نظرية صفوف الانتظار: (Queuing Theory)

اولا: الخلفية النظرية لنظرية صفوف الانتظار: النشأة والتطور: تُعد نظرية صفوف الانتظار أحد الفروع الأساسية في علم بحوث العمليات وعلم الاحتمالات، وقد نشأت في أوائل القرن العشرين استجابة لحاجة عملية ملحّة لفهم كيفية تنظيم وتوزيع الموارد في الأنظمة التي تتعامل مع عدد كبير من العملاء أو العمليات التي تتطلب معالجة متتالية.

بدأت هذه النظرية مع العالم الدنماركي **أولوف هولدجسون إرلاند (A.K. Erlang)** ، الذي يُعتبر الأب المؤسس لهذه النظرية. ففي عام 1909، قام بتطوير أول نموذج رياضي لصفوف الانتظار من خلال دراسته لأنظمة الهواتف في مدينة كوبنهاغن (Copenhagen) ، حيث كان الهدف تقدير أوقات الانتظار وحجم الموارد اللازمة لضمان جودة الخدمة.

بعد ذلك، في خمسينيات القرن العشرين، جاء فرانسيس كيندل (F. Kendall) ليُسهم بتطوير منهجي في هذا المجال من خلال تقديم ما يُعرف بترميز كيندل(Kendall Notation) ، وهو أسلوب منظم لتمثيل خصائص أنظمة صفوف الانتظار (مثل آلية الوصول، آلية الخدمة، عدد الخوادم... إلخ)، مما سهّل توصيف النماذج المختلفة ومقارنتها.

ومن الشخصيات التي تركت بصمتها أيضًا في هذا المجال، إيجور بافلوتشينكو(I. Pavlovich) ، الذي ساهم في توسيع نطاق تطبيق النظرية إلى مجالات مثل النقل والإنتاج الصناعي، وركّز على تحليل أنظمة معقدة متعددة القنوات والمراحل. ومع مرور الوقت، وفي العقود التالية، خصوصًا خلال السبعينيات والثمانينيات، شهدت النظرية توسعًا ملحوظًا، حيث تم تطوير نماذج أكثر تطورًا تتعامل مع أنواع متعددة من العملاء ونظم خدمة متعددة المراحل، وأصبحت بذلك حجر أساس في تصميم أنظمة الخدمة الحديثة، بدءًا من شبكات الاتصال وصولًا إلى مراكز خدمة العملاء.

ومع دخولنا القرن الحادي والعشرين، ومع التطور السريع في الذكاء الاصطناعي وتقنيات تعلم الآلة، بدأت نظرية صفوف الانتظار تأخذ بُعدًا جديدًا. فاليوم، تُستخدم خوارزميات ذكية للتنبؤ بأنماط الوصول، وتحسين توزيع الموارد في الزمن الحقيقي، وحتى محاكاة سلوك العملاء باستخدام نماذج معقدة تتعلم من البيانات، هذه التقنيات الحديثة لا تُستخدم فقط لفهم النظام، بل لتطويره ديناميكيًا نحو تحسينات لم تكن ممكنة في السابق. وهكذا، فإن دمج الذكاء الاصطناعي مع هذه النظرية التقليدية قد يسمح لنا ببلوغ مستويات غير مسبوقة من الكفاءة والمرونة، ويفتح الباب لتطبيقات مستقبلية بلا حدود..

ثانيا: أهم التطبيقات العملية لنظرية صفوف الانتظار

تُستخدم نظرية صفوف الانتظار في تحليل وتحسين أداء الأنظمة التي تتعامل مع تدفق مستمر من "العملاء" أو "الطلبات" التي تحتاج إلى خدمة، وتُعد أداة فعالة في التخطيط والتشغيل في عدد كبير من القطاعات. وفيما يلي أبرز المجالات التي تستفيد من هذه النظرية:

1. **أنظمة الاتصالات:** في شبكات الهاتف المحمول والإنترنت، تُستخدم نماذج صفوف الانتظار لتقدير عدد القنوات أو الموارد المطلوبة لضمان جودة الخدمة وتقليل التأخير، خصوصًا في أوقات الذروة.
2. **شبكات النقل والمطارات:** في المطارات ومحطات القطارات، تساعد هذه النظرية في تحسين حركة الركاب من خلال توقع الازدحام وتحديد العدد الأمثل من موظفي الأمن أو موظفي خدمة العملاء، بما يقلل وقت الانتظار ويحسّن تجربة المسافرين.
3. **إدارة المستشفيات والرعاية الصحية:** في غرف الطوارئ ومراكز الرعاية، تساعد نماذج صفوف الانتظار في تنظيم تدفق المرضى، وتحديد عدد الأطباء أو الأسرة المطلوبة، بما يضمن تقديم الخدمة في الوقت المناسب وتقليل فترات الانتظار الحرجة.
4. **خطوط الإنتاج والصناعة**

   تُستخدم هذه النظرية لتحسين كفاءة العمليات الصناعية، مثل تقليل أوقات التوقف في خطوط الإنتاج، وتحسين ترتيب المراحل الإنتاجية لضمان سلاسة العمل، وهو أمر بالغ الأهمية في الصناعات الثقيلة مثل تصنيع السيارات أو الإلكترونيات.
5. **مراكز الاتصال وخدمة العملاء**

   في مراكز الدعم الفني وخدمة العملاء، تُستخدم نماذج صفوف الانتظار لتحديد عدد الموظفين المطلوبين في أوقات مختلفة من اليوم، مما يساعد على تقليل وقت الانتظار وتحقيق استجابة سريعة للعملاء.
6. **القطاع البنكي والخدمات المالية**

   تُستخدم هذه النظرية لتخطيط عدد الموظفين أو أجهزة الخدمة الذاتية في البنوك والفروع، بما يساهم في تحسين تجربة العملاء من خلال تقليل الطوابير وتسريع المعاملات.

ثانيًا: أهم التطبيقات العملية لنظرية صفوف الانتظار: تُستخدم نظرية صفوف الانتظار في تحليل وتحسين أداء الأنظمة التي تتعامل مع تدفق مستمر من "العملاء" أو "الطلبات" التي تحتاج إلى خدمة. وتُعدّ أداة فعّالة في التخطيط والتشغيل في عدد كبير من القطاعات. وفيما يلي أبرز المجالات التي تستفيد من هذه النظرية:

1. **أنظمة الاتصالات** :في شبكات الهاتف المحمول والإنترنت، تُستخدم نماذج صفوف الانتظار لتقدير عدد القنوات أو الموارد المطلوبة لضمان جودة الخدمة وتقليل التأخير، خصوصًا في أوقات الذروة. مع تقدم التكنولوجيا، تم دمج الذكاء الاصطناعي وتحليل البيانات الكبيرة لتحسين تخصيص الموارد بشكل ديناميكي في شبكات الجيل الخامس (5G) وأنظمة الإنترنت الحديثة.
2. **شبكات النقل والمطارات** :في المطارات ومحطات القطارات، تساعد هذه النظرية في تحسين حركة الركاب من خلال توقع الازدحام وتحديد العدد الأمثل من موظفي الأمن أو موظفي خدمة العملاء. كما تُستخدم لتحديد طرق تحسين تدفق الركاب بشكل أكثر كفاءة باستخدام التكنولوجيا الحديثة مثل الأنظمة الذكية لإدارة الحشود، مما يقلل وقت الانتظار ويحسّن تجربة المسافرين.
3. **إدارة المستشفيات والرعاية الصحية** :في غرف الطوارئ ومراكز الرعاية، تساعد نماذج صفوف الانتظار في تنظيم تدفق المرضى، وتحديد عدد الأطباء أو الأسرة المطلوبة، بما يضمن تقديم الخدمة في الوقت المناسب وتقليل فترات الانتظار الحرجة. كما يُستخدم تحليل البيانات الضخمة لتوقع فترات الذروة في الرعاية الصحية والتخطيط بشكل مسبق.
4. **خطوط الإنتاج والصناعة** :تُستخدم هذه النظرية لتحسين كفاءة العمليات الصناعية، مثل تقليل أوقات التوقف في خطوط الإنتاج، وتحسين ترتيب المراحل الإنتاجية لضمان سلاسة العمل. وهي أمر بالغ الأهمية في الصناعات الثقيلة مثل تصنيع السيارات أو الإلكترونيات. بالإضافة إلى ذلك، تُساعد هذه النماذج في تحسين سلاسل التوريد وعمليات التخزين في الصناعات المتقدمة.
5. **مراكز الاتصال وخدمة العملاء** :في مراكز الدعم الفني وخدمة العملاء، تُستخدم نماذج صفوف الانتظار لتحديد عدد الموظفين المطلوبين في أوقات مختلفة من اليوم، مما يساعد على تقليل وقت الانتظار وتحقيق استجابة سريعة للعملاء. مع تطور تقنيات الذكاء الاصطناعي، تم دمج أدوات مثل الدردشة الآلية (Chatbots) لتقليل الضغط على الموظفين وتحسين سرعة الاستجابة.

6. **القطاع البنكي والخدمات المالية :**تُستخدم هذه النظرية لتخطيط عدد الموظفين أو أجهزة الخدمة الذاتية في البنوك والفروع، بما يساهم في تحسين تجربة العملاء من خلال تقليل الطوابير وتسريع المعاملات. في الوقت الراهن، يُستفاد أيضًا من التطبيقات المصرفية عبر الإنترنت والتكنولوجيا المالية (FinTech) لتقليل الحاجة إلى الانتظار في الفروع وتحسين الخدمات المقدمة للعملاء.

ثالثًا: المكونات الأساسية لنظام صفوف الانتظار

تهتم نظرية صفوف الانتظار بدراسة سلوك وأداء الأنظمة التي تتعامل مع تدفق من "العملاء" أو "الوحدات" التي تطلب خدمة ما. وتشمل هذه النظرية مجموعة من المكونات الرئيسية، مثل نمط الوصول، ونوع الخدمة، وطريقة الانتظار، وسعة النظام، بالإضافة إلى التوزيعات الاحتمالية لزمن الوصول وزمن الخدمة، ومقاييس الأداء المختلفة. إن فهم هذه العناصر يُعدّ أساسيًا لتحليل وتصميم أنظمة الطوابير بفعالية، بما يُسهم في تحسين تجربة المستخدم وزيادة كفاءة التشغيل.

أ- **مصدر طالبي الخدمة** "Source of Service Demand" : يختلف مصدر طالبي الخدمة من نظام إلى آخر. ففي بعض الأنظمة يكون المصدر **غير محدود** (infinite)، مثلما هو الحال في البنوك أو المستشفيات أو الأسواق التجارية، حيث يمكن لأي فرد أن يطلب الخدمة في أي وقت. أما في حالات أخرى، فقد يكون المصدر **محدودًا** (finite)، كما في حالة فني صيانة مكلّف بعدد محدد من الآلات، أو ممرضة مسؤولة عن عدد معين من المرضى. وبالتالي، فإن تحديد طبيعة المصدر يُعدّ خطوة أولى مهمة لفهم طبيعة النظام وتحليل أدائه بدقة.

ب- **طول الطابور** "Queue Length" : أحيانا يكون طول الطابور محدودا بمساحة أو عدد مقاعد وكثيرا ما يكون الطول غير محدود فالطابور قد يمتد عبر الطريق المجاور أو عبر السلالم. لاحظ أن طول الطابور يختلف عن مصدر طالبي الخدمة، فالأخير يتعلق بكل من بإمكانهم الذهاب لطلب الخدمة، بينما الأول يتعلق بالمنتظرين داخل مكان تقديم الخدمة في نفس الوقت.

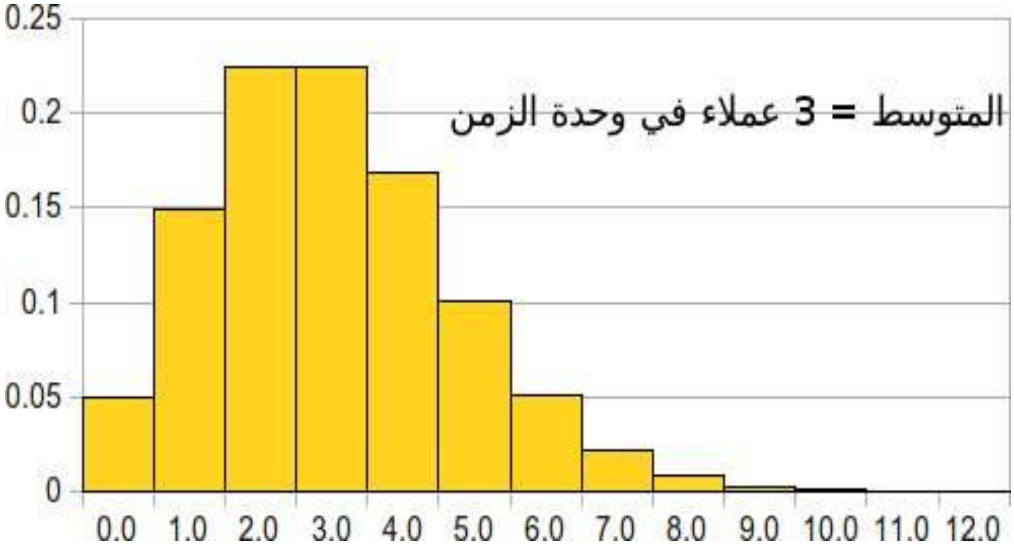
يشير طول الطابور إلى عدد العملاء المنتظرين في النظام للحصول على الخدمة في لحظة معينة. وقد يكون الطابور **محدود الطول**، كما في حالة وجود عدد معين من المقاعد أو مساحة محدودة داخل موقع تقديم الخدمة، أو **غير محدود** عندما لا توجد قيود مادية على عدد المنتظرين، كما قد يحدث في الطوابير التي تمتد خارج المحلات أو على الأرصفة، ومن المهم التمييز بين "مصدر طالبي الخدمة" و"طول الطابور:"

- فالمصدر يتعلق بكل من **يستطيع طلب الخدمة**، سواء حضر أم لا.
- أما الطابور فيتعلق فقط **بمن ينتظر الخدمة حاليًا داخل النظام**.

هذا التفريق ضـروري عند بناء النماذج وتحليل الأداء، لأنه يؤثر في سـعة النظام والاسـتراتيجيات المسـتخدمة لإدارته.

ت- **نظام الطابور** "Queueing System": نظام الطابور يعني طريقة ترتيب العملاء أو النظام الذي بمقتضـاه يحصـل هذا على الخدمة قبل ذاك. هناك أنظمة متعددة وأكثرها شـيوعا هو الخدمة بأسـبقية الحضـور (First Come First Served) بمعنى أن من يأتي أولا يحصـل على الخدمة أولا، ولكن هناك أنظمة أخرى مثل تحديد أولويات الحصـول على الخدمة حسـب خاصـية معينة مثل خطورة الحالة في طوارئ المسـتشـفى أو نوع الخدمة المطلوبة: سـريعة أم عادية. ولكل نظام تطبيقاته ولكن نظام الخدمة بأسـبقية الوصـول هو الأكثر اسـتخداما في نظرية الطوابير.

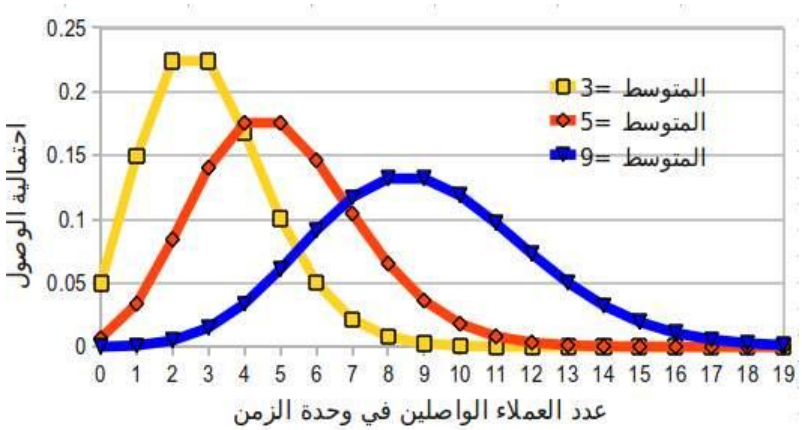
ث- **التوزيع الاحتمالي لوصـول العملاء** (Probability Distribution of Customer Arrivals): معدل وصـول العملاء يعني العدد المتوسـط للعملاء الذين يصـلون في وحدة الزمن، فعندما يصـل 100 عميل في أربع سـاعات فإن معدل وصول العملاء يساوي 100 / 4 = 25 عميل في الساعة، هذا لا يعني أن كل ساعة سيحضر 25 عميلا ولكن قد يحضر ثلاثون في الساعة الأولى وعشرون في الثانية، فهذا هو العدد المتوسط في الساعة.



عادة ما يصل العملاء بشكل عشـوائي (أي غير منظم) وبشـكل مسـتقل أي أن وصـول هذا العميل لا يرتبط بحضـور غيره، وقد وجد الباحثون وقد أظهرت الدراسـات أن معدل وصـول العملاء لطلب الخدمة يخضـع عادة لتوزيع احتمالي يسـمى بتوزيع بوسـون (Distribution Poisson Probability)، ويمكننا فهم توزيع وصـول العملاء على أنه معادلة تحدد احتمالية وصـول عدد من العملاء في وقت محدد، فإذا كان معدل وصـول العملاء هو 25 عميل في السـاعة فما هي احتمالية وصـول 15 عميلا في السـاعة أو 50 عميلا في السـاعة؟ هذا ما يحدده التوزيع الاحتمالي. الشـكل أعلاه يبين توزيع بوسـون لمتوسـط 3 عملاء في وحدة الزمن (الدقيقة على سـبيل المثال)، يمكن

ملاحظة ان التوزيع يبين احتمالية حضور 8 عملاء في الدقيقة ولكن هذا قليل الحدوث، وهناك احتمالية لحضور عميل واحد في الدقيقة أو أربعة أو ستة وهكذا، ولكل حالة نسبة حدوثها حسب الرقم المبين على المحور الرأسي.

أما الشكل أدناه فيبين اختلاف توزيع بوسون حسب اختلاف معدل الحضور من 3 إلى 5 إلى 9.



ج- **التوزيع الاحتمالي لزمن الخدمة** ("Probability Distribution of Service Time"): أما زمن الخدمة فإن نظرية الطوابير تفترض أنه يخضع للتوزيع الأسي (Exponential Distribution) وهو ما ينطبق على الكثير من الخدمات، ولكن من المهم أن نتأكد قبل استخدام نظرية الطوابير من أن زمن الخدمة الفعلي يتبع التوزيع الأسي فعلا وإلا فإن علينا اللجوء لأساليب أخرى مثل المحاكاة بالحاسوب أو بعض الحلات الخاصة من نظرية الطوابير.

ولو تأملنا الشكل أدناه للاحظنا أنه من المقبول أن يشابه هذا المنحنى زمن الخدمة الحقيقي، فالمنحنى يتميز بوجود احتمالية كبيرة لأن يكون زمن الخدمة أقل من المتوسط، وهناك احتمال لزيادة الزمن عن المتوسط ولو بزيادات كبيرة في أحيان قليلة جدا، وفي الواقع فإن الخدمة التي تتم عادة في دقيقتين قد تستغرق دقيقة ونصف في أحيان عديدة وقد تستغرق 5 دقائق في أحوال قليلة وقد تستغرق سبع دقائق في أحوال نادرة.

