الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

جامعة– ميلة –

المحاضرة الرابعة لمادة: تصميم شبكات اللوجستيك بالذكاء الاصطناعي

موجّهة لطلبة الماستر مالية و تجارة دوليّة

عنوان المحاضرة: نماذج شبكات اللوجستيك وتحليل تدفق السلع والمعلومات

مقدمة:

الشبكة اللوجستية (Logistics Network) هي **منظومة مترابطة** تتألف من عمليات وموارد وبنى تحتية وأفراد، تُعنى بتخطيط وتنفيذ ومراقبة تدفق المنتجات والمعلومات والخدمات من **نقطة المنشأ إلى الوجهة النهائية** . الهدف الأساسي لهذه الشبكة هو ضمان وصول البضائع إلى المستهلكين **في الوقت المناسب** مع **تحسين استخدام الموارد وتقليل التكاليف** .تلعب الشبكات اللوجستية دورًا حيويًا في نجاح سلاسل الإمداد الحديثة، حيث يُعتبر كفاءة الشبكة عاملًا حاسمًا في قدرة الشركات على تلبية طلبات العملاء بسرعة وفاعلية. وفي بيئة الأعمال العالمية اليوم، أصبحت الشبكات اللوجستية **ركيزة أساسية** لتعزيز القدرة التنافسية للمؤسسات وضمان استمرارية تدفق السلع عبر الحدود والأسواق المختلفة.

كما يجب التمييز بين مفهومين مهمين اللوجستيات وإدارة سلسلة الإمداد (SCM) تشير إدارة سلسلة الإمداد إلى الشبكة الكبرى التي تدير مجموعة من الأنشطة، بدءًا من استلام المواد الخام من المورد، مرورًا بالتحويل والتصنيع، وانتهاءً بتسليم المنتج النهائي للعميل .إنها منظومة شاملة هدفها تلبية احتياجات العملاء، وإدارة المخاطر، وتحسين مستوى جودة المنتجات .

في المقابل، تمثل اللوجستيات حلقة واحدة في هذه السلسلة الكبرى، حيث تختص بالتخطيط والتحكم في حركة وتخزين السلع والخدمات من نقطة المنشأ إلى وجهتها النهائية .وبالتالي، فإن تصميم شبكة اللوجستيات هو عملية تحديد الهيكل الثابت الذي يدعم هذه الحركة، والذي يشمل تحديد المواقع الاستراتيجية للمنشآت والمستودعات ومراكز التوزيع، وتحديد الطاقة الاستيعابية لكل منها، وتحسين شبكة الخدمات اللوجستية ككل .إن التدفق السلس والفعال للسلع والخدمات من المصدر إلى العميل النهائي هو الهدف الحاسم الذي تحاول هذه الشبكات تحقيقه.

ما الفرق بين الخدمات اللوجستية وإدارة سلاسل الإمداد والتوريد؟

غالباً ما يتم الخلط بين مصطلحي إدارة سلسلة الإمداد والخدمات اللوجستية، وبعد كل منهما فن وعلم إدارة تدفق البضائع والخدمات ففي بعض الأحيان، يستخدم كلا المصطلحين بالتبادل. يقول البعض أنه لا يوجد فرق بينهما، وأن إدارة سلاسل الإمداد هي الخدمات اللوجستية (الجديدة).

ما يعرف بإدارة سلاسل الإمداد و التوريد في الولايات المتحدة يعرف أكثر بإسم إدارة اللوجستيات في أوروبا، وفقاً لمدونة PLS Logistics Services ، وهي شركة إدارة لوجستية في ولاية بنسلفانيا.

عندما طُرح السؤال في مقالة Inbound Logistics تباينت الإجابات بناءً على وظائف سلسلة الإمداد والتوريد

أو اللوجستيات التي تم التعامل معها بشكل محترف؛ فكانت الإجابات كما يلي:

•**قال** وين جونسون من American Gypsum: " لا يوجد فرق اليوم".

•**قال** مايكل كيربي من مراكز التوزيع الوطنية: "تشتمل إدارة سلاسل الإمداد والتوريد على مجال اللوجستيات، واللوجستيات ما هي إلا عدد من العمليات الفرعية داخل نطاق إدارة سلاسل الإمداد والتوريد "

•**قال** ويليام بيرينز من شركة Associated Transport Systems: " تعد شركات إدارة سلاسل الإمداد والتوريد

بشكل عام مشغلًا يتبع لطرف ثالث يدير الحركة الإجمالية للمنتج سواء الصادر أو الوارد منها"

تم تصنيف التدفقات في سلسلة التوريد إلى ثلاثة أنماط:

✓ **تدفقات المواد والخدمات Material & Service flows**

وهي تدفقات تمثل حركة المواد الأولية والخدمات من الموردين باتجاه العملاء مرورًا بالمصنعين، وهذا يسهم في

تخفيض الزمن الازم لتوفير المواد اللازمة للإنتاج، والذي يلعب دورًا مهماً في تخفيض مستويات المخزون؛ مما يؤثر إيجاباً في التكاليف بتخفيضها.

✓ **التدفقات النقدية Cash flows**

وهي تدفقات باتجاه عكسي من العملاء إلى الموردين، وتمثل حركة المدفوعات النقدية ثمناً للمواد الأولية.

✓ **تدفقات المعلومات Information flows**

وهي تدفق المعلومات باتجاهين من العملاء إلى الموردين وبالعكس من الموردين للعملاء، وذلك من خلال اشتراك كل من الموردين والعملاء في تصميم المنتج ومكوناته، وهذا يسهم في تقييم أداء أعضاء سلسلة التوريد بما يوفره من معلومات عن واجبات كل عضو من أعضاء سلسلة التوريد؛ مما يؤثر إيجاباً في جودة المنتج.

أهمية الشبكات اللوجستية في سلاسل الإمداد :

تتمتع الشبكات اللوجستية بعدة فوائد استراتيجية تجعلها عنصرًا جوهريًا في سلاسل الإمداد الحديثة:

- **خفض التكاليف** :الشبكة المصممة بكفاءة تساعد على تقليل تكاليف النقل والتخزين وإدارة المخزون من خلال تحسين مسارات الشحن وعمليات الدمج وزيادة كفاءة استخدام الموارد. هذا ينعكس إيجابًا على **أسعار المنتجات** وقدرة الشركة على المنافسة.

- **تحسين خدمة العملاء** :سرعة التسليم والالتزام بمواعيد الوصول يعززان رضى العملاء. تضمن الشبكة الجيدة **تقليل التأخيرات** وتوفير المنتجات في المكان والزمان المطلوبين، مما يؤدي إلى تعزيز الثقة ولولاء العملاء.
- **المرونة والتكيف** :الشبكات المرنة تستطيع الاستجابة بسرعة للتغيرات في الطلب أو اضطرابات التوريد. الشبكة المصممة بذكاء تمكن الشركات من **إعادة توجيه التدفقات** والتأقلم مع تقلبات الأسواق أو الأزمات الطارئة بكفاءة.
- **التوسع العالمي** :مع تزايد العولمة، تمكن الشبكات اللوجستية الفعالة الشركات من **الوصول إلى أسواق جديدة** ودعم العمليات الدولية عبر ربط الموردين بالعملاء في مناطق متعددة بشكل موثوق.
- **الاستدامة والمسؤولية** :تساعد استراتيجيات الشبكات الخضراء على تقليل البصمة الكربونية عبر تحسين مسارات النقل واستخدام وسائل شحن مستدامة وتقليل النفايات. أصبحت الاستدامة عنصرًا متناميًا في تصميم الشبكات نظرًا لتأثيرها على السمعة وتقليل الهدر.

باختصار، تمثل شبكة اللوجستيات **العصب المحرك** لسلسلة الإمداد، إذ تدعم التدفق السلس للبضائع والمعلومات بشكل متكامل. الشبكة المصممة والمدارة جيدًا تحقق **كفاءة تشغيلية عالية** وتضمن تحقيق التوازن بين الكلفة والخدمة، مما ينعكس إيجابًا على أداء الشركة وقدرتها التنافسية.

أنواع نماذج شبكات اللوجستيك:

يمكن تصنيف شبكات اللوجستيك وفقًا لطبيعة التدفقات واتجاهها إلى عدة أنواع أساسية، من أبرزها:

- **شبكات التوزيع (Distribution Networks):** وهي الشبكات التقليدية **لتوزيع المنتجات من المنتجين إلى المستهلكين** .تضم هذه الشبكات مجموعة مترابطة من مرافق التخزين (مثل المخازن والمستودعات) ووسائل النقل التي تسهّل إيصال السلع من المصانع إلى العملاء النهائيين . غالبًا ما تتألف شبكة التوزيع من عدة **مستويات** (مستودعات مركزية وإقليمية ومحلية) بهدف إيصال المنتج بكفاءة إلى الأسواق المختلفة. شبكة التوزيع تعمل كنظام وسيط بين المُصنّع والعميل النهائي، حيث يتم **تخزين المنتجات ونقلها تدريجيًا** عبر العقد (مثل مراكز التوزيع) إلى أن تصل إلى نقاط البيع أو المستخدم الأخير. يعتمد تصميم شبكات التوزيع على عوامل مثل مواقع الطلب، وتكاليف النقل، وأوقات التسليم المطلوبة لتحقيق أفضل تغطية خدمية بأقل تكلفة ممكنة.
- **شبكات التجميع (Collection Networks):** يُقصد بها الشبكات التي يكون اتجاه تدفق السلع فيها **من أطراف متعددة باتجاه مركز محدد** .على عكس شبكات التوزيع التي تنقل البضائع من منشأ مركزي إلى وجهات متعددة، تقوم شبكات التجميع **بتجميع المواد أو المنتجات من مصادر موزعة ونقلها إلى نقطة مركزية لمعالجتها** أو استخدامها. يظهر هذا النوع من الشبكات في حالتين رئيسيتين (1) :**التوريد الوارد (Inbound Logistics)** مثل جمع المواد الخام أو المكونات من العديد من الموردين إلى مصنع أو مركز تصنيع (2) .**جمع المرتجعات والنفايات** :مثل تجميع المنتجات المستعملة أو الفائضة من مواقع متعددة (محلات، مستهلكين، نقاط تجميع) ونقلها إلى مركز لإعادة التصنيع أو إعادة التدوير.

تهدف شبكات التجميع إلى **تحقيق وفورات الحجم** عبر دمج شحنات صغيرة من مصادر مختلفة في شحنة أكبر، مما يحسّن كفاءة النقل ويقلل التكلفة للوحدة المنقولة. من الأمثلة عليها شبكة **جمع الحليب من المزارع** إلى معمل الألبان، أو شبكة جمع الطرود من فروع شركة شحن إلى المركز اللوجستي الرئيسي. هذه الشبكات تتطلب تخطيطًا دقيقًا لمسارات الجمع وجدولة ملائمة لضمان وصول المواد في الوقت المناسب وبحالة جيدة.

- **الشبكات العكسية (Reverse Logistics Networks):** وتعرف أيضًا بـ **لوجستيات المرتجعات**، وهي مسؤولة عن **التدفق العكسي للبضائع** من المستهلكين عودةً إلى المنشأ أو نقاط مخصصة. تشمل اللوجستيات العكسية جميع العمليات المتعلقة **باستعادة المنتجات والمواد المستخدمة من العملاء** بهدف إما **إعادة استخدامها أو إعادة تدويرها أو التخلص منها بشكل سليم** .أي يتم التعامل مع هذه المواد المرتجعة كمدخلات ذات قيمة بدل رميها كنفايات. تعد الشبكة العكسية مكملةً لشبكة التوزيع الأمامية، حيث تتضمن مسارات خاصة **لإرجاع المنتجات** (مثل السلع المعيبة أو غير المرغوبة) من نقاط الاستهلاك إلى مخازن الإرجاع أو مراكز الصيانة أو مرافق إعادة التصنيع. تتسم الشبكات العكسية بتحديات خاصة مثل **عدم تيقن حجم وتوقيت المرتجعات** وجودة المواد المسترجعة، إضافة إلى الحاجة لتنسيق عمليات عكسية معقدة تشمل النقل والفحص والتخزين وإعادة التوزيع. رغم ذلك، تلعب هذه الشبكات دورًا متزايد الأهمية في تحسين **استدامة** العمليات عبر استعادة القيمة من المنتجات المستعملة وتقليل الفاقد، كما تسهم في تعزيز رضى العملاء من خلال سياسات إرجاع فعّالة.

ملاحظة : هناك نماذج أخرى متفرعة من هذه الشبكات أو مزيج بينها، مثل **الشبكات المغلقة الحلقة-Closed) Loop Networks)** التي تجمع بين التدفقات الأمامية والعكسية في منظومة واحدة متكاملة لتحقيق الاستخدام الأمثل للموارد. كما تختلف الشبكات باختلاف الصناعة؛ فمثلًا في التجارة الإلكترونية تظهر شبكات توزيع فائقة السرعة (التوصيل المباشر للمنازل)، وفي الصناعات الثقيلة قد تبرز شبكات تجمع بين النقل البري والبحري والجوي لتحقيق أفضل تغطية.

طرق تحليل تدفق السلع في الشبكات:

تحليل تدفق السلع (Goods Flow Analysis) هو جوهر تصميم الشبكات اللوجستية، إذ يمكّن من فهم كيفية تحرك المنتجات عبر العقد المختلفة واكتشاف الاختناقات وتحسين الكفاءة. هناك عدة أساليب وأدوات مستخدمة في تحليل تدفقات السلع، من أهمها:

- **النمذجة الرياضية (Mathematical Modeling):** تعتمد على بناء **نماذج رياضية كمية** لتمثيل تدفق المواد عبر الشبكة، وتستخدم تقنيات بحوث العمليات لتحسين هذه التدفقات. من أبرز أمثلة النماذج الرياضية **نماذج تدفق الشبكة (Network Flow Models)** التي تمثل الشبكة كرسوم بيانية (عقد تمثل المرافق، وحواف تمثل طرق النقل) مع محددات مثل الطاقة الاستيعابية والتكاليف. يمكن تحويل مسائل تخطيط الشبكة إلى مسائل **برمجة خطية أو خطية مختلطة** .على سبيل المثال، يُستخدم **البرمجة الخطية المختلطة (MILP)** بشكل شائع لتصميم شبكات لوجستية (بما في ذلك

الشبكات العكسية) بهدف تحديد المواقع المثلى للمرافق وتخصيص التدفقات بأقل تكلفة ممكنة ضمن القيود المتاحة. توفر هذه النماذج حلولًا مثلى أو شبه مثلى لمسائل مثل *مشكلة تحديد موقع المستودعات وتخصيص الطلب*، *ومشكلة النقل متعددة المصادر والأهداف*، *ومشكلة التدفق الأعظمي/الأدنى تكلفة*، وغيرها. باستخدام هذه النماذج، يمكن تحليل سيناريوهات مختلفة (كنمو الطلب أو تغير تكاليف النقل) ورؤية تأثيرها على تدفق السلع في الشبكة.

مثال بسيط: لنفترض شبكة لوجستية بسيطة مكونة من **مستودعين** يزودان **سوقين** بالسلع. المستودع (A) لديه قدرة إمداد تبلغ 50 وحدة، والمستودع (B) لديه 60 وحدة متاحة. على الجانب الآخر، يطلب السوق 1 كمية 40 وحدة، ويطلب السوق 2 كمية 70 وحدة (المجموع 110 وحدة، وهو يساوي إجمالي العرض لضمان التوازن). يوجد مساران للنقل من كل مستودع إلى كل سوق مع تكاليف مختلفة لكل وحدة كما يلي:

- تكلفة النقل من A إلى السوق 1 هي 2 (مثلاً 2 دولار لكل وحدة)، وإلى السوق 2 هي 4 لكل وحدة.
- تكلفة النقل من B إلى السوق 1 هي 3، وإلى السوق 2 هي 1 لكل وحدة.

من\إلى	السوق 1 طلب 40	السوق 2 طلب 70	عرض المستودع
المستودع A عرض 50	تكلفة للوحدة = 2	تكلفة للوحدة = 4	50 وحدة
المستودع B عرض 60	تكلفة للوحدة = 3	تكلفة للوحدة = 1	60 وحدة
إجمالي الطلب	**40**	**70**	**110**

بحل هذه المشكلة الصغيرة (سواء يدويًا بأبسط الطرق أو باستخدام خوارزمية)، نجد الحل الأمثل التالي لتحقيق أقل تكلفة:

- **من المستودع A:** إرسال 40 وحدة إلى السوق 1، و 10 وحدات إلى السوق 2 .وبذلك تم استخدام كامل الـ50 وحدة المتاحة في A
- **من المستودع B:** إرسال 0 وحدة إلى السوق 1، و 60 وحدة إلى السوق 2 .تم استخدام كامل الـ60 وحدة في B لتزويد السوق 2.

هذا التوزيع يُلبي الطلب بالكامل (40 للسوق1 و 70 للسوق2) دون فائض أو نقص. يمكننا التحقق من التكلفة الكلية: من A إلى 40 وحدة للسوق1 بتكلفة 2 للوحدة = 80، ومن A للسوق 02 تم ارسال 10 وحدات بتكلفة 4*10 = 40، ومن B إلى السوق الثاني 60 وحدة بتكلفة 1دولار للوحدة = 60دولار و B لم يرسل شيء للسوق1 .(مجموع التكلفة = 80 + 40 + 60 = دولار **180**(للسوقين). أي توزيع آخر ستزيد فيه التكلفة. هكذا سمحت **النمذجة الرياضية** باختيار خطة النقل المثلى بسهولة. في مسائل أكبر، تُستخدم برامج تحليلية (مثل برمجيات التخصيص الخطي) لحساب الحل الأمثل بسرعة حتى لو كان عدد المستودعات أو الأسواق أكبر بكثير.

- **تحليل المسارات (Path Analysis):** يركّز على دراسة **المسارات التي تسلكها المنتجات** من نقطة إلى أخرى عبر الشبكة، بهدف إيجاد المسارات الأكثر كفاءة وفعالية من حيث الزمن أو التكلفة. غالبًا ما يستفيد هذا التحليل من **خوارزميات الشبكات** في علم الحاسوب، مثل **خوارزمية أقصر مسار** (Shortest Path)لتحديد المسار الأدنى كلفة أو زمنًا بين نقطتين، و**خوارزمية أقصى تدفق** Max-Flow لحساب أقصى كمية يمكن نقلها من خلال الشبكة من مورد إلى مستهلك عند وجود حدود للسعة. يفيد تحليل المسارات في **تخطيط طرق النقل** (Route Planning) لشحن البضائع، حيث يحدد الطرق المثلى للشاحنات أو وسائل النقل الأخرى لتغطية الوجهات المختلفة بكفاءة. كما يُستخدم في **تحليل سيناريوهات بديلة**؛ مثلًا ماذا يحدث لتدفق السلع لو تم إغلاق طريق أو تعطل مركز توزيع؟ من خلال تحليل المسارات، يمكن اقتراح مسارات بديلة وضمان استمرارية الخدمة. يكمّل تحليل المسارات النماذج الرياضية عبر توفير **رؤية تفصيلية** للمسالك التي تتخذها السلع وكيفية تفاعلها مع البنية التحتية اللوجستية (كالطرق والموانئ وخطوط الشحن).

مثال بسيط:

مثال 1 (أقصر مسار): افترض أن لدينا ثلاث مدن تشكّل مثلثًا طرقياً: مدينة A متصلة مباشرة بالمدينة B عبر طريق طوله 10 كم، ومدينة A متصلة بالمدينة C بطريق طوله 5 كم، ومدينة C متصلة بالمدينة B بطريق طوله 4 كم. إذا أرادت شاحنة الانتقال من A إلى B ، فهناك مساران ممكنان: إما الطريق المباشر A⟶B (بتكلفة 10 كم)، أو الطريق غير المباشر .A⟶C⟶B طول المسار غير المباشر = 5 من A إلى C + من C إلى B= 4 كم أي بمجموع 09 كلم. هنا يتبين أن المسار A⟶C⟶B أقصر. باستخدام خوارزميات مثل خوارزمية دايكسترا (Dijkstra)يمكن للبرنامج العثور على هذا الطريق الأقصر تلقائيًا حتى في شبكات أكبر وأكثر تعقيدًا. في تطبيقات الخدمات اللوجستية مثل أنظمة تخطيط المسار، يتم حساب أقصر وأسرع الطرق لتقليل زمن السفر واستهلاك الوقود، مما يخفض التكلفة ويحسّن كفاءة التوصيل.

مثال 2 (أقصى تدفق): تخيّل شبكة نقل بسيطة بين مستودع مصدر S ووجهة نهائية T (مثلاً مدينة تحتاج الإمدادات) يوجد فيها مساران مختلفان لنقل البضائع:

المسار الأول: طريق مباشر من S إلى T بسعة قصوى 50 وحدة (يمكن أن تمثّل مثلاً 50 شاحنة في اليوم كحد أقصى على هذا الطريق).

المسار الثاني: طريق بديل يمر عبر محطة وسيطة لنسمها C هذا المسار مكوّن من وصلتين S⟶C :بسعة 50، ثم C⟶T بسعة 30 وحدة. هنا السعة المحدودة هي 30 في الوصلة الثانية.

على الرغم من أن المسار الثاني يبدأ بطاقة 50 وحدة في قسمه الأول، إلا أنه لا يمكن استخدام أكثر من 30 منه وصولاً إلى T بسبب عنق الزجاجة عند .C⟶T بالتالي، أقصى ما يمكن إرساله عبر هذا المسار هو 30 وحدة مهما أرسلنا 50 من S إلى C فلن يمر إلى T سوى 30 .(المسار الأول يستطيع حمل 50 وحدة كاملة إلى T إذن الحد الأقصى للتدفق من S إلى T عبر هذين المسارين معًا سيكون 80 وحدة في اليوم (50 عبر الطريق المباشر + 30

عبر الطريق غير المباشر). هذا المثال يبين مبدأ عامًا هو أن التدفق الأقصى عبر الشبكة يحدده أصغر (أضيق) مجموع سعات لفصل المصدر عن المصب. أي مجموعة الوصلات التي إذا أزيلت أو تعطلت تفصل المستودع S عن الوجهة T ، وهذه المجموعة تمثّل الاختناق أو عنق الزجاجة. في مثالنا، الوصلة C⟶T بسعة 30 تشكّل عنق زجاجة يقلص التدفق الكلي الممكن. يمكن تصور الأمر كشبكة أنابيب مياه من خزان إلى مدينة؛ سيقتصر الحد الأقصى للمياه التي تصل للمدينة على أصغر سعة موجودة في سلسلة الأنابيب أو المسارات البديلة، وهو بالضبط مفهوم الاختناق (Bottleneck).

- **التوازن في الشبكات (Network Equilibrium):** يُقصد به دراسة حالة **الاتزان** التي تصل إليها تدفقات السلع في الشبكة عند توازن العرض والطلب، أو عند توزيع التدفقات بحيث لا يمكن تحسين تكلفة أو زمن النقل لأي شحنة دون الإضرار بأخرى. تمثل هذه الفئة من النماذج **مقاربة تحليلية مستعارة من نماذج توازن المرور** في شبكات الطرق، حيث يحقق التدفق توازنًا) وفق مبدأ واردوب Wardrop عندما لا يستطيع أي مسار تقليل كلفته دون تغيير في الظروف. في سياق اللوجستيات، قد يظهر مفهوم التوازن مثلًا في **توازن التوزيع**، حيث تتوزع الشحنات بين مسارات أو منافذ مختلفة بحيث تتساوى كلفة (أو زمن) الوحدة marginal cost عبرها. كذلك هناك نماذج *التوازن الفعال* System Optimal vs. User Equilibrium للنظر في الفرق بين ما هو أمثل كليًا لشبكة الإمداد (تكلفة إجمالية دنيا) وبين ما هو خيار كل كيان بشكل مستقل. هذه النماذج التوازنية غالبًا ما تُصاغ باستخدام **نظرية الألعاب** أو **متباينات المتجهات (Variational Inequalities)** لتمثيل قرارات العديد من الجهات الفاعلة (موردين، ناقلين، عملاء) وتفاعلاتهم ضمن الشبكة. على الرغم من كونها نماذج معقدة نوعًا ما، إلا أنها تساعد في فهم *ديناميكية* التدفقات في الأسواق وسلاسل الإمداد الكبيرة حيث يوجد **تنافس أو تضارب مصالح** بين عدة شبكات نقل أو مزودي خدمات لوجستية.

مثال بسيط: لنفترض أن لدينا طريقين من مصنع إلى سوق: طريق (1) وطريق (2). كلا الطريقين يصبح أبطأ عندما يزدحم بالشاحنات (أي أن زمن النقل يزداد بازدياد عدد الشاحنات – هذا يمثل الكلفة الحدية المتزايدة مع التدفق). لنعرّف دوال زمن الرحلة (أو الكلفة) لكل طريق بشكل مبسّط خطيًا:

زمن الطريق (1) = 2 + 0.1* x، حيث x هو عدد الشاحنات المرسلة عبر هذا الطريق. (أي يبدأ الزمن من ساعتين عند عدم وجود زحام، ويزداد بمقدار 0.1 ساعة لكل شاحنة إضافية بسبب الازدحام).

زمن الطريق (2) = 1 + 0.4* y، حيث y هو عدد الشاحنات على هذا الطريق. (هذا الطريق بديل أقصر في حالة عدم الزحام – ساعة واحدة فقط – لكنه أضيق وبالتالي يزداد زمنه بشكل أكبر 0.4 ساعة لكل شاحنة إضافية).

لنقل لدينا 10 شاحنات يجب إرسالها في الساعة من المصنع إلى السوق. كيف نوزعها بين الطريقين لتحقيق التوازن؟ في حالة التوازن يجب أن يكون زمن الرحلة على الطريقين المستخدمين متساويًا؛ وإلا سيغيّر بعض السائقين طريقهم إلى الطريق الأسرع. نفرض أنه يتم استخدام كلا الطريقين (سنكتشف التقسيم الأمثل)، فنحل المعادلة بجعل الزمنين متساويين مع شرط: $x + y = 10$

$$2 + 0.1*x = 1 + 0.4*(10 - x)$$

الحل يوضح أنه في حالة التوازن سيتم إرسال 6 شاحنات عبر الطريق (1)، و4 شاحنات عبر الطريق (2) (لأن 10 - 6 = 4). لنحسب زمن الرحلة في هذه الحالة: زمن الطريق (1) = 2 + 0.16 = 2 + 0.6 = 2.6 ساعة، وزمن الطريق (2) = 1 + 0.44 = 1 + 1.6 = 2.6 ساعة أيضًا. نلاحظ أن الزمنين متساويان الآن عند ~2.6 ساعة، أي تحقق شرط التوازن على الطرق المستخدمة. أي إعادة توزيع للشاحنات سيجعل زمن أحد الطريقين أقل من الآخر مما يدفع الشاحنات للعودة لهذا التوزيع المتوازن. في هذه الحالة لم يُستخدم طريق واحد فقط (تم استخدام الطريقين)، ولو كان هناك طريق ثالث بزمن أعلى (~مثلاً 3 ساعات) فلن يتم استخدامه على الإطلاق لأنه غير منافس في التوازن. من الأمثلة الواقعية لهذا المبدأ هو توزيع حركة المرور على الطرق الموازية: يستمر السائقون باختيار الطريق الأسرع حتى تتساوى أزمنة الرحلة تقريبًا على الطرق البديلة بسبب الازدحام. النتيجة النهائية (خاصة عند أعداد كبيرة من المركبات) هي حالة توازن استخدامي حيث جميع المسارات المستخدمة لديها نفس زمن الرحلة.

من المهم ملاحظة أن هذا توازن من وجهة نظر المستخدمين (User Equilibrium) وقد لا يحقق الحد الأدنى المطلق لزمن أو كلفة الرحلات في النظام ككل، ولكنه الحالة التي تستقر عندها الأمور إذا كان كل مُرسِل أو سائق يتصرف بشكل مستقل باحثًا عن مصلحته الخاصة. في شبكات الخدمات اللوجستية، يمكن أن يظهر هذا المفهوم عند توزيع الشحنات بين عدة مزوّدين أو خطوط نقل بحيث تتوازن الكلفة الحدية – على سبيل المثال، قد توزَّع البضائع بين طريق بري وطريق سككي إذا كانت الكلفة الحدية متساوية عند تقسيم معين للكميات، مما يعني أنه لا يوجد حافز لتحويل شحنة من وسيلة إلى أخرى عند هذا التقسيم.

- **تحليل السعة والاختناقات (Capacity & Bottleneck Analysis):** يركز هذا المنهج على **تقييم قدرة الشبكة** على نقل كميات معينة من السلع وتحديد **نقاط الاختناق** التي قد تحدّ من التدفق. يتم فحص كل رابط (طريق أو خط شحن) وكل عقدة (مستودع، ميناء، مركز فرز) في الشبكة لمعرفة الحد الأقصى من البضائع الذي يمكنه مناولته خلال فترة زمنية محددة (يومية، أسبوعية،...إلخ). ثم تُقارن هذه القدرات مع حجم التدفقات الفعلي أو المتوقع. أي عنصر تكون **نسبة استخدامه عالية جدًا** (مثلاً يتجاوز 80% من سعته بانتظام) يُعتبر **مرشحًا ليشكل اختناقًا** قد يؤدي إلى تأخير أو زيادة تكاليف. على سبيل المثال، قد يُظهر التحليل أن **طاقة استيعاب أحد المستودعات** أقل من حجم البضائع الواردة إليه، مما يسبب تراكماً وتأخيراً في التوزيع. يساعد تحليل السعة على اتخاذ قرارات مثل **توسعة مرافق التخزين** أو **زيادة عدد الشاحنات** أو **فتح مسارات إضافية** قبل تفاقم المشكلة. كما يمكن استخدامه في التخطيط **لحالات الذروة الموسمية**، إذ يتم اختبار ما إذا كانت الشبكة تستطيع التعامل مع ارتفاع مفاجئ في الطلب دون انهيار الخدمة. غالبًا ما تُستخدم المحاكاة الحاسوبية هنا لتجربة تدفقات بأحجام مختلفة وتحديد أين تظهر الاختناقات
- .

مثال بسيط :لنفترض مستودع توزيع يستطيع تجهيز وإرسال **100طرد في اليوم كحد أقصى** (هذه سعة المستودع من حيث معالجة الطلبات وتحميل الشاحنات). إذا استقبل المستودع طلبات من الفروع بمعدل **120طردًا في اليوم** بشكل مستمر، فهذا يتجاوز سعته اليومية بـ20 طرد. في **اليوم الأول** سيعالج 100 طلب ويتبقى **20طلب معلق** لم يتم تلبيتها (تتأخر لليوم التالي). في **اليوم الثاني** ستصل 120 طلب جديد بالإضافة للـ20 المؤجلة، المجموع 140 طلب مطلوب معالجتها. يعالج المستودع 100 منها ويتبقى الآن **40طلبًا متراكمًا** مؤجلًا. يوضح الجدول التالي هذا التراكم عبر بضعة أيام:

اليوم	الطلبات الواردة	المعالجة (السعة 100)	الطلبات المتراكمة
1	120	100كاملة	20متأخرة
2	120	100كاملة	40 = 20 + 20متأخرة
3	120	100كاملة	60 = 20 + 40متأخرة
4	120	100كاملة	80 = 20 + 60متأخرة
...	...	...	...

نرى أن **عنق الزجاجة** هنا هو قدرة المستودع على المعالجة (100 في اليوم). نتيجة تجاوز الطلب لهذه القدرة هي **تراكم مستمروتأخيرات متزايدة** يومًا بعد يوم. إذا استمر الحال بدون علاج، سيزداد التراكم بشكل خطير وربما تنهار الخدمة الزمنية (تأخيرات طويلة جدًا). الحل قد يكون **زيادة السعة** (مثلاً إضافة مناوبة عمل لزيادة المعالجة إلى 120 يوميًا) أو **تقليل الطلب/توزيعه**)مثلاً تحويل بعض الفروع لمستودع آخر.(

على نحو مشابه في الطرق: إذا كان طريق ما يمكن أن يستوعب 100 شاحنة في الساعة من غير ازدحام، وحاولنا دفع 120 شاحنة في الساعة عليه، ستبدأ **طوابيرالانتظار** بالتشكل. قد تعني طوابير الشاحنات هذه أن بعض الشاحنات تنتظر ساعة إضافية لدخول الطريق. بمرور الوقت إذا لم ينخفض التدفق، قد تطول الطوابير أكثر. حل الاختناق المروري يكون إما **بزيادة سعة الطريق** (توسعة الطريق أو زيادة الحارات مثلاً أو **إدارة الطلب**)كإيجاد مسارات بديلة لبعض الشاحنات، أو توزيع حركة المرور زمنياً.

- **المحاكاة الحاسوبية (Simulation)**: بالإضافة إلى الطرق التحليلية الصارمة، تُعتبر المحاكاة أداة قوية لتحليل تدفق السلع. من خلال بناء نموذج محاكاة يمثل الشبكة (قد يكون نموذجًا **وكيلًا-Agent Based** أو **حدثيًا منفصلًاDiscrete-Event** ، يمكن **تمثيل تدفق البضائع بشكل ديناميكي** عبر الزمن. تقوم المحاكاة بتمرير آلاف أو ملايين الوحدات من المنتجات عبر الشبكة الافتراضية لمراقبة الأداء تحت ظروف مختلفة (مثل معدلات طلب متنوعة، أو أعطال عشوائية في جزء من الشبكة). ميزة المحاكاة أنها تأخذ بالاعتبار **عوامل عدم اليقين** والتقلب في التدفقات والوقت، ما يصعب دمجه في النماذج الرياضية الجامدة. عبر المحاكاة، يمكن قياس مؤشرات الأداء مثل **زمن العبور** (Lead Time) و**مستويات المخزون** في المواقع المختلفة و**معدلات استخدام الموارد**، كما يمكن اختبار **سيناريوهات افتراضية** كتغيير تصميم الشبكة أو سياسات التشغيل ورؤية أثرها قبل التطبيق الفعلي. تُستخدم

نتائج المحاكاة لتكملة التحليلات الرياضية وضبط الخطط بحيث تحقق مستويات خدمة أعلى وتجنب المخاطر غير المرئية في التحليل الساكن.

مثال بسيط (محاكاة مصغّرة): سنبني سيناريو افتراضي لمستودع يقوم يوميًا بإرسال البضائع إلى متجر عبر شاحنة واحدة. سعة الشاحنة 10 وحدات يوميًا كحد أقصى. الطلب اليومي في المتجر متغير (عشوائي ضمن نطاق معين) – سنفترض قيم محددة لكل يوم للتوضيح. أيضًا يوجد احتمال لحدوث عطل في الشاحنة يمنعها من التوصيل في ذلك اليوم (وسنفترض حدوث عطل في أحد الأيام كتجربة). سنراقب مخزون الطلبات المتأخرة (الباك لوج) إن لم تكفِ الشاحنة لتلبية كل الطلب.

افتراضات السيناريو عبر أسبوع (8 أيام) كما يلي:

اليوم 1: الطلب 8 وحدات، لا عطل.

اليوم 2: الطلب 12 وحدة، لا عطل (يتجاوز سعة الشاحنة).

اليوم 3: الطلب 10 وحدات، الشاحنة تعطّلت هذا اليوم (لا توصيل).

اليوم 4: الطلب 6 وحدات، لا عطل.

اليوم 5: الطلب 10 وحدات، لا عطل.

اليوم 6: الطلب 6 وحدات، لا عطل.

اليوم 7: الطلب 8 وحدات, لا عطل.

اليوم 8: الطلب 5 وحدات, لا عطل.

تراكم الطلبات المؤجلة	الكميات المرسلة	الطلب	اليوم
0 لا تأخير	8 تم تلبية الجميع	8	**1**
2 لم تُشحن، تتأجل للغد	10سعة الشاحنة	12	**2**
12 = 10 + 2 متراكمة	0 **عطل الشاحن**	10	**3**
8 = 10 - 6 + 12متراكمة	10 الشاحنة تنقل المتاح من الطلب المتراكم	6	**4**
8 = 10 - 10 + 8متراكمة	10تنقل 10 من 18 طلب	10	**5**
4 = 10 - 6 + 8متراكمة	10تنقل 10 من 14 طلبًا	6	**6**
2 = 10 - 8 + 4متراكمة	10تنقل 10 من 12 طلبًا	8	**7**
0 = 7 - 5 + 2متراكمة	7تنقل كل الطلب المتبقي	5	**8**

تفسير نتائج المحاكاة: في اليوم 1 تم تلبية كل الطلب بسهولة. اليوم 2 ظهرت أول مشكلة سعة حيث الطلب 12 وتستطيع الشاحنة نقل 10 فقط؛ إذًا بقيت 2 متأخرة. في اليوم 3 حدث **تعطّل مفاجئ** فلم يتم نقل أي شيء، فتراكمت 12 وحدة (الـ2 السابقة + طلب اليوم 3 كله 10). هذا يمثل **حدثًا اضطرابيًا** simulation للنظام (عطل مركبة) وتأثيره كان واضحًا بارتفاع كبير في الأعمال غير المنجزة. ابتداءً من اليوم 4، عادت الشاحنة للعمل وحاولت تقليل المتأخرات: أرسلت 10 وحدات (سعتها القصوى)، فلبّت كل طلب اليوم 4 (6 وحدات) بالإضافة إلى 4 وحدات من المتراكم السابق، وبقي 8. مع الأيام 5-7، ظلت الشاحنة كل يوم تحمل 10 وحدات وتحاول سد الطلب الحالي مع ما تبقى من **الباك لوج**. نلاحظ أن **رغم استمرار قدوم الطلب يوميًا، نجح النظام في تقليص التأخير تدريجيًا** من 12 وحدة بعد العطل إلى 0 بنهاية اليوم 8، لأن الطلب في بعض الأيام كان أقل من السعة مما أتاح للشاحنة نقل وحدات إضافية من المتراكم. خلال هذه المحاكاة المصغّرة رأينا مؤشرين مهمين هما: **الباك لوج (الطلبات المتأخرة)** يومًا بيوم، و**استخدام السعة** (حيث كانت الشاحنة مشغولة بالكامل تقريبًا كل يوم إلا اليوم الأخير). مثل هذه النتائج تسمح لمدير اللوجستيات بتقييم **مستوى الخدمة**. فمثلاً، بعد العطل استغرق الأمر 5 أيام للعودة إلى الوضع الطبيعي وخدمة جميع الطلبات المتأخرة – هل هذا مقبول؟ وإذا كان غير مقبول يمكن تجربة سيناريوهات أخرى في المحاكاة: مثل ماذا لو توفرت شاحنة احتياطية عند التعطل (سيقل التأخير كثيرًا)، أو ماذا لو ارتفع الطلب إلى 15 وحدة يوميًا في المتوسط؟ المحاكاة تستطيع بسهولة اختبار هذه **الفرضيات المتنوعة**.

من خلال هذا المثال البسيط يتضح **دور المحاكاة**: فهي تعطي نظرة زمنية على تدفق السلع تحت التقلبات وعدم اليقين. بينما النماذج الرياضية التحليلية قد تعطينا **حلاً ثابتًا مثالياً** في ظل افتراضات مبسطة وثابتة، تسمح المحاكاة بالنظر إلى **سيناريوهات أكثر واقعية** حيث **الطلب عشوائي أو الأعطال محتملة**. وبالفعل تعتمد شركات اللوجستيات الكبيرة على برامج المحاكاة لفهم سلوك سلاسل الإمداد خاصتها تحت مختلف الظروف (مثل **ذروة المواسم**، أو **تأخيرات الموردين**، أو **تغيّر سياسات المخزون**). (المحاكاة هنا أشبه بـ"*اختبار قيادة*" للنظام اللوجستي في عالم افتراضي يسمح باكتشاف نقاط الضعف قبل وقوعها فعليًا، وكذلك تقييم فعالية الحلول المقترحة بدون مخاطرة على العمليات الحقيقية.

باستخدام هذه الأساليب مجتمعة، يحصل مصممو شبكات اللوجستيات على **رؤية شاملة** لكيفية تدفق السلع عبر النظام، ويمتلكون أدوات كمية لاتخاذ قرارات مبنية على البيانات حول **تصميم الشبكة وتحسينها** باستمرار.

تحليل تدفق المعلومات في الشبكات اللوجستية:

لا يقتصر عمل الشبكات اللوجستية على **تدفق السلع المادية** فحسب، بل هناك أيضًا تدفق **معلوماتي موازٍ** لا يقل أهمية. تدفق المعلومات يشمل جميع البيانات التي ترافق حركة السلع وتمكّن من إدارتها بفاعلية، مثل أوامر الشراء، ومستويات المخزون، وحالة الشحنات، ومعلومات التتبع، والفواتير، وغيرها. في هذه المحاور سنناقش طبيعة تدفق المعلومات ودوره، وكيفية تتبع الشحنات وتكامل البيانات عبر الشبكة:

- **العلاقة بين تدفق السلع وتدفق المعلومات** :ترتبط التدفقات المادية والمعلوماتية في سلسلة الإمداد بعلاقة وثيقة تكاملية. فعلى امتداد رحلة المنتج من المورد إلى المستهلك، يتم تبادل كميات كبيرة من المعلومات **باتجاهين** بين مختلف الأطراف. على سبيل المثال، يقوم العملاء بإرسال **طلبات الشراء والتوقعات** صعودًا إلى الموردين، بينما يرسل الموردون والتجار **إشعارات الشحن والفو اتيروتحديثات حالة التسليم** نزولًا إلى العملاء. هذا التدفق المعلوماتي ذو اتجاهين (من المورد إلى العميل وبالعكس) يتضمن بيانات مثل عروض الأسعار، وأوامر الشراء، وحالة الطلب أثناء نقله، والإشعارات المالية، وحتى شكاوى العملاء واستفساراتهم .من خلال هذه التغذية الراجعة المستمرة، يتم **مزامنة العرض والطلب** :حيث تمكن معلومات الطلب الواردة من الزبائن المصنعين من **تعديل الإنتاج** وجدولة الشحنات، وتُمكّن معلومات المخزون والشحن الواردة من الموردين تجار التجزئة من **إدارة مخزونهم** وتحديث العملاء حول حالة طلباتهم. لذا، **نجاح الشبكة اللوجستية معتمد بشدة على انسيابية ودقة المعلومات** المتبادلة؛ أي قصور أو تأخير في تدفق المعلومات يمكن أن يؤدي إلى اختلالات كبيرة مثل زيادة المخزون (بسبب طلبات غير معروفة) أو تأخيرات في التسليم (بسبب سوء تنسيق).
- **أنظمة تتبع الشحنات (Tracking Systems):** واحدة من أهم تطبيقات تدفق المعلومات هي **متابعة مسار البضائع في الزمن الحقيقي** عبر الشبكة. أنظمة التتبع تسمح للشركات والعملاء على حد سواء بمعرفة **موقع الشحنة وحالتها في كل لحظة** منذ انطلاقها من المنشأ حتى وصولها إلى الوجهة. تعتمد هذه الأنظمة على تقنيات متعددة مثل **أجهزة الاستشعار** و**نظام GPS** و**إنترنت الأشياء(IoT)** ، حيث تزود هذه الأدوات كمًا هائلًا من **البيانات اللحظية** حول موقع المركبات أو الحاويات، وظروف البضاعة (مثل درجة الحرارة للرصد الحراري في سلسلة التبريد)، وحتى حالة المركبة أو الطريق، يتم تجميع البيانات من هذه التقنيات عبر مختلف نقاط العبور في سلسلة الإمداد، ثم إرسالها إلى منصات مركزية لمعالجتها وتحليلها. النتيجة هي الحصول على **رؤية شاملة في الوقت الفعلي** لمكان وجود المنتجات، مما يمكّن من اتخاذ قرارات سريعة عند حدوث انحرافات (مثل إعادة توجيه شحنة لتجنب ازدحام مروري أو إخطار عميل بتأخير متوقع). بالإضافة إلى ذلك، يساهم التتبع الفعال في **رفع مستوى ثقة العملاء** من خلال تمكينهم من متابعة شحناتهم (مثال: رقم تتبع البريد السريع) ومعرفة موعد التسليم المتوقع. من جهة الشركات، تُستغل بيانات التتبع أيضًا في **تحليل الأداء**؛ فمثلاً يمكن قياس أزمنة النقل الفعلية مقابل المخطط، وتحديد الاختناقات الزمنية، وبالتالي **تحسين الجداول والمسارات** باستمرار.
- **تكامل البيانات و أنظمة المعلومات** :لتحقيق الفائدة القصوى من تدفق المعلومات، يجب **تكامل بيانات الشبكة اللوجستية** عبر جميع مراحل سلسلة الإمداد. وهذا يعني ربط أنظمة المعلومات لدى مختلف الأطراف (موردين، مصنعين، موزعين، ناقلين، عملاء) بحيث يجري **تبادل المعلومات تلقائيًا وبشكل آني** .على سبيل المثال، **منصات إدارة سلسلة الإمداد SCM** أو **أنظمة تخطيط موارد المؤسسة (ERP)** تربط بين أوامر المبيعات، وجداول الإنتاج، ومستويات المخزون، وخطط التوزيع، بحيث أي تحديث في جزء ما ينعكس فورًا على بقية الأجزاء. أيضًا، **التبادل الإلكتروني للبيانات (EDI)** هو بروتوكول قديم لكنه شائع يتيح للشركات تبادل مستندات مثل أوامر الشراء والفواتير إلكترونيًا بمعيار موحد، مما يقلل من الأخطاء البشرية ويسرّع المعاملات. التكامل الجيد للبيانات يضمن أن **جميع الأطراف تعمل على "نسخة واحدة من الحقيقة** – "أي نفس الأرقام والمعلومات – مما يقلل

التعارض وسوء الفهم. نتيجة لذلك، يمكن تحقيق **رؤية متكاملة** للشبكة بالكامل، تُعرف بمفهوم **شفافية سلسلة الإمداد** .**(Supply Chain Visibility)** هذه الشفافية تمكّن المدراء من مراقبة العمليات بشكل كلي واتخاذ قرارات مستنيرة. على سبيل المثال، إذا كان لدى الشركة نظرة موحدة على مستويات المخزون في جميع المخازن والمحال، يمكنها **إعادة توزيع المنتجات** بسرعة من مواقع فائض إلى مواقع نقص، أو إصدار أوامر إعادة إنتاج قبل حصول عجز، وبالتالي تجنب ظاهرة *"السوط"* (Bullwhip Effect)الناجمة عن غياب معلومات دقيقة . إضافة إلى ذلك، تسمح البيانات المتكاملة بتطبيق تقنيات تحليلية متقدمة مثل **تحليلات البيانات الضخمة ولوحات المؤشرات اللحظية** لدعم **اتخاذ القرارات الاستر اتيجية** والتكتيكية (مثل أين نبني مخزنًا جديدًا؟ ما هو مستوى المخزون الأمثل لمنتج معين؟).

- **الأمان وسيطرة الوصول إلى المعلومات** :مع تحول المعلومات إلى عنصر مركزي في الشبكات اللوجستية، تبرز أهمية الحفاظ على **سرية ودقة** هذه المعلومات عبر الشبكة. يجب اعتماد **نظم حماية إلكترونية** لحماية تبادل البيانات بين الشركاء (مثل التشفير ووسائل التحقق الثنائية) لضمان عدم تعرضها للاختراق أو التعديل. كما ينبغي تطبيق **مبدأ الصلاحيات** بحيث يتاح لكل طرف الاطلاع فقط على ما يلزمه من المعلومات. فعلى سبيل المثال، شركة النقل قد تحتاج إلى بيانات الشحنة والمواعيد، لكنها لا تحتاج بالضرورة إلى الاطلاع على تكاليف المنتج أو هامش ربح التاجر. كذلك يتعين وجود خطط للتعامل مع **تعطل الأنظمة** أو انقطاع الاتصالات، حتى لا يؤثر ذلك على تدفق السلع؛ مثل استخدام قنوات اتصال احتياطية أو أنظمة **تعافي فوري** للبيانات. كل ذلك يأتي لضمان أن تدفق المعلومات، شأنه شأن تدفق السلع، يتمتع **بالانسيابية والموثوقية** اللازمة لدعم شبكة لوجستية عالية الأداء.

باختصار، المعلومات في الشبكات اللوجستية هي بمثابة **الجهاز العصبي** الذي يربط كل أجزاء السلسلة ببعضها. ومن خلال إدارة فعّالة لتدفق المعلومات – عبر التتبع اللحظي والتكامل الشامل للبيانات – يصبح **تدفق السلع أكثرسلاسة وموثوقية**، وتتمكن الشركات من **التحكم والسيطرة** على شبكاتها بمرونة واستباقية أعلى.

أمثلة و اقعية مبسطة لتصميم وتحليل شبكة لوجستية:

لفهم كيفية تصميم وتحليل شبكات اللوجستيات، سنستعرض مثالًا مبسطًا لسلسلة إمداد تتضمن عدة مراحل :**من المصنع إلى المستودعات إلى المتاجر** .يساعد هذا المثال في توضيح القرارات المطلوبة في التصميم، وكيفية تحليل تدفق السلع والمعلومات عبر الشبكة.

فرضية المثال :لنفترض شركة تصنيع إلكترونيات استهلاكية تنتج أجهزة معينة في مصنع مركزي. تريد هذه الشركة توزيع منتجاتها إلى **عدة مناطق جغرافية** .الخيارات المتاحة هي إنشاء **مراكز توزيع إقليمية (Regional Distribution Centers)**تقوم بتجميع المنتجات من المصنع ثم توريدها إلى مجموعة من متاجر التجزئة المحلية.

معالم السيناريو:

- يوجد **مصنع مركزي** واحد (نقطة الأصل) يقع في موقع إنتاج رئيسي حيث يتم تصنيع الأجهزة.
- هناك **3مراكز توزيع إقليمية** مقترحة (غرب، شرق، شمال مثلاً)، لتغطية مختلف المناطق. هذه المراكز ستكون مخازن تخزن فيها المنتجات قبل توزيعها محليًا.
- يوجد **عشرات من متاجر التجزئة** المنتشرة في المدن المختلفة ضمن كل إقليم، حيث يتسوق المستهلكون النهائيون. هذه المتاجر تستلم البضائع من مركز التوزيع الإقليمي القريب.

تصميم الشبكة (Network Design) :

في مرحلة التصميم، يجب على الشركة اتخاذ قرارات استراتيجية مثل:

1. **عدد ومواقع مراكز التوزيع** :تحديد عدد المراكز الإقليمية وموقع كل منها. القرار قد يعتمد على توازن بين تكلفة فتح وتشغيل مركز توزيع إضافي مقابل توفير تكاليف النقل وتقليص زمن التوصيل. في مثالنا، ربما تظهر **تحليلات الموقع** أن وجود 3 مراكز يغطي الطلب بكفاءة؛ مثلًا مركز في الغرب لخدمة المدن الغربية، وآخر في الشرق لخدمة الشرقية، وثالث في الشمال يخدم المناطق الشمالية. يمكن استخدام نماذج **مشكلة تحديد الموقع (Location-allocation)** لاختيار المدن المثلى لإقامة هذه المراكز بحيث تقل المسافة الإجمالية المقطوعة لتوصيل جميع الطلبات.
2. **تخصيص المتاجر لكل مركز توزيع** :بعد تحديد مواقع المراكز، يتم تقرير أي المتاجر ستتزوّد من أي مركز. يُراعى في ذلك قرب المتجر من المراكز وتكاليف النقل. مثلاً، يتم تقسيم المتاجر إلى ثلاث مجموعات، كل مجموعة مرتبطة بأقرب مركز جغرافيًا لتقليل مسافة الشحن. هذا التخصيص يمكن نمذجته كمشكلة **تخصيص زبائن إلى مرافق**، تراعى فيها أيضًا قيود مثل قدرة المركز (كم متجر يمكنه خدمتها، أو حجم الطلب الإجمالي من تلك المتاجر).
3. **تخطيط التدفق وكميات الشحن** :نحدد كمية البضائع التي ستتدفق شهريًا من المصنع إلى كل مركز توزيع (بناءً على حجم الطلب في الإقليم الذي يخدمه)، وكذلك الكميات الدورية من كل مركز إلى المتاجر التابعة له. يتم هذا بالاستناد إلى **توقعات الطلب** في كل منطقة (مثلاً، إقليم الغرب يستهلك 40% من الإنتاج، الشرق 35%، الشمال 25%). بناءً على ذلك، ترتّب **شاحنات النقل** لنقل حصة الغرب من المصنع إلى مركز الغرب، وهكذا. هنا تُستخدم **خطة النقل المثلى** التي قد تعتمد على نموذج رياضي لتقليل تكلفة النقل مع احترام قدرة كل شحنة وكل مخزن.
4. **جدولة الإرساليات** :تحدد الشركة **مواعيد دورية للشحن** لضمان توفر المنتج دون انقطاع. مثلاً، شاحنات تنطلق من المصنع إلى كل مركز توزيع **أسبوعيًا** بكميات محددة، ومن كل مركز توزيع إلى المتاجر ربما **يوميًا** أو عدة مرات في الأسبوع حسب حجم الطلب. يجب تصميم الجدول بحيث لا ترتفع المخزونات كثيرًا (لتقليل التكلفة) ولا يحدث نقص في المتاجر. قد تتبنى الشركة استراتيجية *"السحب Pull"* حيث ترسل المتاجر طلبات إعادة تزويد دورية بناءً على المبيعات، أو استراتيجية *"الدفع Push"* حيث يرسل المركز كميات مقدرة سلفًا.

تحليل تدفق السلع عبر الشبكة:

بعد تصميم الشبكة بهذا الشكل، يمكننا تحليل تدفق السلع خطوة بخطوة:

- **من المصنع إلى المراكز**: كل أسبوع، يقوم المصنع بشحن الكميات المطلوبة إلى كل مركز توزيع. لنفترض أن مصنع الإلكترونيات ينتج 10,000 وحدة شهريًا. بحسب نسب التوزيع، يشحن مثلاً 4,000 وحدة شهريًا إلى مركز الغرب (على دفعات أسبوعية 1,000 وحدة)، و3,500 إلى مركز الشرق، و2,500 إلى مركز الشمال. يتم نقل هذه الشحنات بواسطة **شاحنات طويلة المدى** أو قطارات شحن إن توفرت بنية تحتية لذلك. التحليل هنا يشمل **التحقق من سعة النقل** (هل يكفي عدد الشاحنات؟ هل هناك أسابيع ذروة تحتاج شاحنات إضافية؟)، و**تكلفة النقل** لكل مسار (مثلاً تكلفة النقل إلى الشمال قد تكون أعلى لبعد المسافة). أيضًا نراقب **زمن العبور**؛ فإذا كان مركز الشمال يبعد 2 يوم نقل، فيجب أخذ ذلك في الاعتبار بتقديم الشحنات أو زيادة المخزون الاحتياطي هناك.
- **داخل مراكز التوزيع**: عند وصول الشحنة إلى المركز الإقليمي، يتم تفريغها وتخزينها مؤقتًا. يقوم **مدير المخزن** بتحليل الطلبات الواردة من المتاجر (أو تنبؤ الطلب حسب التاريخ) لترتيب **إعادة التعبئة**. التحليل يشمل التأكد من أن **المخزون المتوفر** يغطي طلب المتاجر لحين وصول الشحنة التالية من المصنع، وإلا قد يستلزم الأمر **شحن عاجل إضافي** أو نقل بعض المخزون من مركز آخر قريب إذا أمكن (هنا تأتي أهمية المعلومات والتنسيق). كما يتم رصد **مستوى المخزون الأدنى** في المركز لتحديد متى يعيد طلب دفعة جديدة من المصنع (نقطة إعادة الطلب).
- **من المراكز إلى المتاجر**: بناءً على جداول التسليم، تنطلق مثلاً **شاحنات توزيع محلية** كل صباح من المركز الإقليمي محملة بالطلبيات الموجهة لكل متجر في نطاقها. قد تتبع الشاحنة **مسارًا معينًا** يمر على عدة متاجر لتسليم جزء من الحمولة لكل متجر (مسار الحلقة). هنا يظهر تطبيق **تحليل المسارات** لضمان أن مسار الشاحنة يغطي جميع المتاجر في أقل زمن ممكن ودون تجاوز حمولة الشاحنة. يتم حساب **مسافات الرحلة** وزمنها، مع مراعاة أوقات خدمة عند كل متجر (وقت التفريغ). الهدف هو عودة الشاحنة إلى المركز بنهاية اليوم بعد إتمام التسليم. تحليل التدفق على هذا المستوى المحلي يكشف لنا مثلاً: متوسط زمن التوصيل لمتاجر الغرب هو 4 ساعات من وقت خروجها من المركز، وأن **المتاجر البعيدة على أطراف الإقليم** تتلقى بضائعها في نهاية المسار، مما قد يؤثر على توافر المنتج مبكرًا في يوم العمل. إن كان هذا التأخير مؤثرًا (مثلاً متاجر الشمال الغربي تتأخر بالتزود حتى الظهيرة)، قد نفكر في **إعادة تقسيم المناطق** أو **زيادة عدد الشاحنات** بحيث يكون هناك أكثر من مسار لتغطية المنطقة في وقت أقصر.
- **عودة المعلومات والتدفقات العكسية**: خلال هذه العمليات، لا ننسى تدفق المعلومات. فالمتاجر ترسل **بيانات المبيعات اليومية** ونواقص المخزون إلى مراكز التوزيع وربما مباشرة للمصنع. هذه المعلومات تسمح بتحديث خطط الإنتاج والتوزيع باستمرار. أيضًا، أي **مرتجعات من المتاجر** (كمنتجات معيبة أو فائضة) تُعاد عبر نفس الشبكة لكن بالاتجاه المعاكس: تجمعها الشاحنة في رحلات العودة من المتاجر إلى المركز، ومن ثم تُشحن من المراكز إلى المصنع أو إلى مركز إرجاع مركزي. في مثالنا، لو اكتشف متجر أن بعض الأجهزة فيها خلل، يعيدها في صندوق إلى مركز التوزيع مع أقرب

شاحنة عائدة، ومن هناك تُجمع وترسل إلى قسم الصيانة في المصنع أو إلى مستودع خاص بالمرتجعات. هذه **الدائرة العكسية** يجب أن تدار بكفاءة أيضًا لتقليل الزمن الذي تستغرقه المرتجعات (لإما إصلاحها أو خروجها من المخزون).

نتائج التحليل والاعتبارات:

من خلال هذا المثال، تظهر عدة اعتبارات تصميمية يمكن استنباطها:

- يجب التحقق من أن **الطاقة الاستيعابية** لكل جزء كافية: المصنع يمكنه إنتاج ما يكفي لتزويد الجميع، المستودعات لديها مساحة تخزين تغطي التقلبات في الطلب، وأساطيل النقل (شاحنات أو غيرها) تكفي لنقل الكميات ضمن الجداول الزمنية المحددة. إذا وجدت أي نقطة اختناق، مثل عدم كفاية قدرة مصنع لتغطية ذروة الطلب في إقليم معين، يجب **تعزيز الموارد** (زيادة ورديات الإنتاج أو الاستعانة بمورد خارجي مساعد).
- **تكلفة الشبكة الإجمالية** =تكلفة تشغيل المستودعات + تكلفة النقل (مصنع⟵مراكز + مراكز⟵متاجر) + تكلفة المخزون. هذه التكلفة يجب أن تبقى أدنى ما يمكن مع تحقيق مستوى الخدمة المطلوب. التحليل قد يظهر أن مركزًا معينًا تكاليفه مرتفعة (ربما لخدمة منطقة قليلة الطلب)، وهنا يمكن التفكير في حلول مثل إلغائه والاعتماد على مركز آخر مع زيادة الشحن المباشر أو استخدام موزع محلي طرف ثالث بدلاً من مركز خاص.
- **مستوى الخدمة للعملاء (المتاجر والمستهلكين)** :من التحليل نستنتج زمن التوريد لكل متجر وعدد مرات التزويد أسبوعيًا ومستوى المخزون. إذا كانت بعض المتاجر تعاني من *نقص متكرر* أو *فائض* مزمن، يجب تعديل **سياسة التزويد** (مثلاً زيادة مرات التوصيل لمتاجر عالية الطلب، أو خفض الكميات الدورية لمتاجر الطلب فيها أقل من المتوقع). الهدف النهائي أن تصل المنتجات إلى الأرفف **قبل نفادها** لضمان رضا العملاء النهائيين في المتجر.

بشكل عام، يوضح المثال كيف يتطلب تصميم شبكة لوجستية **موازنة دقيقة** بين عدة عوامل: التكلفة، والسرعة، والمرونة. ومن خلال التحليل الدوري لبيانات الأداء (أزمنة التسليم، تكاليف النقل، مستويات المخزون، الخ) يمكن **تحسين تصميم الشبكة وتشغيلها باستمرار** .فعلى سبيل المثال، قد تقرر الشركة بعد فترة فتح مركز توزيع رابع إذا نما الطلب في منطقة جديدة، أو تغيير شركة النقل المستخدمة لمسار معين لتقليل التكلفة. هكذا تظل عملية **تصميم وتحليل الشبكة عملية مستمرة** تتكيف مع تغييرات البيئة والسوق.

دور الذكاء الاصطناعي في تحسين تصميم وتحليل شبكات اللوجستيك:

مع تعاظم تعقيد شبكات الإمداد الحديثة وتدفق كميات هائلة من البيانات عبرها، ظهر **الذكاء الاصطناعي (Artificial Intelligence, AI)**كأداة واعدة لتعزيز قدرات تصميم وتحليل الشبكات اللوجستية. يوفر الذكاء الاصطناعي (وتقنياته الفرعية مثل تعلّم الآلة والتحسين الذكي) إمكانات جديدة لمعالجة البيانات والتنبؤ واتخاذ القرارات بشكل يفوق الأساليب التقليدية. فيما يلي أبرز المجالات التي يلعب فيها الذكاء الاصطناعي دورًا متناميًا:

- **خوارزميات التنبؤ بالطلب :(Demand Forecasting)** يعد التنبؤ الدقيق بالطلب المستقبلي خطوة أساسية لتخطيط أي شبكة إمداد. استُخدمت تاريخيًا أساليب إحصائية تقليدية للتنبؤ (كالتنبؤ بالسلاسل الزمنية)، لكن الذكاء الاصطناعي قدم تحسينات كبيرة عبر خوارزميات تعلّم الآلة القادرة على **استيعاب كم هائل من العوامل** والتنبؤ بأنماط الطلب بشكل أدق. على سبيل المثال، يمكن لنماذج **الشبكات العصبية** أو **أشجار القرار المعززة** تحليل بيانات تاريخية للمبيعات، وتأثيرات العوامل الخارجية (كالمواسم والعطلات والعروض الترويجية)، وحتى بيانات وسائل التواصل الاجتماعي أو البحث على الإنترنت للتنبؤ بالطلب على منتج ما في الأسابيع أو الأشهر القادمة. هذه الدقة المحسّنة في التنبؤ تنعكس مباشرةً على كفاءة الشبكة: إذ تُمكّن الشركات من **تخطيط الإنتاج والتوزيع المسبق** وفق الطلب المتوقع، وتلافي حالات نقص المخزون أو فائضه. وقد أظهرت تجارب شركات عالمية بالفعل نجاحًا ملحوظًا؛ على سبيل المثال، تمكنت شركة **بيبسيكو (PepsiCo)** من استخدام الذكاء الاصطناعي في توقع الطلب مما **حسّن دقة توقعاتها بنسبة 10% تقريبًا**، وهذا التحسن الطفيف نسبيًا يوفّر ملايين الدولارات عبر تخفيض التكاليف اللوجستية وتفادي فقد المبيعات الناتج عن عدم توفر المنتجات.
- **التحسين الذكي وتصميم الشبكات :(Intelligent Optimization)** تتضمن هذه الفئة استخدام تقنيات الذكاء الاصطناعي لإيجاد **أفضل تصميم للشبكة** وأفضل خطط تشغيلية ضمن نطاق واسع من الاحتمالات. ففي حين يمكن للنماذج الرياضية التقليدية حل مشاكل محددة ضمن افتراضات مبسطة، يستطيع الذكاء الاصطناعي معالجة **مشاكل معقدة عالية الأبعاد** بشكل أكثر فعالية عبر أساليب مثل **الخوارزميات التطورية (Evolutionary Algorithms)** *كـ الخوارزمية الجينية* **وخوارزمية أسراب الجسيمات** وغيرها، بالإضافة إلى **خوارزميات البحث الموجه (Heuristics)** المحسّنة. تستخدم هذه الأساليب للعثور على حلول قرب-مثلى لمسائل مثل **موقع المرافق** وتخطيط المسارات وتخصيص الموارد عندما تصبح المسألة معقدة جدًا على الحل الدقيق. على سبيل المثال، قد تستخدم شركة ما نظام ذكاء اصطناعي يقيم آلاف السيناريوهات **لتوزيع مرافق التخزين على الخريطة**، آخذاً بالاعتبار بيانات الطلب الحقيقية وتكاليف العقارات والنقل، ليقترح **التوزيع الأمثل للمستودعات** .بالفعل، توفر أنظمة حديثة مدعومة بالAIمقترحات قد تكون غير بديهية ولكن فعّالة، مثل **اقتراح نقل مركز توزيع إلى موقع أقرب لقاعدة عملاء كبيرة** لتقليل زمن التوصيل وتكاليف النقل. هذه الأنظمة تستطيع **محاكاة آلاف السيناريوهات** بسرعة لتقييم تأثير كل تعديل في تصميم الشبكة قبل تنفيذه، مما يعطي صانعي القرار **رؤية واضحة** لتبعات قراراتهم ويؤدي في النهاية إلى شبكة أكثر **مرونة وكفاءة** واستجابة للطلب.
- **تحسين المسارات الديناميكي :(Dynamic Route Optimization)** ذكرت سابقًا أهمية تحليل المسارات في تدفق السلع؛ ومع ظهور الذكاء الاصطناعي، تحسّن مجال **تخطيط مسارات النقل بشكل غير مسبوق** .تستخدم الآن خوارزميات تعلم الآلة ومعالجة البيانات الآنية لتخطيط **مسارات مرنة** لقوافل الشحن (سواء شاحنات توصيل، أو مركبات الخدمات اللوجستية الحضَرية، وحتى السفن والطائرات). يقوم الذكاء الاصطناعي بتحليل **مجموعة واسعة من العوامل في الزمن الحقيقي** مثل حالة المرور، والطقس، وأحجام الطلب الجديدة الواردة، وحتى حالة المركبة وأداء السائق، ليقوم

بإعادة جدولة وتعديل المسارات بشكل فوري عند الحاجة. النتيجة هي خفض زمن التوصيل وتقليل استهلاك الوقود والتكاليف. على سبيل المثال، طبّقت شركة **فيدكس (FedEx)** أنظمة تخطيط مسارات متقدمة مدعومة بالذكاء الاصطناعي مما مكّنها من **تخفيض 700 ألف ميل من المسافات المقطوعة يوميًا** في شبكتها – إنجاز هائل تحقق عبر تجميع الشحنات بطرق أكثر فعالية وإعادة توجيهها تفاديًا للازدحام. وبالإضافة إلى التخطيط المسبق، فإن **التعديل الفوري للمسارات** (dynamic rerouting)أصبح ممكنًا؛ أي إذا وقع حادث في طريق ما أو ازدحم ميناء بشكل غير متوقع، يستطيع النظام اقتراح مسار بديل في لحظتها لضمان استمرار تدفق البضائع دون تأخير كبير. هذه **المرونة اللحظية** التي يوفرها الذكاء الاصطناعي تجعل عمليات النقل أقل عرضة للمفاجآت وأكثر موثوقية.

- **أنظمة دعم القرار ورؤية الشبكة الشاملة** :يتجاوز دور الذكاء الاصطناعي الجانب التشغيلي ليكون بمثابة **مستشار ذكي** لمديري اللوجستيات عبر **أنظمة دعم قرار متقدمة** .تقوم هذه الأنظمة بتجميع البيانات الضخمة من مختلف أجزاء الشبكة (مبيعات لحظية، مستويات مخزون، أوقات تسليم، تكاليف فورية من المزودين، إلخ) ثم **تحليلها واستخراج الرؤى** باستخدام تقنيات .AI على سبيل المثال، يمكن لنظام دعم قرار مدعوم بالذكاء الاصطناعي أن **ينبه المدير إلى بوادر اختناق** قادم (ربما ارتفاع غير اعتيادي في الطلب على منتج في منطقة معينة بالتزامن مع انخفاض المخزون في مستودع تلك المنطقة) ويقترح إجراءات استباقية مثل *تحويل شحنة إضافية لذلك المستودع* أو *زيادة وتيرة الإنتاج لذلك المنتج* .كذلك يمكن لهذه الأنظمة **رصد الأنماط الشاذة** أو المخاطر المحتملة، كأن تكتشف تأخيراً متكرراً من ناقل معين أو تصاعدًا في تكاليف نوع معين من المواد الخام، فترفع الأمر للإدارة لاتخاذ إجراء تصحيحي. إن جمع هذه الرؤى الشاملة يساهم في **رفع مستوى مرونة الشبكة**؛ إذ تصبح القرارات مبنية على **معرفة آنية دقيقة** بدلًا من ردود فعل متأخرة. أشارت إحدى المنصات إلى أن استخدام الذكاء الاصطناعي في **رؤية سلسلة الإمداد** يساعد في **تحسين التواصل** بين جميع الأطراف واتخاذ قرارات أسرع قبل تفاقم المشكلات .علاوة على ذلك، يسهم AI في **إدارة المخاطر اللوجستية** من خلال تحليل ضخم للبيانات التاريخية وتوقع أين يمكن أن تنشأ المشكلات (مثلاً *مخاطر الطقس* على طرق معينة، *اضطرابات سياسية* في منطقة تصنيعية) وتقديم خطط بديلة. بهذا الصدد، يمكن لنظم AI تقييم *آثار سيناريوهات مختلفة* (what-if analysis)على أداء الشبكة، بحيث تكون الشركات مستعدة **بخطط طوارئ** مدروسة لكل احتمال.
- **تعزيز كفاءة المستودعات والعمليات الداخلية** :على الرغم من أن السؤال يركز على تصميم الشبكة وتدفقاتها، إلا أنه يجدر بالذكر أن الذكاء الاصطناعي غيّر أيضًا مشهد العمليات **داخل العقد اللوجستية نفسها** (كمراكز التوزيع والمخازن). فاليوم تنتشر **الروبوتات المدعومة بالذكاء الاصطناعي** في المستودعات للقيام بالفرز والالتقاط وتعبئة الطلبات بسرعة ودقة أكبر بكثير من البشر. كما تعمل خوارزميات **الجدولة الذكية** على إدارة جداول عمل الموظفين وعمليات النقل الداخلي للمواد ضمن المنشأة بحيث يتم **تقليل الزمن الضائع** وتحسين انسياب العمل. هذه الابتكارات تجعل العقد اللوجستية قادرة على التعامل مع **حجم تدفق أكبر** دون زيادة موازية في الموارد البشرية أو الأخطاء، ما يعني تمكين الشبكة ككل من **التوسع بمرونة** .على سبيل المثال، أدت تجارب دمج

الروبوتات وتعلم الآلة في بعض المخازن إلى **زيادة إنتاجية التقاط الطلبات بنسبة 130 %**ورفع دقة المخزون إلى 99.9% وتقليل الحاجة لليد العاملة بنسبة 80%. هذه الأرقام توضح مدى تأثير AI على كفاءة عقد الشبكة والتي تنعكس في النهاية على سرعة وموثوقية التدفق عبر الشبكة.

- **تمكين الاستدامة والابتكار في الشبكات** :أخيرًا، يساهم الذكاء الاصطناعي في تعزيز **استدامة عمليات الشبكة اللوجستية** .فمن خلال قدرته على **تحليل التأثيرات البيئية** وتقييم البصمة الكربونية لمسارات النقل والخيارات المختلفة، يمكن للـ AIمساعدة الشركات في اختيار البدائل **الأكثر صداقة للبيئة** (كاقتراح تحويل بعض الشحنات من النقل الجوي إلى البحري لتقليل الانبعاثات، أو تحسين حمولة المركبات لتقليل عدد الرحلات الفارغة). كذلك، يدعم AI **مبادئ الاقتصاد الدائري** عبر تحسين شبكات اللوجستيات العكسية (مثلاً التنبؤ بكميات المرتجعات وإدارة إعادة التدوير بفعالية). ومع ظهور مفاهيم حديثة مثل **التوأم الرقمي (Digital Twin)** لسلسلة الإمداد، وهو نموذج افتراضي مدعوم بالذكاء الاصطناعي يحاكي الشبكة الواقعية، بات بالإمكان تجربة ابتكارات جديدة (مثل مسارات بديلة أو مصادر توريد مختلفة) في البيئة الافتراضية لقياس المنافع والمخاطر قبل تطبيقها فعليًا. هذا يُسرّع من **وتيرة الابتكار في تصميم الشبكات** ويضمن أن التحسينات تتم بناءً على أدلة رقمية قوية.

في المحصلة، أضحت تقنيات الذكاء الاصطناعي بمثابة **عامل تمكين أساسي** لجيل جديد من الشبكات اللوجستية **الأكثر ذكاءً ومرونة** .إنها تسمح بالتعامل مع التعقيد المتزايد لسلاسل الإمداد من خلال رؤية أشمل وتوقع استباقي وقدرة على التكيف اللحظي. الشركات التي تبنت AI في إدارة شبكاتها شهدت بالفعل **تحسينات ملموسة** في دقة التخطيط وتقليل التكلفة ورفع جودة الخدمة. ومع استمرار التطور في خوارزميات التعلم الآلي ومعالجة البيانات، سيزداد دور الذكاء الاصطناعي أهمية، ليصبح **العقل الرقمي** الذي يوجه عمليات شبكات اللوجستيات ويرتقي بها نحو مستويات جديدة من الكفاءة والفعالية.

د عبد الحق لفيلف .

جامعة ميلة