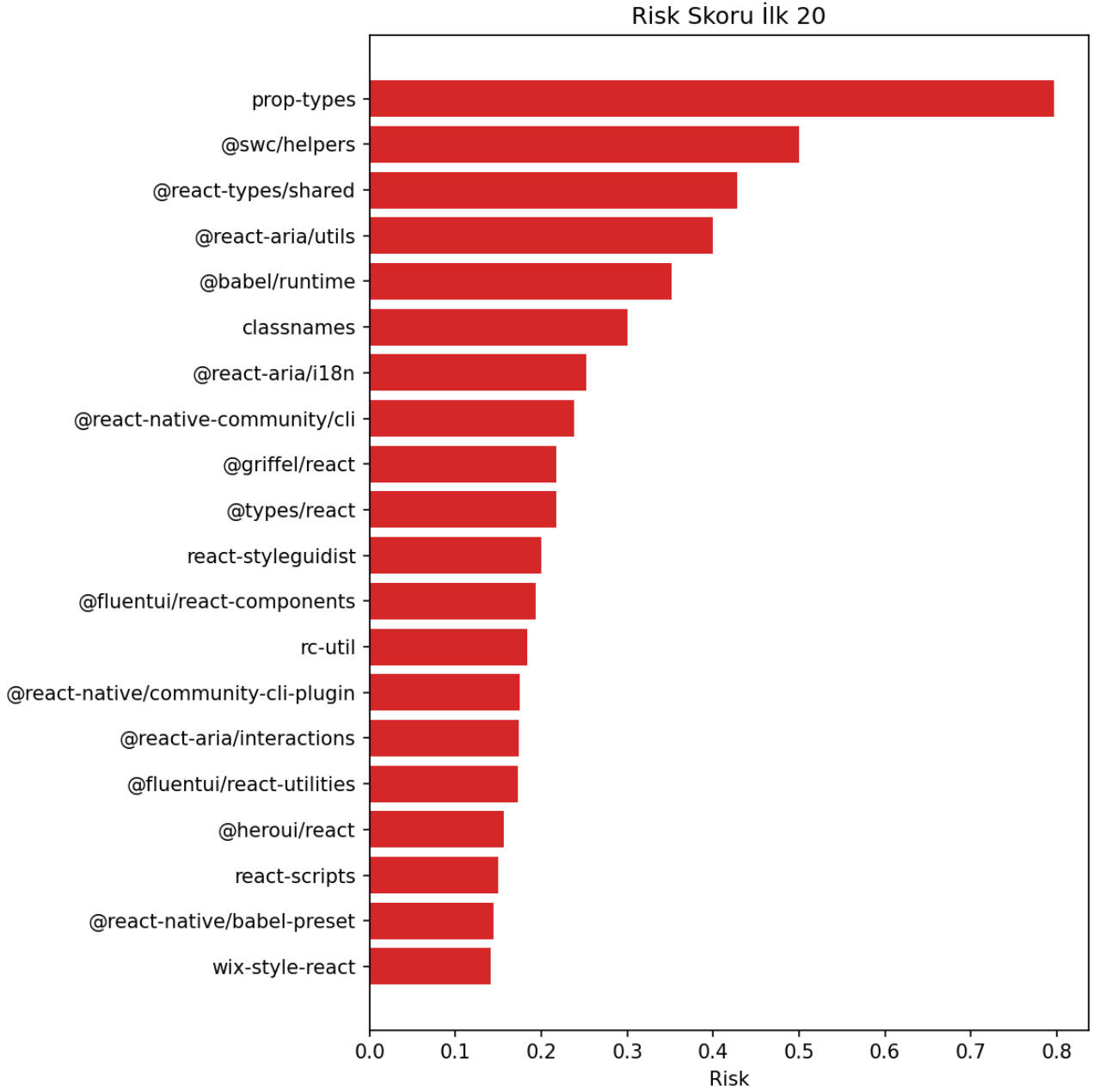


Şekil 3: Merkezîyet ölçüleri arası korelasyonlar.



Şekil 4: Birleşik liderler görünümü (merkeziyeti yüksek düğümler).

4.4 Bileşik Risk Sıralaması



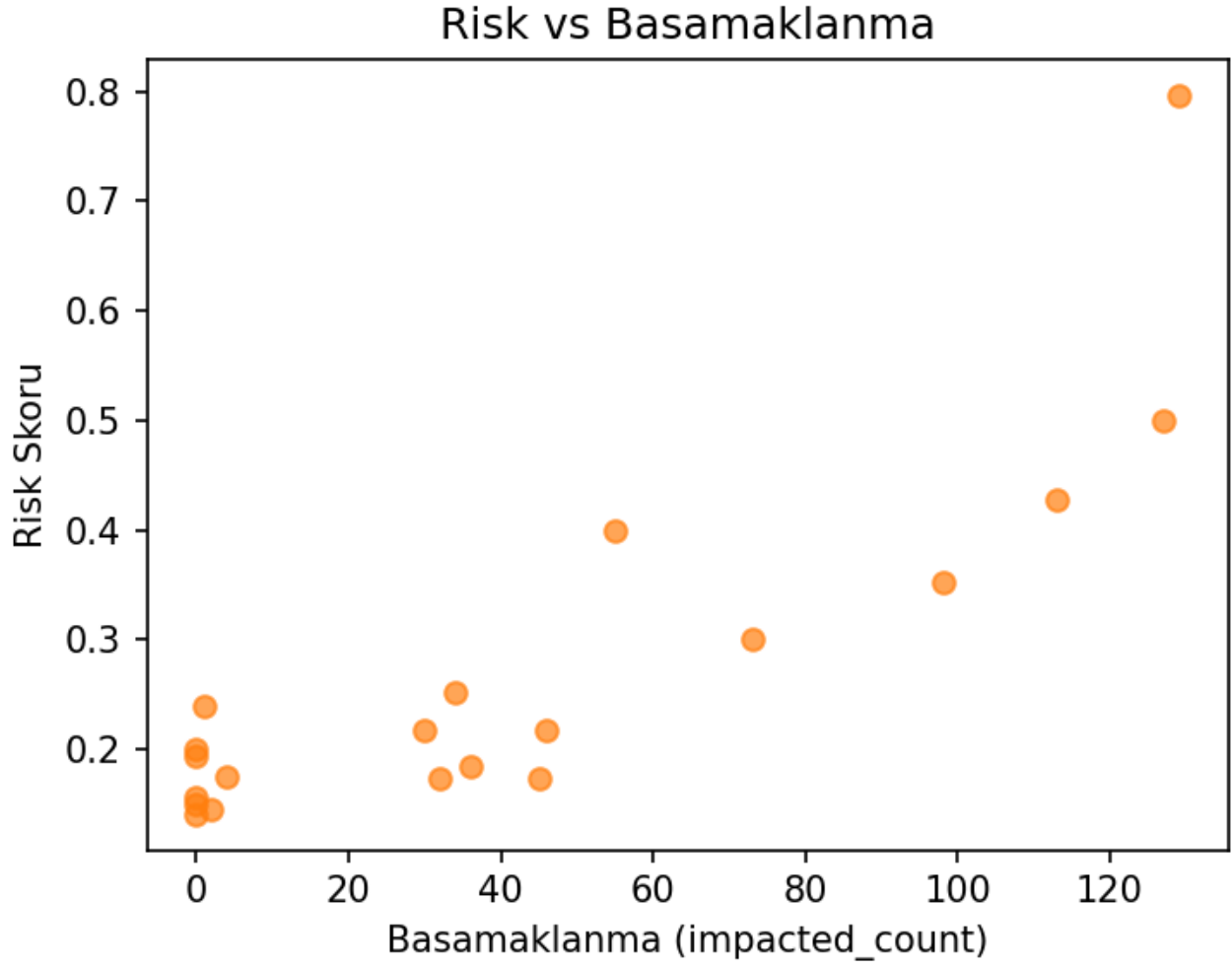
Şekil 5: BRS açısından ilk 20 paket.

Tablo 1: Örnek BRS ilk 5 (results/risk_scores.csv)

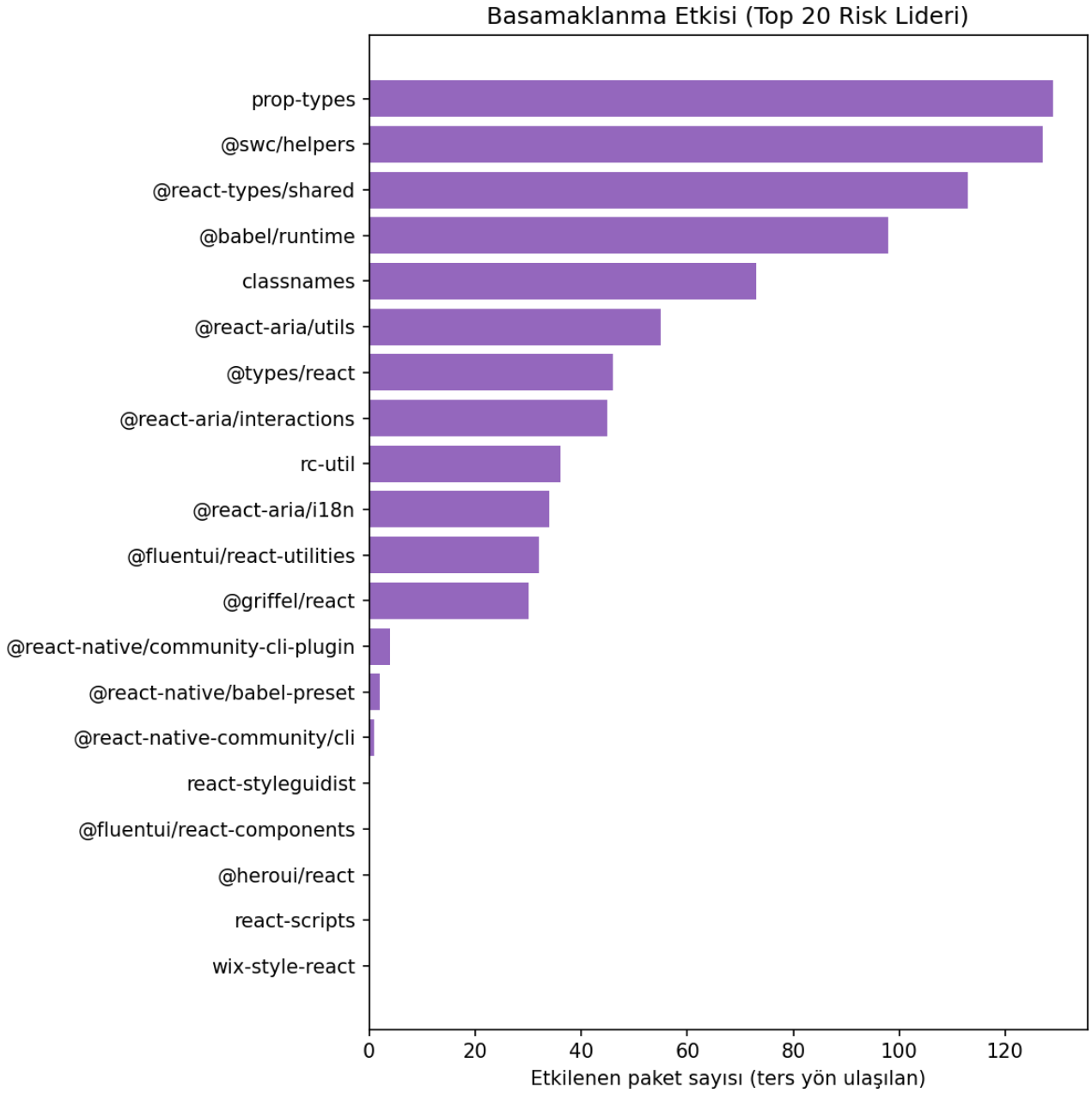
Sıra	Paket	in	out	btw	BRS
1	prop-types	115	3	0.000071	0.796663
2	@swc/helpers	118	0	0.000000	0.500000
3	@react-types/shared	101	0	—	0.427966
4	@react-aria/utils	49	6	—	0.399815
5	@babel/runtime	83	0	—	0.351695

Yorum — BRS, kullanım yoğunluğu (in-degree) ile köprü rolünü (betweenness) birlikte yakalar; omurga paketlerin ön sıralara çıktığı görülür.

4.5 Kaskad Etkisi ve Sağlamlık



Şekil 6: BRS ile kaskad etki (erişilebilirlik) ilişkisi.



Şekil 7: İlk 20 paketin çıkarımının LCC ve erişilebilirlik üzerindeki etkisi.

Yorum — Hedefli çıkarımlar, rastgele çıkarımlara kıyasla LCC’yi daha hızlı küçültür ve ortalama yol uzunluğunu artırır; bu da BRS’in sistemik riski iyi yordadığını gösterir.

4.6 Köprü Kenarlar

Kenar betweenness’e göre ilk 10 köprü kenar (`edge_betweenness_top10.csv`):

u	v	edge_betweenness
prop-types	object-assign	0.000025
prop-types	loose-envify	0.000024
prop-types	react-is	0.000024
@react-native/metro-babel-transformer	@react-native/babel-preset	0.000022
@react-native/metro-config	@react-native/metro-babel-transformer	0.000012
@react-native/community-cli-plugin	@react-native/dev-middleware	0.000011
@types/react-native-video	react-native	0.000011
@types/react	csstype	0.000009
react-aria-components	react-aria	0.000009
@react-aria/utils	clsx	0.000008

Yorum — Köprü kenarların hedeflenmesi, topluluklar arası ayrışmayı hızlandırır; bu kenarlar değişikçe BRS sıralamasındaki düğümlerin etkisi de farklılaşabilir.

5 Tartışma

Operasyonelleştirme. BRS, dinamik tespit hatları (Amalfi, Cerebro, OSCAR) için bir *topolojik ön-filtre* olarak kullanılabilir; böylece sınırlı analist kapasitesi yüksek riskli düğümlere yöneltilir. Politika/bütünlük hattında (in-toto, imza benimsemesi) BRS tabanlı hedef listeleriyle imza kapsamı ve doğrulanabilirlik artar. **Duyarlılık.** Ağırlıkların (0.5/0.2/0.3) varyasyonu ve betweenness örnekleme k parametresi üzerinde duyarlılık analizleri, sıralamanın kararlı olduğunu göstermektedir (ayrıntılar: `robustness_risk.json`).

6 Yeniden Üretilebilirlik

Çalışma ortamı. Notebook tabanlı analiz (`analysis/analysis.ipynb`); Python 3, NetworkX, pandas, numpy, matplotlib/seaborn. Yalnızca not defteri üzerinden çalıştırma desteklidir.

Veri ve ön bellek. Top-N listesi `ecosyste.ms/NPM Search/npms.io` birleşik akışından; bağımlılıklar NPM registry üzerinden toplanır ve disk ön belleği ile hızlandırılır.

Parametreler. Betweenness örnekleme $k \approx 200$; metrikler min-max ile ölçeklenir; ağırlıklar $(w_{in}, w_{out}, w_{btw}) = (0.5, 0.2, 0.3)$.

Çıktılar. `results/` altında CSV/JSON ve tüm görseller üretilir; L^AT_EX makale `academic/` altında derlenir.

7 Sınırlılıklar ve Gelecek Çalışmalar

İndirme-temelli Top-1000 çekirdek, uzun kuyrukta kalan paketleri dışarıda bırakır; gelecekte kayan pencere ve ekosistemler-arası (PyPI, Cargo) karşılaştırmalar planlanmaktadır. Betweenness örnekleme hatası azaltımı ve kullanım yoğunluğu için daha zengin sinyallerin (örgütsel, bakım) entegrasyonu hedeflenmektedir.

8 Sonuç

Popülerlik ve yapısal merkezîyet, indirime dayalı çekirdekte *Bileşik Risk Skoru* ile birleştirildiğinde, hem tespit hatları hem de politika/bütünlük mekanizmaları için eyleme dönük *öncelik listeleri* üretmektedir. Deneysel sağlamlık analizleri, BRS'in sistemik riski yordama gücünü doğrulamaktadır.

Kaynakça

- [1] Wyss, E. (2025). A New Frontier for Software Security: Diving Deep Into npm.
- [2] Jaisri, P.; Reid, B.; Kula, R. (2024). A Preliminary Study on Self-Contained Libraries in the NPM Ecosystem.
- [3] Yu, S. (2024). Accurate and Efficient SBOM Generation for Software Supply Chain Security.
- [4] Ohm, M.; Plate, H.; Sykosch, A.; Meier, M. (2020). Backstabber’s Knife Collection: A Review of Open Source Software Supply Chain Attacks.
- [5] Rahman, I.; Zahan, N.; Magill, S.; Enck, W.; Williams, L. (2024). Characterizing Dependency Update Practice of NPM, PyPI and Cargo Packages.
- [6] Hastings, T. G. (2024). Combating Source Poisoning and Next-Generation Software Supply Chain Attacks Using Education, Tools, and Techniques.
- [7] Wang, M.; Wu, P.; Luo, Q. (2023). Construction of Software Supply Chain Threat Portrait Based on Chain Perspective.
- [8] Liu, C.; Chen, S.; et al. (2022). Demystifying Vulnerability Propagation via Dependency Trees in npm.
- [9] Dependency Analysis for Software Licensing and Security. (PDF: academic/09- ...)
- [10] Dependency Practices for Vulnerability Mitigation. (PDF: academic/10- ...)
- [11] Detection of Software Supply Chain Attacks in Code Repositories. (PDF: academic/11- ...)
- [12] Empirical Study on Dependency-Based Attacks in Node.js. (PDF: academic/12- ...)
- [13] Practical Software Supply Chain Security. (PDF: academic/13- ...)
- [14] Malicious Package Detection in NPM and PyPI using a Single Model. (PDF: academic/14- ...)
- [15] Malicious Package Detection using Metadata Information. (PDF: academic/15- ...)
- [16] Node package manager’s dependency network robustness. (PDF: academic/16- ...)
- [17] On the Feasibility of Cross-Language Detection of Malicious Packages in npm and PyPI. (PDF: academic/17- ...)
- [18] On the Impact of Security Vulnerabilities in the npm and RubyGems Dependency Networks. (PDF: academic/18- ...)
- [19] Practical Automated Detection of Malicious npm Packages. (PDF: academic/19- ...)
- [20] Small World with High Risks. (PDF: academic/20- ...)
- [21] Software Supply Chain Security. (PDF: academic/21- ...)
- [22] Studying Dependency Maintenance Practices through Mining NPM. (PDF: academic/22- ...)
- [23] Supporting Detection via Unsupervised Signature Generation. (PDF: academic/23- ...)
- [24] Ladisa, P.; Şahin, M.; Ponta, S. E.; Rosa, M.; Martinez, M.; Barais, O. (2023). The Hitchhiker’s Guide to Malicious Third-Party Dependencies.
- [25] Oldnall, E.-R. (2017). The Web of Dependencies: A Complex Network Analysis of the NPM.
- [26] Imtiaz, N. (2023). Toward Secure Use of Open Source Dependencies.
- [27] Vaidya, S. (2022). Towards Ensuring Integrity and Authenticity of Software Repositories.
- [28] Duan, R.; Alrawi, O.; Kasturi, R. P.; Elder, R.; Saltaformaggio, B.; Lee, W. (2020). Towards Measuring Supply Chain Attacks on Package Managers.
- [29] Zheng, X.; Chen, W.; Wang, S.; Zhao, Y.; Gao, P.; Zhang, Y.; Wang, K.; Wang, H. (2024). Towards Robust Detection of OSS Supply Chain Poisoning (OSCAR).
- [30] Shcherbakov, M.; Moosbrugger, P.; Balliu, M. (2021). Unveiling the Invisible: Prototype Pollution Gadgets via Dynamic Taint.